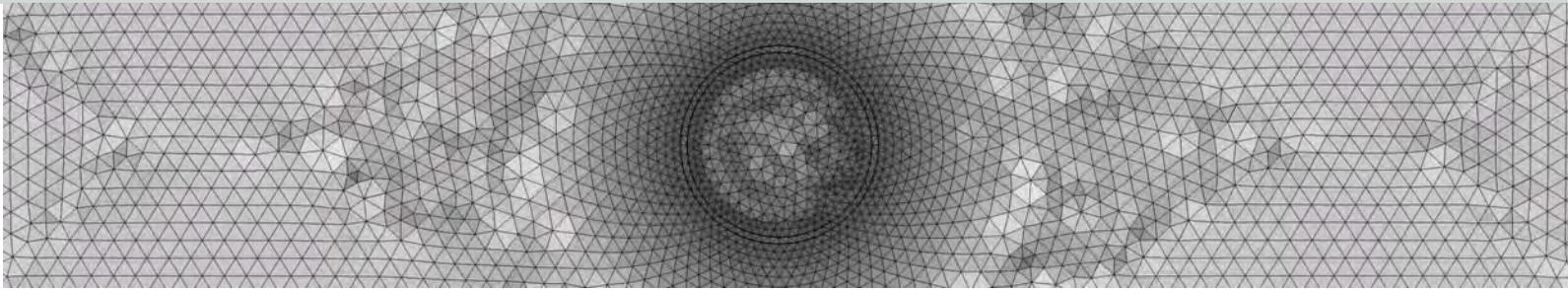




Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat ENSI
Inspection fédérale de la sécurité nucléaire IFSN
Ispettorato federale della sicurezza nucleare IFSN
Swiss Federal Nuclear Safety Inspectorate ENSI

Sicherheitstechnisches Gutachten zum Vorschlag der in Etappe 3 SGT
weiter zu untersuchenden geologischen Standortgebiete



Sicherheitstechnisches Gutachten zum Vorschlag der in Etappe 3 SGT weiter zu untersuchenden geologischen Standortgebiete

Sachplan geologische Tiefenlager, Etappe 2



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat ENSI

ENSI 33/540

Sicherheitstechnisches Gutachten zum Vorschlag der in Etappe 3 SGT weiter zu untersuchenden geologischen Standortgebiete

Sachplan geologische Tiefenlager Etappe 2



Zusammenfassung

Der Sachplan geologische Tiefenlager (SGT) ist das Auswahlverfahren der Schweiz zur Festlegung von Standortgebieten für die geologische Tiefenlagerung radioaktiver Abfälle. Das schrittweise Verfahren umfasst drei Etappen und wurde 2008 in einem Konzeptteil festgelegt. Die Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (Nagra) schlug 2008 sechs Standortgebiete (sechs Gebiete für ein Lager für schwach- und mittelaktive Abfälle, SMA, drei davon auch für ein Lager für hochaktive Abfälle, HAA) vor und das ENSI stimmte diesem Vorschlag zu. 2011 entschied der Bundesrat, diese Standortgebiete in den Sachplan für weitere Untersuchungen in Etappe 2 SGT aufzunehmen. Etappe 2 SGT dient der Einengung auf mindestens zwei Standortgebiete je für ein SMA- und HAA-Lager, die in Etappe 3 SGT vertieft untersucht werden. In Etappe 3 SGT erfolgt zunächst die Wahl des Standorts pro Lagertyp. Anschliessend werden für diese Rahmenbewilligungsgesuche vorbereitet und eingereicht.

Das Eidgenössische Nuklearsicherheitsinspektorat (ENSI) trägt als zuständige Aufsichtsbehörde des Bundes die Gesamtverantwortung für die sicherheitstechnische Prüfung und Beurteilung der geologischen Standortgebiete und Standorte. In dieser Rolle hat das ENSI den von der Nagra eingereichten Vorschlag für die in Etappe 3 SGT vertieft zu untersuchenden Standortgebiete geprüft und das vorliegende sicherheitstechnische Gutachten erstellt. Das ENSI wurde dabei von der Expertengruppe Geologische Tiefenlagerung (EGT), vom Bundesamt für Landestopographie swisstopo und zahlreichen weiteren Experten unterstützt.

Im Januar 2015 wurde der Vorschlag der Nagra durch das Bundesamt für Energie BFE veröffentlicht. Darin schlägt die Nagra die Standortgebiete Zürich Nordost und Jura Ost für die vertiefte Untersuchung in Etappe 3 SGT sowohl für ein SMA- als auch ein HAA-Lager vor. In diesen Standortgebieten ist der Opalinuston für beide Lagertypen das weiter zu verfolgende Wirtgestein. Aus Sicht der Nagra sind die vier SMA-Standortgebiete Südranden, Nördlich Lägern, Jura-Südfuss und Wellenberg und das HAA-Standortgebiet Nördlich Lägern aufgrund eindeutiger Nachteile im Vergleich zu den anderen Standortgebieten in Etappe 2 SGT zurückzustellen.

Das ENSI stellte bei seiner Beurteilung der Unterlagen fest, dass die von der Nagra dokumentierten felsmechanischen Grundlagen sowie die getroffenen Annahmen und die gewählten Kriterien für die Beurteilung der maximalen Tiefe der Lagerebene nicht belastbar waren. In der Folge waren auch die von der Nagra geplanten Optimierungsanforderungen an die maximale Tiefe der Lagerebene für SMA- und HAA-Lager (Beschränkung der Lagerebene auf 600 bzw. 700 m u. T.) und die Herleitung der Bewertungsskala des Indikators «Tiefenlage im Hinblick auf die bautechnische Machbarkeit» weder nachvollziehbar noch belastbar. Die Nagra wurde daher im November 2015 aufgefordert, ihre felsmechanischen und bautechnischen Unterlagen zu überarbeiten. Die von der Nagra überarbeiteten Unterlagen wurden im August 2016 durch das BFE veröffentlicht. Darin bestätigt die Nagra ihren Vorschlag, das Standortgebiet Nördlich Lägern für SMA und HAA aufgrund eindeutiger Nachteile bezüglich des Platzangebots und der maximalen Tiefenlage zurückzustellen. Das ENSI hat diese Unterlagen geprüft und in der Gesamtbeurteilung berücksichtigt.

Für die Herleitung des Vorschlags von mindestens zwei Standortgebieten je Lagertyp führte die Nagra anhand der behördlichen Vorgaben eine quantitative provisorische Sicherheitsanalyse durch und bewertete die Standortgebiete qualitativ anhand der 13 Kriterien zu Sicherheit und technischer Machbarkeit. Ausserdem musste die Nagra anhand dieser Kriterien darlegen, inwiefern belastbare eindeutige Nachteile eines Standortgebiets gegenüber anderen Standortgebieten festgestellt werden können.

Gemäss den Vorgaben des Konzeptteils SGT darf als Ergebnis aus Etappe 2 SGT kein Standortgebiet vorgeschlagen werden, das aufgrund der provisorischen Sicherheitsanalyse und der weiteren sicherheitstechnischen Aspekte eindeutig als weniger geeignet bewertet ist als andere Standortgebiete. Dafür hatte die Nagra in Etappe 2 SGT zu zeigen, dass ihre sicherheitstechnischen Aussagen unter Berücksichtigung der bestehenden Variabilitäten und Ungewissheiten in Daten und Prozessen belastbar sind. Es können nur Standortgebiete zurückgestellt werden, falls mindestens eine der folgenden Aussagen zutrifft:

-
- 1) Das Standortgebiet erfüllt das Dosis-Schutzkriterium nicht.
 - 2) Das Standortgebiet ist aufgrund der Ergebnisse der Dosisberechnungen eindeutig weniger geeignet.
 - 3) Die Gesamtbewertung des Standortgebiets ist schlechter als «geeignet».
 - 4) Für das Standortgebiet können anhand der Kriterien zu Sicherheit und technischer Machbarkeit belastbare eindeutige Nachteile gegenüber anderen Standortgebieten festgestellt werden.

Das ENSI stellt fest, dass die Nagra die vorgegebenen Kriterien zu Sicherheit und technischer Machbarkeit bei der Erarbeitung des Vorschlags adäquat und stufengerecht berücksichtigt hat. Der Vorschlag der Nagra wurde gemäss den Vorgaben des Sachplans transparent und grösstenteils nachvollziehbar dargelegt. Die Nagra hat die verfügbaren relevanten geologischen Informationen und deren Berücksichtigung ausführlich erläutert. Das ENSI kommt zum Schluss, dass die geologischen Informationen ausreichend für die Zwecke einer provisorischen Sicherheitsanalyse und den Standortvergleich in Etappe 2 SGT sind und dass die Nagra diese Informationen in ihrem Vorschlag berücksichtigt hat. Damit sind alle 41 sicherheitstechnischen Forderungen des ENSI an die Nagra zur Erreichung des notwendigen Kenntnisstands in Etappe 2 SGT erfüllt.

Die Nagra führte das standardisierte Parametervariationsverfahren zur Ermittlung der charakteristischen Dosisintervalle gemäss den behördlichen Vorgaben durch. Das ENSI hat im Rahmen der Überprüfung der Parameter und der Beurteilung der quantitativen provisorischen Sicherheitsanalyse die Ergebnisse der Nagra durch eigene Dosisberechnungen überprüft und kann die Resultate der Nagra nachvollziehen. Die Dosisintervalle aller Standortgebiete liegen für alle jeweils betrachteten Wirtgesteine unterhalb des Dosischutzkriteriums von 0.1 mSv pro Jahr. Damit gelten für Etappe 2 SGT alle Standortgebiete bezüglich der Dosisberechnungen als sicherheitstechnisch geeignet.

Die qualitative Bewertung der optimierten Lagerperimeter in den geologischen Standortgebieten erfolgt gemäss den Vorgaben im Konzeptteil SGT anhand der 13 Kriterien zu Sicherheit und technischer Machbarkeit. Die 13 Kriterien werden, wie in Etappe 1 SGT, jeweils in mehrere Indikatoren unterteilt und bewertet. Die Aggregation der Einzelbewertungen der Indikatoren erfolgt durch Mittelwertbildung auf Ebene der Kriterien, Kriteriengruppen und der Gesamtbewertung. Die Überprüfung der qualitativen Bewertung durch das ENSI bestätigt, dass alle Standortgebiete mit ihren jeweiligen Wirtgesteinen aus Etappe 1 SGT der Stufe «geeignet» entsprechen.

Aus Sicht des ENSI ist keines der Standortgebiete aufgrund der Resultate der Dosisberechnungen oder der qualitativen Bewertung zurückzustellen. Damit bestätigt das ENSI die Aussage der Nagra, dass in allen Standortgebieten grundsätzlich sichere geologische Tiefenlager erstellt werden können. Die Zurückstellung eines Standortgebiets in Etappe 2 SGT ist daher nur über eindeutige Nachteile basierend auf den Kriterien zu Sicherheit und technischer Machbarkeit möglich.

Das ENSI kommt bezüglich der von der Nagra identifizierten eindeutigen Nachteile für die maximale Tiefenlage und das Platzangebot untertags im Standortgebiet Nördlich Lägern zu einer abweichenden Beurteilung.

Das Vorgehen der Nagra unter Einbezug überwiegend konservativer geomechanischer Grundlagen und vereinfachter Berechnungsannahmen bestätigt aus Sicht des ENSI grundsätzlich die bautechnische Machbarkeit in den Standortgebieten. Für die quantitative Beurteilung der Tiefenlage und den Nachweis eindeutiger Nachteile sind jedoch die geomechanischen Grundlagen nicht belastbar. Dies betrifft insbesondere die von der Nagra getroffenen Annahmen zu den geomechanischen Parametern und die fehlenden standortspezifischen Daten. Aus Sicht des ENSI gibt es keine zwingenden bautechnischen Gründe, die eine Einschränkung der Tiefenlage in Etappe 2 SGT stützen würden. Daher stimmt das ENSI der Begrenzung der Tiefenlage für SMA- und HAA-Lager auf 600 bzw. 700 m u. T. durch die Nagra nicht zu und identifiziert für das Standortgebiet Nördlich Lägern keinen eindeutigen Nachteil.

Das Platzangebot im Standortgebiet Nördlich Lägern wird neben der maximalen Tiefenlage auch durch die von der Nagra im Norden des Standortgebiets angenommene zu meidende tektonische Zone beeinflusst. Diese ist aus Sicht des ENSI möglich, aber aufgrund der zur Verfügung stehenden Daten nicht nachgewiesen. Die Nagra hat ausserdem aus geologischen Überlegungen eine standortspezifische Abschätzung des Platzbedarfs für Tiefenlager vorgenommen. Auch diese ist aufgrund der zur Verfügung stehenden Daten nicht belastbar.

nachgewiesen. Damit geht das ENSI in Etappe 2 SGT von einem ausreichenden Platzangebot untertags im Standortgebiet Nördlich Lägern aus und identifiziert daher keinen eindeutigen Nachteil.

Aus dem Vergleich zwischen den SMA-Standortgebieten werden die Gebiete Südranden, Jura-Südfuss und Wellenberg aufgrund der identifizierten eindeutigen Nachteile als eindeutig weniger geeignet bewertet und zurückgestellt. Für die drei SMA-Standortgebiete Zürich Nordost, Jura Ost und Nördlich Lägern identifiziert das ENSI keine eindeutigen Nachteile. Die von der Nagra vorgeschlagene Zurückstellung des SMA-Standortgebiets Nördlich Lägern ist nach Ansicht des ENSI basierend auf den vorliegenden Daten und Kenntnissen nicht belastbar.

Für die HAA-Standortgebiete Zürich Nordost und Jura Ost identifiziert das ENSI wie die Nagra keine eindeutigen Nachteile und abweichend von der Nagra auch keine eindeutigen Nachteile für das Standortgebiet Nördlich Lägern. Aufgrund der vorliegenden Daten sowie der bestehenden Ungewissheiten wird kein HAA-Standortgebiet als eindeutig weniger geeignet als die anderen Standortgebiete bewertet. Eine Zurückstellung des HAA-Standortgebiets Nördlich Lägern basierend auf den vorliegenden Daten und Kenntnissen beurteilt das ENSI als nicht belastbar.

Aus Sicht des ENSI sind damit die drei geologischen Standortgebiete Zürich Nordost, Jura Ost und Nördlich Lägern jeweils für ein SMA-Lager und ein HAA-Lager in Etappe 3 SGT vertieft weiter zu untersuchen.

Brugg, 18. April 2017

Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat ENSI

Der Direktor



Dr. Hans Wanner



Résumé

Le plan sectoriel «Dépôts en couches géologiques profondes» est le processus de sélection de la Suisse à travers lequel sont sélectionnés les domaines d'implantation de dépôts en couches géologiques profondes destinés au stockage de déchets radioactifs. La procédure graduelle comprend trois étapes et a été définie en 2008 dans une conception générale. La Société coopérative nationale pour le stockage des déchets radioactifs Nagra a proposé en 2008 six domaines (six domaines pour l'entreposage des déchets de faible et moyenne activité DFMA, dont trois pourraient aussi servir à l'entreposage de déchets de haute activité DHA), que l'IFSN a approuvé. En 2011, le Conseil fédéral a décidé de retenir ces domaines pour l'étape 2 du plan sectoriel. Cette étape 2 doit permettre de réduire le nombre de domaines à au moins deux, capables d'abriter un dépôt DFMA, et/ou DHA, qui seront étudiés de manière encore plus approfondie dans l'étape 3. C'est dans l'étape 3 que le choix du site d'implantation pour chaque type de dépôts sera arrêté. A la suite de quoi, les demandes d'autorisation générale pour ces dépôts seront préparées et soumises.

En sa qualité d'autorité de surveillance indépendante de la Confédération, l'Inspection fédérale de la sécurité nucléaire IFSN endosse la responsabilité générale concernant l'examen et l'évaluation des sites géologiques et des domaines d'implantation. Dans ce rôle, l'IFSN a examiné la proposition délivrée par la Nagra concernant les domaines d'implantation à étudier de manière approfondie dans l'étape 3, et a élaboré le rapport d'expertise de sécurité qui suit. Pour ce faire, l'IFSN a reçu le soutien du Groupe d'experts stockage géologique en profondeur (GESGP), de l'Office fédéral de la topographie swisstopo, ainsi que de nombreux autres spécialistes.

En janvier 2015, la proposition de la Nagra a été publiée par l'Office fédéral de l'énergie OFEN. Dans celle-ci, la Nagra propose les domaines de Zurich nord-est et de Jura est pour les études approfondies de l'étape 3 du plan sectoriel. Ils pourraient chacun être utilisés soit comme dépôt DFMA et DHA. Dans ces deux domaines, l'argile à Opalinus est considérée comme la roche d'accueil à retenir pour les deux types de dépôts. Selon la Nagra, il faut reléguer, lors de l'étape 2 de la procédure du plan sectoriel, les quatre domaines DFMA Pied sud du Jura, Nord du Lägern, Randen-sud et Wellenberg, ainsi que le domaine Nord du Lägern pour les dépôts DHA, car ils présentent de désavantages univoques par rapport aux autres domaines.

L'IFSN a constaté dans son examen des documents que les fondements géomécaniques documentés par la Nagra, les hypothèses adoptées et les arguments pris en compte pour définir la profondeur maximale de l'entreposage n'ont pas fait suffisamment leur preuve. En particulier, il était difficile de comprendre la demande déposée par la Nagra en vue d'optimiser l'indicateur «profondeur maximale du point de vue de la faisabilité technique» (profondeur maximale de 700 mètres pour les DHA, et de 600 mètres pour les DFMA), et la nouvelle échelle d'évaluation qu'elle en avait tiré. La Nagra avait été priée en novembre 2015 de compléter les documents géomécaniques et techniques. Les documents révisés par la Nagra ont été publiés par l'OFEN en août 2016. Dans ceux-ci, la Nagra confirme sa proposition de reléguer le domaine d'implantation Nord du Lägern pour les déchets DFMA et DHA en raison de désavantages univoques de place souterraine à disposition et de profondeur maximale d'entreposage. L'IFSN a examiné ces documents et en a pris compte dans son appréciation générale.

Afin d'arriver à proposer au minimum deux domaines d'implantation pour chacun des deux types de dépôts, la Nagra a mené une analyse quantitative provisoire sur la base des prescriptions réglementaires, et évalué les domaines d'implantation qualitativement sur la base de 13 critères de sécurité et de faisabilité technique. De plus, la Nagra a dû présenter, sur la base de ces critères, de quelle manière il est possible de définir des désavantages univoques capables de départager les domaines d'implantations.

En effet, selon la conception générale du plan sectoriel, aucun domaine d'implantation ne doit être proposé comme résultat de l'étape 2 s'il a été manifestement estimé moins approprié que d'autres sites d'implantation, que ce soit sur la base de l'analyse de sécurité provisoire, ou à cause d'autres aspects liés à la sécurité. Pour cela, la Nagra devait montrer lors de l'étape 2 du plan sectoriel que ses déductions relatives à la sécurité supportent la variabilité et les incertitudes inhérentes aux données et aux processus. Un domaine d'implantation ne peut être relégué que s'il remplit au moins un des critères suivants:

-
- 1) Le domaine ne remplit pas le critère de radioprotection.
 - 2) Le domaine est clairement moins approprié sur la base des résultats du calcul des doses.
 - 3) L'appréciation générale est inférieure au qualificatif «approprié».
 - 4) Lorsque le domaine fait preuve de désavantages univoques par rapport à d'autres domaines au niveau de la sécurité et de la faisabilité technique.

L'IFSN constate que la Nagra a pris en compte, de façon adéquate et en suivant les étapes, les critères définis se rapportant à la sécurité et à la faisabilité technique dans sa proposition. Cette dernière suit les prescriptions du plan sectoriel de manière transparente et en grande partie de façon compréhensible. La Nagra a évoqué de façon suffisante les informations géologiques pertinentes et leur prise en compte. L'IFSN est arrivée à la conclusion que les informations géologiques permettent de mener une analyse de la sécurité provisoire et d'établir une comparaison entre les domaines d'implantation dans l'étape 2, et que la Nagra a tenu compte de ces informations dans sa proposition. Ainsi, les 41 exigences liées à la sécurité formulées par l'IFSN pour la Nagra en vue d'atteindre l'état de connaissance nécessaire à l'étape 2 sont remplies.

La Nagra a appliqué la procédure de variation paramétrique standardisée pour en tirer l'intervalle de dose caractéristique prescrit par les autorités. Dans le cadre du contrôle des paramètres et d'évaluation de l'analyse de sécurité quantitative provisoire, l'IFSN a vérifié les résultats obtenus par la Nagra en menant elle-même des calculs de dose, et peut suivre le processus amenant aux résultats de la Nagra. Les intervalles de dose de tous les domaines d'implantation se trouvent pour tous les types de roche d'accueil considérés en dessous du critère de radioprotection de 0,1 mSv par année. Tous les domaines correspondent aux exigences de sécurité du point de vue du calcul de dose.

L'évaluation qualitative du périmètre optimisé pour les dépôts dans les domaines d'implantations géologiques s'est déroulée selon les prescriptions du plan sectoriel suivant les 13 critères définis se rapportant à la sécurité et à la faisabilité technique. Comme lors de l'étape 1, les 13 critères sont déclinés en plusieurs indicateurs et évalués. L'agrégation des évaluations individuelles des indicateurs est réalisée par la formation d'une valeur moyenne au niveau des critères, des groupes de critères et de l'évaluation globale. La vérification de l'évaluation qualitative par l'IFSN confirme que tous les domaines d'implantation, avec leurs roches d'accueil propres de l'étape 1, sont jugés «appropriés».

Du point de vue de l'IFSN, il ne faut reléguer aucun domaine d'implantation en se basant sur les résultats du calcul de dose, ou de l'évaluation qualitative. De cette manière, l'IFSN confirme la déclaration faite par la Nagra selon laquelle en principe un entreposage en couche géologique profonde peut être réalisé dans tous les domaines d'implantations. La relégation d'un domaine de l'étape 2 ne peut dès lors se produire que si un désavantage univoque peut être constaté sur la base de la sécurité et de la faisabilité technique.

Par contre, l'IFSN arrive à un résultat différent que celui avancé par la Nagra à propos de l'identification d'un désavantage univoque concernant la profondeur maximale et la place souterraine à disposition dans le domaine Nord du Lägern.

La procédure de la Nagra, utilisant principalement des fondements géomécaniques conservateurs et des hypothèses de calculs simplifiées, confirme en principe du point de vue de l'IFSN la faisabilité technique dans les domaines d'implantation. Mais les fondements géomécaniques retenus ne supportent ni un jugement quantitatif, ni la preuve d'un désavantage univoque. Cela est particulièrement le cas en ce qui concerne les hypothèses sur les paramètres géomécaniques et le manque de données spécifiques à propos des domaines d'implantations. Du point de vue de l'IFSN, il n'existe pas de raisons contraignantes du point de vue de la construction permettant de réduire la profondeur maximale dans l'étape 2. Dès lors, l'IFSN n'approuve pas la limitation de la profondeur avancée par la Nagra à 600 ou 700 mètres pour les déchets DFMA et DHA et ne considère pas que le domaine Nord du Lägern souffre d'un désavantage univoque.

De la même manière qu'à propos de la profondeur maximale, la place souterraine à disposition dans le domaine Nord du Lägern est aussi influencée par la zone tectonique à éviter que la Nagra a défini dans sa partie nord. L'existence de cette zone est possible du point de vue conceptionnel, mais cela n'est pas étayé. En outre, la Nagra a aussi effectué une estimation du besoin de place souterraine pour les dépôts profonds sur la base de considérations géologiques. Mais cette estimation n'a pas non plus résisté à l'épreuve des données à dispositi-

on. Ainsi, l'IFSN estime que pour l'étape 2, il y a suffisamment de place souterraine dans le domaine Nord du Lägern, et ne constate pas non plus ici de désavantage univoque.

En les comparant, il s'est avéré que les domaines d'implantation Randen-sud, Pied sud du Jura et Wellenberg sont moins adaptés, et ont été relégués à cause de désavantages univoques. L'IFSN ne constate aucun désavantage univoque pour les trois domaines envisagés pour les déchets DFMA que sont Zurich nord-est, Jura est et Nord du Lägern. La relégation du domaine Nord du Lägern proposée par la Nagra n'est pas supportée par les données et les connaissances à disposition.

En ce qui concerne les domaines d'implantation DHA Zurich nord-est et Jura est, l'IFSN, comme la Nagra, ne constate pas de désavantage univoque. Son avis diffère de celui de la Nagra en ce qui concerne le domaine d'implantation DHA Nord du Lägern, à propos duquel l'IFSN ne constate pas de désavantage univoque. Sur la base des données à dispositions, ainsi que des incertitudes existantes, aucun domaine d'implantation pour les déchets DHA n'est estimé moins approprié qu'un autre. Une relégation du domaine d'implantation DHA Nord du Lägern n'est pas supporté par les données et les connaissances à disposition.

Du point de vue de l'IFSN, les trois domaines d'implantation Zurich nord-est, Jura est et Nord du Lägern doivent être étudiés en détail lors de l'étape 3 du plan sectoriel, autant comme dépôts pour les déchets DFMA, que DHA.

Brugg, le 18 avril 2017

Inspection fédérale de la sécurité nucléaire IFSN

Le directeur



Dr. Hans Wanner



Summary

The Sectoral Plan for Deep Geological Repositories (SGT) is the selection procedure for the determination of sites for the deep geological storage of radioactive waste in Switzerland. The step-by-step procedure covers three stages, and was defined in a conceptual report in 2008. In the same year, the National Cooperative for the Disposal of Radioactive Waste (Nagra) proposed six siting areas (six areas for a repository for low- and intermediate-level waste, L/ILW, three of which also for a repository for high-level waste, HLW) and ENSI agreed with this proposal. In 2011, the Federal Council decided to incorporate these siting areas into the sectoral plan for further investigation in stage 2 of the SGT. The purpose of stage 2 of the SGT is to narrow down to at least two siting areas each for an L/ILW and a HLW repository, which will be investigated in more detail in stage 3 of the SGT. In stage 3 of the SGT, the site for each repository type will be selected. General licence applications will then be prepared and submitted for those sites.

The Swiss Federal Nuclear Safety Inspectorate (ENSI) as the competent national supervisory authority is responsible for the safety examination and assessment of the geological siting areas and sites. In this role, ENSI assessed the proposal submitted by Nagra for the siting areas to be investigated in more detail in stage 3 of the SGT and produced this safety review. ENSI was assisted by the Expert Group on Nuclear Waste Disposal (EGT), by the Federal Office of Topography swisstopo and many other experts.

The Nagra proposal was published by the Swiss Federal Office of Energy (SFOE) in January 2015. Nagra proposes the siting areas Zürich Nordost and Jura Ost for further detailed investigations in stage 3 of the SGT, for both an L/ILW and an HLW repository. In these siting areas, Opalinus Clay is the host rock to be pursued further for both repository types. In the view of Nagra, the four L/ILW siting areas Südranden, Nördlich Lägern, Jura-Südfuss and Wellenberg and the HLW siting area Nördlich Lägern are to be deferred in stage 2 of the SGT, as a result of clear disadvantages in comparison with the other siting areas.

During its assessment of the documents provided by Nagra, ENSI concluded that the rock mechanical basis as well as the assumptions made and the chosen criteria were not robust for the assessment of the maximum depth of the L/ILW and HLW repository levels. Therefore, proposed limitations of the depth of L/ILW and HLW repositories by Nagra to 600 m respectively to 700 m below ground as well as the derived scale for evaluation of the indicator «Depth with regard to engineering feasibility» are neither comprehensible nor robust. In November 2015 Nagra was requested to revise its documents on rock mechanics and tunnel engineering. The additional Nagra documents were published by the SFOE in August 2016. Nagra confirms its proposal to defer the siting area Nördlich Lägern for L/ILW and HLW repositories as a result of clear disadvantages of this siting area with regard to the available underground space and the maximum depth. ENSI assessed these documents and took them into account in its overall assessment.

For the derivation of the proposal of at least two siting areas per repository type, Nagra conducted a quantitative provisional safety analysis using the regulator requirements and qualitatively assessed the siting areas using the 13 criteria on safety and technical feasibility. In addition, by application of these criteria, Nagra had to demonstrate the extent to which it is possible to determine any reliable, clear disadvantages of one siting area in relation to other siting areas.

As specified in the conceptual report of the SGT, no siting area that is assessed to be significantly less suitable than other siting areas on the basis of the provisional safety analysis and the other safety-related aspects may be proposed as a result of stage 2 of the SGT. For this purpose, Nagra had to demonstrate in stage 2 of the SGT that its safety-related statements are reliable, taking into account the existing variabilities and uncertainties in data and processes. Siting areas can only be deferred if at least one of the following statements applies:

-
- 1) The siting area does not meet the radiation protection dose criterion.
 - 2) The siting area is clearly less suitable on the basis of the dose calculations.
 - 3) The overall assessment of the siting area is worse than «suitable».
 - 4) There are reliable clear disadvantages of the siting area in terms of the criteria on safety and technical feasibility compared with other siting areas.

ENSI states that Nagra adequately and appropriately took the prescribed criteria on safety and technical feasibility into account when developing its proposal. Nagra's proposal was presented according to the requirements of the sectoral plan in a transparent and largely comprehensible manner. Nagra explained in detail the available relevant geological information and its consideration. ENSI comes to the conclusion that the geological information is adequate for the purposes of a provisional safety analysis and the site comparison in stage 2 of the SGT, and that Nagra has taken this information into account in its proposal. This means that all 41 of ENSI's safety-related requirements for Nagra for the achievement of the necessary level of knowledge have been met in stage 2 of the SGT.

Nagra conducted the standardised parameter variation process for the calculation of the characteristic dose intervals according to the regulatory requirements. When reviewing the parameters and assessing the qualitative provisional safety analysis, ENSI tested Nagra's results by means of its own dose calculations and verified Nagra's conclusions. The dose intervals of all the siting areas are below the dose protection criterion of 0.1 mSv per year for all investigated host rocks. This means that for stage 2 of the SGT, all siting areas can be considered suitable in terms of safety with regard to dose calculations.

The qualitative assessment of the optimised repository perimeters in the geological siting areas is carried out according to requirements in the conceptual report of the SGT, using the 13 criteria on safety and technical feasibility. As in stage 1 of the SGT, the 13 criteria are each subdivided into several indicators and assessed. The aggregation of the individual assessments is carried out by means of averaging at the level of the criteria, the criteria groups and the overall assessment. The examination of the qualitative assessment by ENSI confirms that all the siting areas with their respective host rocks from stage 1 of the SGT meet the level «suitable».

In the view of ENSI, none of the siting areas is to be deferred on the basis of the results of the dose calculations or of the qualitative assessment. ENSI thus confirms the statement by Nagra that safe geological repositories can in principle be produced in all the siting areas. The deferral of a siting area in stage 2 of the SGT is therefore only possible as a result of clear disadvantages based on the criteria relating to safety and technical feasibility. ENSI comes to a deviating conclusion with regard to the clear disadvantages identified by Nagra for the maximum depth and the available underground space for the siting area Nördlich Lägern.

In the view of ENSI, the approach of Nagra for assessment of the maximum depth of repositories, which predominantly involves conservative geomechanical data and simplified calculation assumptions, confirms in principle the engineering feasibility of repositories in the siting areas. However, the presented geomechanical data is not robust for the quantitative assessment of the depth of repositories and for the corresponding proof of clear disadvantages of sitting areas. This involves in particular the assumptions concerning the geomechanical parameters and the missing site specific data. There are no compelling engineering reasons which would support a restriction of the depth of repositories in stage 2 of the SGT. ENSI therefore does not agree with the limitations of the depth of L/ILW and HLW repositories to 600 m respectively to 700 m below ground as proposed by Nagra, and it does not identify any related, clear disadvantage for the siting area Nördlich Lägern.

The available underground space in the siting area Nördlich Lägern is influenced not only by the maximum depth, but also by the «tectonic zone to be avoided» assumed by Nagra to be located in the north of the siting area. In the view of ENSI, this zone might exist, but its existence cannot be proven based on the data available. Based on geological considerations, Nagra also carried out a siting area specific assessment of the space requirements for repositories. This has likewise proved unreliable, based on the available data. In stage 2 of the SGT, ENSI therefore assumes that there is adequate underground space in the siting area Nördlich Lägern and thus does not identify any clear disadvantage.

From the comparison between the L/ILW siting areas, the areas of Südranden, Jura-Südfuss and Wellenberg are

assessed as clearly less suitable as a result of the identified clear disadvantages. For the three L/ILW siting areas, Zürich Nordost, Jura Ost and Nördlich Lägern, ENSI identifies no clear disadvantages. According to ENSI, the deferral of the L/ILW siting area of Nördlich Lägern proposed by Nagra is not considered to be reliable on the basis of the available data and knowledge.

Like Nagra, ENSI identifies no clear disadvantages for the HLW siting areas of Zürich Nordost and Jura Ost and, unlike Nagra, it also identifies no clear disadvantages for the siting area of Nördlich Lägern. On the basis of the available data and the existing uncertainties, none of the HLW siting areas is assessed to be less suitable than the other siting areas. The deferral of the HLW siting area Nördlich Lägern on the basis of the available data is not considered to be reliable by ENSI.

In the view of ENSI, the three geological siting areas of Zürich Nordost, Jura Ost and Nördlich Lägern are thus each to be investigated in more detail for an L/ILW depository and an HLW depository in stage 3 of the SGT.

Brugg, 18 April 2017

Swiss Federal Nuclear Safety Inspectorate ENSI

The Director General



Dr. Hans Wanner



Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	3
Résumé	7
Summary	11
Inhaltsverzeichnis	15
Abbildungsverzeichnis	19
Tabellenverzeichnis	23
1 Einleitung	27
1.1 Gesetzliche Grundlagen	28
1.2 Sachplan geologische Tiefenlager	28
1.3 Vorgaben bezüglich des Einengungsvorschlags für Etappe 2 SGT	29
1.4 Behördliche Überprüfung	30
1.5 Eingereichte Unterlagen der Nagra zur Etappe 2 SGT	31
1.6 Gliederung des Gutachtens	32
2 Beurteilung wichtiger Grundlagen für die Einengung der Wirtgesteine und Standortgebiete	33
2.1 Inventar und Abfallzuteilung	33
2.1.1 Beurteilung des MIRAM 14	33
2.1.2 Abfallzuteilung auf SMA- und LMA-Lager	37
2.1.3 Einteilung der SMA/LMA in zwei Abfallgruppen	37
2.2 Lagerkonzepte	38
2.3 Sicherheitskonzepte und Sicherheitsfunktionen für HAA- und SMA-Lager	42
2.3.1 Nahfeld des SMA-Lagers	42
2.3.2 Nahfeld des HAA-Lagers	44
2.4 2D-Seismik: Processing und Interpretation	47
2.5 Herleitung der Mächtigkeit	50
2.6 Geologisches Modell: Schichtmodell, Felsoberfläche und lokale Erosionsbasis	52
2.6.1 Geologisches Schichtmodell	52
2.6.2 Modell der Felsoberfläche	54
2.6.3 Modell der lokalen Erosionsbasis	55
2.7 Modellierung der hydrogeologischen Verhältnisse	56
2.8 Biosphärenmodellierung	59
2.9 Grundlagen für die Beurteilung der Tiefenlage und der bautechnischen Machbarkeit der Lagerkammer im Wirtgestein Opalinuston	63
2.9.1 Standortspezifische geologische Modelle	64
2.9.2 In situ-Gebirgsspannungen	64
2.9.3 Gebirgsmodelle, geotechnische Parameter und Baugrundmodelle	65
2.9.4 Geologische Gefährdungsbilder	69
2.9.5 Geomechanische Berechnungen und Tragwerksanalyse	70
2.9.6 Schlussfolgerungen	72

2.10	Grundlagen für die Beurteilung der Tiefenlage und der bautechnischen Machbarkeit der SMA-Lagerkammern im 'Braunen Dogger', den Effinger Schichten und den Mergel-Formationen des Helvetikums	73
2.10.1	'Brauner Dogger'	73
2.10.2	Effinger Schichten	74
2.10.3	Mergel-Formationen des Helvetikums (Standortgebiet Wellenberg)	75
2.11	Bautechnische Risikoanalyse	77
2.12	Ergänzende Sicherheitsbetrachtungen der Zugangsbauwerke während der Betriebsphase	81
3	Charakterisierung und Konzeptualisierung der Wirt- und Rahmengesteine	85
3.1	Charakterisierung der Wirt- und Rahmengesteine	85
3.1.1	Opalinuston	86
3.1.2	'Brauner Dogger'	90
3.1.3	Effinger Schichten	94
3.1.4	Toniger Lias	97
3.1.5	Mergel-Formationen des Helvetikums	100
3.2	Geologische Konzeptualisierung	104
3.3	Modellkonzepte für die Radionuklid Ausbreitung	109
3.3.1	Konzeptualisierung für die Radionuklid Ausbreitung	109
3.3.2	Temperatur in Wirt- und Rahmengesteinen	112
3.3.3	Diffusion	114
3.3.4	Sorption und Löslichkeitslimiten	117
3.4	Gasbildung und Gastransport	121
3.4.1	Korrosionsraten	121
3.4.2	Gasbildung	122
3.4.3	Gastransport	123
4	Methodik für die Auswahl von mindestens zwei Standortgebieten in Etappe 2 SGT	129
4.1	Umgang mit Variabilitäten und Ungewissheiten	129
4.2	Festlegung des prioritären Wirtgesteins	132
4.3	Abgrenzung der optimierten Lagerperimeter	132
4.4	Prüfung der sicherheitstechnischen Eignung und Gleichwertigkeit der geologischen Standortgebiete	133
4.5	Sicherheitstechnischer Vergleich der geologischen Standortgebiete	135
5	Abgrenzung optimierter Lagerperimeter – Beurteilung und Bewertung	139
5.1	Abgrenzung optimierter Lagerperimeter in den geologischen Standortgebieten	139
5.1.1	Abgrenzung untertägiger Lagerperimeter anhand von Mindest- und verschärften Anforderungen	139
5.1.2	Anforderungen an die Optimierung der untertägigen Lagerperimeter	142
5.1.3	Methodisches Vorgehen und resultierende Lagerperimeter	153
5.2	Dosisberechnungen für die optimierten Lagerperimeter in den geologischen Standortgebieten	160

5.2.1	Methodisches Vorgehen	161
5.2.2	SMA-Standortgebiet Südranden	162
5.2.3	SMA-Standortgebiet Zürich Nordost mit Wirtgestein 'Brauner Dogger'	163
5.2.4	SMA-Standortgebiet Zürich Nordost mit Wirtgestein Opalinuston	165
5.2.5	SMA-Standortgebiet Nördlich Lägern mit Wirtgestein 'Brauner Dogger'	167
5.2.6	SMA-Standortgebiet Nördlich Lägern mit Wirtgestein Opalinuston	168
5.2.7	SMA-Standortgebiet Jura Ost	169
5.2.8	SMA-Standortgebiet Jura-Südfuss mit Wirtgestein Opalinuston	171
5.2.9	SMA-Standortgebiet Jura-Südfuss mit Wirtgestein Effinger Schichten	172
5.2.10	SMA-Standortgebiet Wellenberg	173
5.2.11	HAA-Standortgebiet Zürich Nordost	176
5.2.12	HAA-Standortgebiet Nördlich Lägern	178
5.2.13	HAA-Standortgebiet Jura Ost	180
5.2.14	Zusammenfassende Beurteilung der Dosisberechnungen	182
5.3	Qualitative Bewertung der optimierten Lagerperimeter in den geologischen Standortgebieten	183
5.3.1	Kriteriengruppe 1 «Eigenschaften des WG/EG»	183
5.3.2	Kriteriengruppe 2 «Langzeitstabilität»	189
5.3.3	Kriteriengruppe 3 «Zuverlässigkeit der geologischen Aussagen»	194
5.3.4	Kriteriengruppe 4: Bautechnische Eignung	197
5.3.5	Gesamtbewertung	200
6	Sicherheitstechnischer Vergleich der geologischen Standortgebiete und vergleichende Gesamtbewertung	203
6.1	Identifikation eindeutiger Nachteile anhand entscheidrelevanter Merkmale und Indikatoren	203
6.1.1	Entscheidrelevantes Merkmal «Wirksamkeit der geologischen Barriere»	204
6.1.2	Entscheidrelevantes Merkmal «Langzeitstabilität der geologischen Barriere»	214
6.1.3	Entscheidrelevantes Merkmal «Explorier- und Charakterisierbarkeit der geologischen Barriere im Standortgebiet»	229
6.1.4	Entscheidrelevantes Merkmal «Bautechnische Machbarkeit eines Tiefenlagers unter Berücksichtigung der vorgeschlagenen Standortareale»	232
6.2	Zusammenfassung der identifizierten eindeutigen Nachteile für die geologischen Standortgebiete	243
6.3	Vergleichende Gesamtbewertung der geologischen Standortgebiete und Beurteilung des Vorschlages der in Etappe 3 SGT weiter zu untersuchenden Standortgebiete	246
6.4	Schlussfolgerung zur Überprüfung der Sicherheit und bautechnischer Machbarkeit	249
7	Platzierung der Oberflächenanlagen in den Standortgebieten Zürich Nordost, Jura Ost und Nördlich Lägern	251
8	Beurteilung des Standortuntersuchungskonzepts für Etappe 3 SGT	257

8.1	Ziele der Standortcharakterisierungen für Etappe 3 SGT	258
8.2	Untersuchungsmethoden	258
8.3	Untersuchungskonzepte für die vorgeschlagenen Standortgebiete	258
9	Glossar & Abkürzungsverzeichnis	263
10	Referenzen	271
	Anhang A: Tabellen	A-1
	Anhang B: Expertenberichte	B-1

Abbildungsverzeichnis

- Abbildung 1:** Übersicht über die sechs Standortgebiete aus Etappe 1 SGT. Die Standortgebiete Zürich Nordost und Jura Ost wurden von der Nagra als weiter zu untersuchende Standortgebiete sowohl für ein SMA- als auch ein HAA-Lager für die Etappe 3 SGT vorgeschlagen.....27
- Abbildung 2:** Übersicht über die von der Nagra identifizierten tektonischen Elemente für das Standortgebiet Nördlich Lägern mit dem Verlauf der regionalen Störungen (rote Linien mit Überschiebungssignatur) inklusive Sicherheitsabständen (orange), der zu meidenden tektonischen Zonen (orange-schraffiert) und lokalen Störungen.....50
- Abbildung 3:** Vergleich der Tiefenlage der Basis Opalinuston in Etappe 2 SGT gegenüber Etappe 1 SGT. Gelb-, Orange- und Rottöne markieren Bereiche in denen das Schichtmodell der Etappe 2 SGT neu eine geringere Tiefenlage der Basis Opalinuston ausweist, blaue Bereiche spiegeln eine neu grössere Tiefenlage wider.53
- Abbildung 4:** Effektive Höchst- und Restfestigkeiten des Opalinustons (Matrix) aus den gemäss ENSI 33/461 als belastbar beurteilten Triaxialversuchen (Bohrung Schlattingen-1, NAB 13-18) im Vergleich mit den von der Nagra im NAB 16-43 vorgeschlagenen tiefenabhängigen effektiven Höchstfestigkeiten (Bruchgeraden) für die Gebirgsmodelle. Bruchgeraden für Tiefe 600 m u. T. gemäss ENSI 33/531. Erläuterungen zur Legende: (1) Festigkeit der Matrix wird zutreffend ermittelt gemäss ENSI 33/461; (2) Festigkeit der Matrix wird tendenziell unterschätzt gemäss ENSI 33/461. Quelle: ENSI 33/531.....67
- Abbildung 5:** Undrainierte Steifigkeiten des Opalinustons aus den gemäss ENSI 33/461 als belastbar beurteilten Triaxialversuchen (Bohrung Schlattingen-1, NAB 13-18) im Vergleich mit den von der Nagra NAB 16-43 vorgeschlagenen tiefenabhängigen undrainierten Steifigkeiten für die Gebirgsmodelle. Erläuterungen zur Legende: (1) Undrainierte Steifigkeit wird gemäss ENSI 33/461 zutreffend ermittelt; (FL 50 %) Ermittlung als Sekantenmodul aus Erstbelastung bei 50 % der maximalen deviatorischen Spannung; (UR) Ermittlung als Tangentenmodul aus Ent-/Wiederbelastung. Quelle: ENSI 33/531.....68
- Abbildung 6:** Übersicht über die mineralogische Variabilität der von der Nagra vorgeschlagenen Wirtgesteine Opalinuston (violett), 'Brauner Dogger' (braun), Effinger Schichten (blau) und Mergel-Formationen des Helvetikums (grau, Fig. 2.2-7 aus NTB 14-02-VI).....87
- Abbildung 7:** Geologische Konzeptprofile und Konzeptprofile für die provisorischen Sicherheitsanalysen (SA) und den sicherheitstechnischen Vergleich für die Standortgebiete in der Nordschweiz (Fig. 4.3-7 aus NTB 14-02-VI).....105
- Abbildung 8:** Geologisches Konzeptbild für den einschlusswirksamen Gebirgsbereich im Standortgebiet Weltenberg (Fig. 4.3-8 aus NTB 14-02-VI).....106
- Abbildung 9:** Geologische Konzeptbilder der Gesteinsprofile für die Standortgebiete in der Nordschweiz mit den die Barrierenwirkung potenziell beeinflussenden «harten Bänken». LK: Lagerkammer. Die Bedeutung der vertikalen Doppelpfeile ist im Text erklärt (Fig. 4.2-1 aus NTB 14-03).....110
- Abbildung 10:** Verhältnis der oberen Eckwerte der effektiven Diffusionskoeffizienten von ENSI zu Nagra für Kationen und Anionen (T: Temperaturkorrektur, Dw: Ungewissheit des molekularen Diffusionskoeffizienten, AnionenPoros: Korrektur der Anionen-zugänglichen Porosität).....117
- Abbildung 11:** Referenzfall- und Alternativfall-Berechnung des ENSI zum relativen Druck für die Wirtgesteine 'Brauner Dogger' (BD, Tiefe: 649m) und Opalinuston (OPA, Tiefe: 700m) im Standortgebiet Nördlich Lägern als Funktion der Zeit.....126

<i>Abbildung 12:</i> Kriterien zur Standortevaluation hinsichtlich Sicherheit und technischer Machbarkeit gemäss BFE (2011b).....	129
<i>Abbildung 13:</i> Vergleichende Darstellung des methodischen Vorgehens der Nagra und des ENSI zur Bestimmung der weiter zu untersuchenden Standortgebiete in Etappe 3 SGT inkl. der Referenzen zu den relevanten Kapitel in den Gesuchs- und Gutachtenunterlagen.....	131
<i>Abbildung 14:</i> Seismische Interpretation von Störungszonen und einzelnen Störungselementen (NAB 14-34) mit der daraus resultierenden Abgrenzung regionaler tektonischer Elemente. Zur Nachvollziehbarkeit der Abgrenzung von regionalen Störungszonen sind die Störungen auf dem Niveau der verschiedenen seismischen Markerhorizonte dargestellt (blau: Basis Tertiär, grün: Basis Malm, orange: Near Top Opalinuston; violett: Top Lias, gelb: Top Muschelkalk, rot: Basis Mesozoikum) (NAB 17-01, Frage 35).....	150
<i>Abbildung 15:</i> Vergleich der massgebenden SMA-Lagerperimeter der Nagra (grün schraffiert) mit denjenigen des ENSI (gelb) in den geologischen Standortgebieten der Nordschweiz: a) Südranden (Opalinuston), b) Jura Ost (Opalinuston), c) Zürich Nordost (Opalinuston), d) Zürich Nordost ('Brauner Dogger'), e) Nördlich Lägern (Opalinuston), f) Nördlich Lägern ('Brauner Dogger'), g) Jura-Südfuss (Opalinuston) und h) Jura-Südfuss (Effinger Schichten).....	158
<i>Abbildung 16:</i> Vergleich der massgebenden SMA-Lagerperimeter der Nagra (SMA-WLB-mLE-r, grün schraffiert) mit denjenigen des ENSI (gelb) im geologischen Standortgebiet Wellenberg auf den drei Lagerebenen 540 (a), 400 (b) und 200 m ü. M. (c). Die vom ENSI als massgebend betrachtenden Lagerperimeter basieren auf dem Fall SMA-WLB-mLE-re200 und sind flächenmässig deckungsgleich mit denjenigen der Nagra.....	159
<i>Abbildung 17:</i> Vergleich der massgebenden HAA-Lagerperimeter der Nagra (rot schraffiert) mit denjenigen des ENSI (gelb) in den geologischen Standortgebieten: a) Zürich Nordost, b) Nördlich Lägern und c) Jura Ost.....	159
<i>Abbildung 18:</i> Ermittlung des in der Vergleichsmethode verwendeten charakteristischen Dosisintervalls für ein Tiefenlagerstandortgebiet: Der zeitliche Verlauf der berechneten Dosen wird für den Referenzfall (grün) und für die mit dem Parametervariationsverfahren definierten Fälle (rot) berechnet. Die jeweiligen Dosismaxima sind eingezeichnet (gefüllte Kreise), sie legen das Dosisintervall (blau) fest. Anmerkung: Die eingezeichneten Dosiskurven sind hypothetische Beispiele (ENSI 33/075).....	161
<i>Abbildung 19:</i> Vergleich der von Nagra (gestrichelte Linien) und ENSI (durchgezogene Linien) berechneten Dosiskurven für die dosisdominierenden Radionuklide für (a) den RF, (b) den mFE, (c) den ENSI-Fall b und (d) den vom ENSI zusätzlich betrachteten ENSI-Fall b* (zum Vergleich sind die Ergebnisse der Nagra für den ENSI-Fall b dargestellt) für ein SMA-Lager im Standortgebiet Südranden mit dem Wirtgestein Opalinuston. Der grau gefärbte Bereich markiert die Zeit jenseits des Betrachtungszeitraums.....	163
<i>Abbildung 20:</i> Vergleich der von Nagra (gestrichelte Linien) und ENSI (durchgezogene Linien) berechneten Dosiskurven für die dosisdominierenden Radionuklide für (a) den RF, (b) den mFE, (c) den ENSI-Fall b und (d) den vom ENSI zusätzlich betrachteten ENSI-Fall b* (zum Vergleich sind die Ergebnisse der Nagra für den ENSI-Fall b dargestellt) für ein SMA Lager im Standortgebiet Zürich Nordost mit dem Wirtgestein 'Brauner Dogger'. Der grau gefärbte Bereich markiert die Zeit jenseits des Betrachtungszeitraums.....	164
<i>Abbildung 21:</i> Vergleich der von Nagra (gestrichelte Linien) und ENSI (durchgezogene Linien) berechneten Dosiskurven für die dosisdominierenden Radionuklide für (a) den RF, (b) den mFE, (c) den ENSI-Fall b und (d) den vom ENSI zusätzlich betrachteten ENSI-Fall b* (zum Vergleich sind die Ergebnisse der Nagra für den ENSI-Fall b dargestellt) für ein SMA Lager im Standortgebiet Zürich Nordost mit dem Wirtgestein Opalinuston. Der grau gefärbte Bereich markiert die Zeit jenseits des Betrachtungszeitraums.....	166

Abbildung 22: Vergleich der von Nagra (gestrichelte Linien) und ENSI (durchgezogene Linien) berechneten Dosiskurven für die dosisdominierenden Radionuklide für (a) den RF, (b) den mFE, (c) den ENSI-Fall b und (d) den vom ENSI zusätzlich betrachteten ENSI-Fall b* (zum Vergleich sind die Ergebnisse der Nagra für den ENSI-Fall b dargestellt) für ein SMA Lager im Standortgebiet Nördlich Lägern mit dem Wirtgestein 'Brauner Dogger'. Der grau gefärbte Bereich markiert die Zeit jenseits des Betrachtungszeitraums.....167

Abbildung 23: Vergleich der von Nagra (gestrichelte Linien) und ENSI (durchgezogene Linien) berechneten Dosiskurven für die dosisdominierenden Radionuklide für (a) den RF, (b) den mFE, (c) den ENSI-Fall b und (d) den vom ENSI zusätzlich betrachteten ENSI-Fall b* (zum Vergleich sind die Ergebnisse der Nagra für den ENSI-Fall b dargestellt) für ein SMA Lager im Standortgebiet Nördlich Lägern mit dem Wirtgestein Opalinuston. Der grau gefärbte Bereich markiert die Zeit jenseits des Betrachtungszeitraums.....169

Abbildung 24: Vergleich der von Nagra (gestrichelte Linien) und ENSI (durchgezogene Linien) berechneten Dosiskurven für die dosisdominierenden Radionuklide für (a) den RF, (b) den mFE, (c) den ENSI-Fall b und (d) den vom ENSI zusätzlich betrachteten ENSI-Fall b* (zum Vergleich sind die Ergebnisse der Nagra für den ENSI-Fall b dargestellt) für ein SMA Lager im Standortgebiet Jura Ost mit dem Wirtgestein Opalinuston. Der grau gefärbte Bereich markiert die Zeit jenseits des Betrachtungszeitraums.....170

Abbildung 25: Vergleich der von Nagra (gestrichelte Linien) und ENSI (durchgezogene Linien) berechneten Dosiskurven für die dosisdominierenden Radionuklide für (a) den RF, (b) den mFE, (c) den ENSI-Fall b und (d) den vom ENSI zusätzlich betrachteten ENSI-Fall b* (zum Vergleich sind die Ergebnisse der Nagra für den ENSI-Fall b dargestellt) für ein SMA-Lager im Standortgebiet Jura-Südfuss mit dem Wirtgestein Opalinuston. Der grau gefärbte Bereich markiert die Zeit jenseits des Betrachtungszeitraums.....171

Abbildung 26: Vergleich der von Nagra (gestrichelte Linien) und ENSI (durchgezogene Linien) berechneten Dosiskurven für die dosisdominierenden Radionuklide für (a) den RF, (b) den mFE, (c) den ENSI-Fall b und (d) den vom ENSI zusätzlich betrachteten ENSI-Fall b** (zum Vergleich sind die Ergebnisse der Nagra für den ENSI-Fall b dargestellt) für ein SMA-Lager im Standortgebiet Jura-Südfuss mit dem Wirtgestein Effinger Schichten. Der grau gefärbte Bereich markiert die Zeit jenseits des Betrachtungszeitraums.....173

Abbildung 27: Vergleich der von Nagra (gestrichelte Linien) und ENSI (durchgezogene Linien) berechneten Dosiskurven für die dosisdominierenden Radionuklide für (a) den RF, (b) den mFE, (c) den ENSI-Fall b, (d) den vom ENSI zusätzlich betrachteten ENSI-Fall b* (zum Vergleich sind die Ergebnisse der Nagra für den ENSI-Fall b dargestellt), (e) den ENSI-Fall a und (f) den ENSI-Fall a* (zum Vergleich sind die Ergebnisse der Nagra für den ENSI-Fall a dargestellt) für ein SMA-Lager im Standortgebiet Wellenberg mit dem Wirtgestein Mergel-Formationen des Helvetikums. Der grau gefärbte Bereich markiert die Zeit jenseits des Betrachtungszeitraums.....175

Abbildung 28: Vergleich der von Nagra (gestrichelte Linien) und ENSI (durchgezogene Linien) berechneten Dosiskurven für die dosisdominierenden Radionuklide für (a) den RF, (b) den mFE, (c) den ENSI-Fall b, (d) den vom ENSI zusätzlich betrachteten ENSI-Fall b* (zum Vergleich sind die Ergebnisse der Nagra für den ENSI-Fall b dargestellt) sowie (e) den ENSI-Fall e1 für ein HAA-Lager im Standortgebiet Zürich Nordost mit dem Wirtgestein Opalinuston. Der grau gefärbte Bereich markiert die Zeit jenseits des Betrachtungszeitraums.....177

Abbildung 29: Vergleich der von Nagra (gestrichelte Linien) und ENSI (durchgezogene Linien) berechneten Dosiskurven für die dosisdominierenden Radionuklide für (a) den RF, (b) den mFE, (c) den ENSI-Fall b, (d) den vom ENSI zusätzlich betrachteten ENSI-Fall b* (zum Vergleich sind die Ergebnisse der Nagra für den ENSI-Fall b dargestellt) sowie (e) für den ENSI-Fall e1 für ein HAA-Lager im Standortgebiet Nördlich Lägern mit dem Wirtgestein Opalinuston. Der grau gefärbte Bereich markiert die Zeit jenseits des Betrachtungszeitraums..179

Abbildung 30: Vergleich der von Nagra (gestrichelte Linien) und ENSI (durchgezogene Linien) berechneten Dosiskurven für die dosisdominierenden Radionuklide für (a) den RF, (b) den mFE, (c) den ENSI-Fall b, (d) den vom ENSI zusätzlich betrachteten ENSI-Fall b* (zum Vergleich sind die Ergebnisse der Nagra für den ENSI-Fall b dargestellt) und (e) den ENSI-Fall e1 für ein HAA-Lager im Standortgebiet Jura Ost mit dem Wirtgestein Opalinuston. Der grau gefärbte Bereich markiert die Zeit jenseits des Betrachtungszeitraums.....181

Abbildung 31: Vergleich der charakteristischen Dosisintervalle des ENSI und der Nagra im jeweiligen Betrachtungszeitraum für die SMA- und HAA Lagerperimeter (Durchsch.Dosis: Durchschnittliche jährliche Strahlendosen der Schweizer Bevölkerung).....182

Abbildung 32: Tiefenlage der Oberkante Opalinuston (= Top Lias plus 100 m) unter Oberkante Fels im Standortgebiet Zürich Nordost. Die verschärften Anforderungen des Indikators 4 verlangen für ein HAA-Lager, dass die Oberkante Wirtgestein im Bereich von glazial übertieften Felsrinnen mindestens oder gleich 500 m unter Fels liegt (schwarze Linie), was im massgebenden Lagerperimeter der Nagra (HAA-ZNO-mLE-r, rot schraffiert) unterhalb der Rheinau- und der Rudolfingen-Rinne nicht überall erfüllt ist. Der auf Rückfrage des ENSI (NAB 17-01, Frage 81) abgegrenzte, alternative Lagerperimeter HAA-ZNO-aL506-r (gelb schraffiert) erfüllt hingegen die VA des Indikators 4. Die Daten stammen aus NAB 16-41, NAB 17-01, NTB 14-01, NTB 14-02-I, NTB 14-02-III.....227

Tabellenverzeichnis

<i>Table 1:</i> Gesamte konditionierte und in Endlagerbehälter verpackte (in Klammern) Abfallvolumina in m ³ für das MIRAM 14 Basisszenarium (NTB 14-04, Tabelle 6).....	36
<i>Table 2:</i> Minimale und maximale Temperaturen für die jeweiligen Grenzflächen der Wirtgesteine (NAB 12-55, Tabelle 1). Die angegebenen Werte sind, unter Berücksichtigung von maximalen bzw. minimalen Anforderungen, auf 5 °C gerundet.....	113
<i>Table 3:</i> Standortspezifisch abgeschätzte Referenzwerte und obere Eckwerte der Temperatur des ENSI bezogen auf die Mitte der geologischen Schicht (TL: Toniger Lias, OPA: Opalinuston, BD: ‚Brauner Dogger‘, EFF: Effinger Schichten, MGL: Mergel-Formationen des Helvetikums).....	114
<i>Table 4:</i> Vorgeschlagene Korrosionsraten von der Nagra für Metalle in einem SMA- und LMA-Lager (Zementnahfeld, pH≥10.5) und einem HAA-Lager (Bentonitnahfeld, pH<10.5) unter anaeroben Lagerbedingungen (NAB 14-21 und NAB 15-17 Rev 1).....	121
<i>Table 5:</i> Liste der für die Abgrenzung der optimierten untertägigen Lagerperimeter in Teilschritt 2 verwendeten flächenwirksamen Indikatoren in Etappe 2 SGT (NTB 14-01, Tabelle 2.3-5) sowie deren Beurteilung durch das ENSI hinsichtlich der Erfüllung der MA und VA (Abkürzungen siehe Glossar).....	141
<i>Table 6:</i> Bewertungen der Nagra (N) und des ENSI (E) zum Kriterium 1.1 «Räumliche Ausdehnung» sowie der dazugehörigen Indikatoren. Die Bewertung der Kriterien setzt sich, wie im Kapitel 4 erläutert, aus den arithmetisch gemittelten Bewertungen der Indikatoren zusammen. *Der Bewertung des ENSI liegt im Unterschied zur Nagra der alternative Lagerperimeter HAA-ZNO-aL506-r zugrunde.....	183
<i>Table 7:</i> Bewertungen der Nagra (N) und des ENSI (E) zum Kriterium 1.2 «Hydraulische Barrierenwirkung» sowie der dazugehörigen Indikatoren. Die Bewertung der Kriterien setzt sich, wie im Kapitel 4 erläutert, aus den arithmetisch gemittelten Bewertungen der Indikatoren zusammen. *Der Bewertung des ENSI liegt im Unterschied zur Nagra der alternative Lagerperimeter HAA-ZNO-aL506-r zugrunde.....	185
<i>Table 8:</i> Bewertungen der Nagra (N) und des ENSI (E) zum Kriterium 1.3 «Geochemische Bedingungen» sowie der dazugehörigen Indikatoren. Die Bewertung der Kriterien setzt sich, wie im Kapitel 4 erläutert, aus den arithmetisch gemittelten Bewertungen der Indikatoren zusammen. *Der Bewertung des ENSI liegt im Unterschied zur Nagra der alternative Lagerperimeter HAA-ZNO-aL506-r zugrunde.....	186
<i>Table 9:</i> Bewertungen der Nagra (N) und des ENSI (E) zum Kriterium 1.4 «Freisetzungspfade» sowie der dazugehörigen Indikatoren. Die Bewertung der Kriterien setzt sich, wie im Kapitel 4 erläutert, aus den arithmetisch gemittelten Bewertungen der Indikatoren zusammen. *Der Bewertung des ENSI liegt im Unterschied zur Nagra der alternative Lagerperimeter HAA-ZNO-aL506-r zugrunde.....	187
<i>Table 10:</i> Bewertungen der Nagra (N) und des ENSI (E) zum Kriterium 2.1 «Beständigkeit der Standort- und Gesteinseigenschaften» sowie der dazugehörigen Indikatoren. Die Bewertung der Kriterien setzt sich, wie im Kapitel 4 erläutert, aus den arithmetisch gemittelten Bewertungen der Indikatoren zusammen. *Der Bewertung des ENSI liegt im Unterschied zur Nagra der alternative Lagerperimeter HAA-ZNO-aL506-r zugrunde..	189
<i>Table 11:</i> Bewertungen der Nagra (N) und des ENSI (E) zum Kriterium 2.2 «Erosion» sowie der dazugehörigen Indikatoren. Die Bewertung der Kriterien setzt sich, wie im Kapitel 4 erläutert, aus den arithmetisch gemittelten Bewertungen der Indikatoren zusammen. *Der Bewertung des ENSI liegt im Unterschied zur Nagra der alternative Lagerperimeter HAA-ZNO-aL506-r zugrunde.....	190

<i>Tabelle 12:</i> Bewertungen der Nagra (N) und des ENSI (E) zum Kriterium 2.3 «Lagerbedingte Einflüsse» sowie der dazugehörigen Indikatoren. Die Bewertung der Kriterien setzt sich, wie im Kapitel 4 erläutert, aus den arithmetisch gemittelten Bewertungen der Indikatoren zusammen. *Der Bewertung des ENSI liegt im Unterschied zur Nagra der alternative Lagerperimeter HAA-ZNO-aL506-r zugrunde.....	191
<i>Tabelle 13:</i> Bewertungen der Nagra (N) und des ENSI (E) zum Kriterium 2.4 «Nutzungskonflikte» sowie der dazugehörigen Indikatoren. Die Bewertung der Kriterien setzt sich, wie im Kapitel 4 erläutert, aus den arithmetisch gemittelten Bewertungen der Indikatoren zusammen. *Der Bewertung des ENSI liegt im Unterschied zur Nagra der alternative Lagerperimeter HAA-ZNO-aL506-r zugrunde.....	193
<i>Tabelle 14:</i> Bewertungen der Nagra (N) und des ENSI (E) zum Kriterium 3.1 «Charakterisierbarkeit der Gesteine» sowie der dazugehörigen Indikatoren. Die Bewertung der Kriterien setzt sich, wie im Kapitel 4 erläutert, aus den arithmetisch gemittelten Bewertungen der Indikatoren zusammen. *Der Bewertung des ENSI liegt im Unterschied zur Nagra der alternative Lagerperimeter HAA-ZNO-aL506-r zugrunde.....	194
<i>Tabelle 15:</i> Bewertungen der Nagra (N) und des ENSI (E) zum Kriterium 3.2 «Explorierbarkeit der räumlichen Verhältnisse» sowie der dazugehörigen Indikatoren. Die Bewertung der Kriterien setzt sich, wie im Kapitel 4 erläutert, aus den arithmetisch gemittelten Bewertungen der Indikatoren zusammen. *Der Bewertung des ENSI liegt im Unterschied zur Nagra der alternative Lagerperimeter HAA-ZNO-aL506-r zugrunde.....	195
<i>Tabelle 16:</i> Bewertungen der Nagra (N) und des ENSI (E) zum Kriterium 3.3 «Prognostizierbarkeit der Langzeitveränderungen» sowie der dazugehörigen Indikatoren. Die Bewertung der Kriterien setzt sich, wie im Kapitel 4 erläutert, aus den arithmetisch gemittelten Bewertungen der Indikatoren zusammen. *Der Bewertung des ENSI liegt im Unterschied zur Nagra der alternative Lagerperimeter HAA-ZNO-aL506-r zugrunde.....	196
<i>Tabelle 17:</i> Bewertungen der Nagra (N) und des ENSI (E) zum Kriterium 4.1: «Felsmechanische Eigenschaften und Bedingungen» sowie der dazugehörigen Indikatoren. Die Bewertung der Kriterien setzt sich, wie im Kapitel 4 erläutert, aus den arithmetisch gemittelten Bewertungen der Indikatoren zusammen. *Der Bewertung des ENSI liegt im Unterschied zur Nagra der alternative Lagerperimeter HAA-ZNO-aL506-r zugrunde.....	197
<i>Tabelle 18:</i> Bewertungen der Nagra (N) und des ENSI (E) zum Kriterium 4.2: «Untertägige Erschliessung und Wasserhaltung» sowie der dazugehörigen Indikatoren. Die Bewertung der Kriterien setzt sich, wie im Kapitel 4 erläutert, aus den arithmetisch gemittelten Bewertungen der Indikatoren zusammen. *Der Bewertung des ENSI liegt im Unterschied zur Nagra der alternative Lagerperimeter HAA-ZNO-aL506-r zugrunde.....	199
<i>Tabelle 19:</i> Tabellarische Zusammenstellung der Bewertungen von Nagra (N) und ENSI (E) für die Kriteriengruppen und die dazugehörigen Kriterien sowie die Gesamtbewertung. *Der Bewertung des ENSI liegt im Unterschied zur Nagra der alternative Lagerperimeter HAA-ZNO-aL506-r zugrunde.....	201
<i>Tabelle 20:</i> Tabellarische Zusammenstellung der Bewertungen von Nagra (N) und ENSI (E) für das entscheidrelevante Merkmal (a) «Wirksamkeit der geologischen Barriere» und die dazugehörigen Indikatoren (in der von der Nagra verwendeten Reihenfolge). *Der Bewertung des ENSI liegt im Unterschied zur Nagra der alternative Lagerperimeter HAA-ZNO-aL506-r zugrunde.....	205
<i>Tabelle 21:</i> Tabellarische Zusammenstellung der Bewertungen von Nagra (N) und ENSI (E) für das entscheidrelevante Merkmal (b) «Langzeitstabilität der geologischen Barriere» und die dazugehörigen Indikatoren (in der von der Nagra verwendeten Reihenfolge). *Der Bewertung des ENSI liegt im Unterschied zur Nagra der alternative Lagerperimeter HAA-ZNO-aL506-r zugrunde.....	215
<i>Tabelle 22:</i> Tabellarische Zusammenstellung der Bewertungen von Nagra (N) und ENSI (E) für das entscheidrelevante Merkmal (c) «Explorier- und Charakterisierbarkeit der geologischen Barriere im Standortgebiet» und die dazugehörigen Indikatoren. *Der Bewertung des ENSI liegt im Unterschied zur Nagra der alternative Lagerperimeter HAA-ZNO-aL506-r zugrunde.....	230

Tabelle 23: Tabellarische Zusammenstellung der Bewertungen von Nagra (N) und ENSI (E) für das entscheidrelevante Merkmal (d) «Bautechnische Machbarkeit eines Tiefenlagers unter Berücksichtigung der vorgeschlagenen Standortareale» und die dazugehörigen Indikatoren. *Der Bewertung des ENSI liegt im Unterschied zur Nagra der alternative Lagerperimeter HAA-ZNO-aL506-r zugrunde..... 233

Tabelle 24: Darstellung der Bewertung der Nagra und des ENSI für die entscheidrelevanten Indikatoren einschliesslich der Kennzeichnung der durch die Nagra bzw. durch das ENSI identifizierten eindeutigen Nachteile für alle SMA- und HAA-Lagerperimeter. *Der Bewertung des ENSI liegt im Unterschied zur Nagra der alternative Lagerperimeter HAA-ZNO-aL506-r zugrunde. Die Nagra hat ebenfalls den Lagerperimeter HAA-ZNO-aL506-r bewertet und für den Indikator 1 mit bedingt günstig eine andere Bewertung vorgenommen (NAB 17-01, Frage 81).....245



1 Einleitung

Der Sachplan geologische Tiefenlager (SGT) ist das schweizerische Auswahlverfahren zur Festlegung von Standortgebieten für die geologische Tiefenlagerung der radioaktiven Abfälle. Das schrittweise Verfahren umfasst drei Etappen und wurde 2008 in einem Konzeptteil festgelegt. Etappe 1 SGT dauerte von 2008 bis 2011. Die Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (Nagra) schlug in Etappe 1 SGT sechs Standortgebiete vor (Abbildung 1): die Standortgebiete Südranden, Zürich Nordost, Nördlich Lägern, Jura Ost, Jura-Südfuss und Wellenberg für schwach- und mittelaktive Abfälle (SMA), sowie die Standortgebiete Zürich Nordost, Nördlich Lägern und Jura Ost für hochaktive Abfälle (HAA). Das ENSI hat dem Vorschlag der Nagra in seinem Gutachten zu Etappe 1 SGT (ENSI 33/070) zugestimmt. Am 1. Dezember 2011 hat der Bundesrat diesen Vorschlag der Nagra gutgeheissen. Diese Standortgebiete waren der Ausgangspunkt für Etappe 2 SGT.

Am 30. Januar 2015 hat das BFE den Vorschlag der Nagra von mindestens zwei Standortgebieten pro Lagertyp in Etappe 2 SGT veröffentlicht. Sowohl für SMA- als auch HAA-Lager sind die beiden Standortgebiete Zürich Nordost (Kanton Zürich) und Jura Ost (Kanton Aargau) in Etappe 3 SGT weiter zu untersuchen. Für die Nagra ist in diesen geologischen Standortgebieten der Opalinuston sowohl für das HAA-Lager als auch für das SMA-Lager das weiter zu verfolgende Wirtgestein.

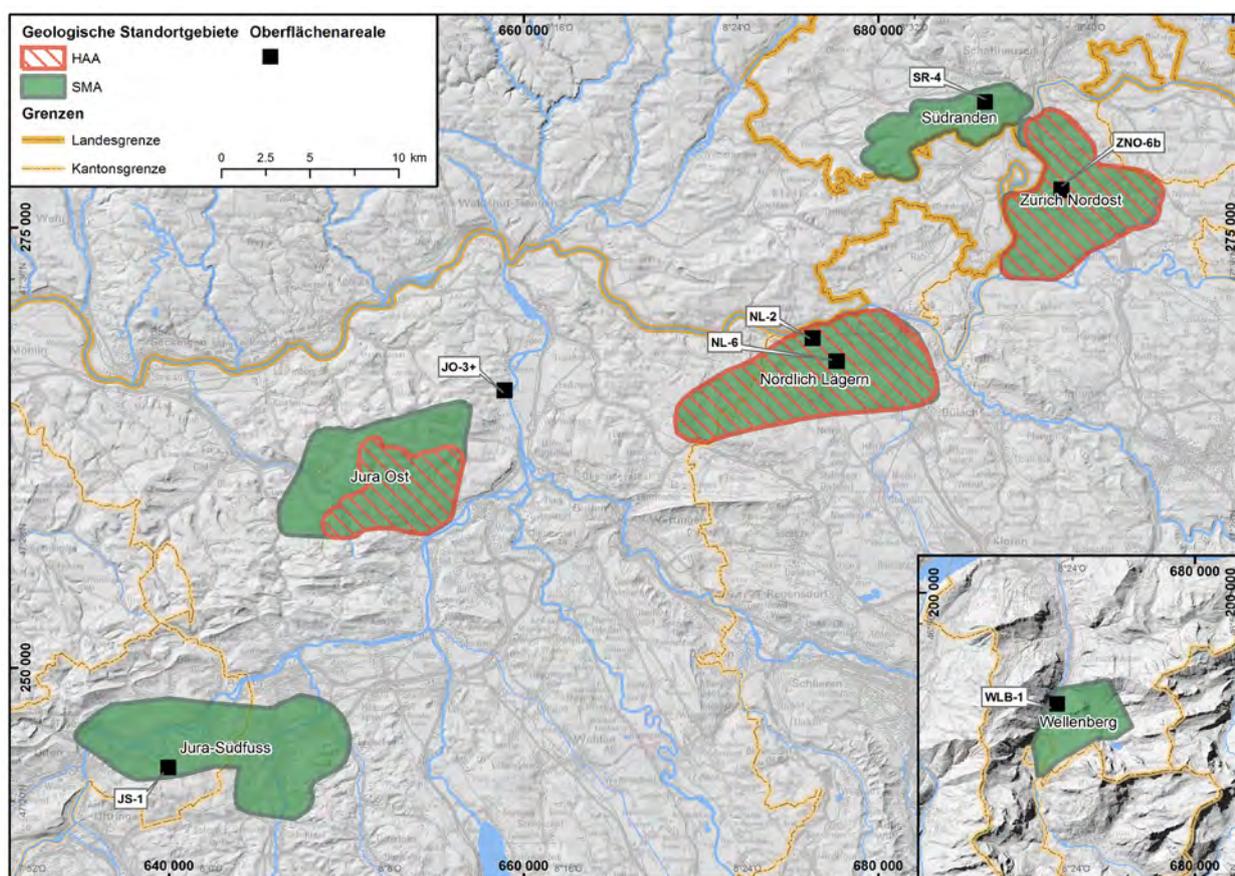


Abbildung 1: Übersicht über die sechs Standortgebiete aus Etappe 1 SGT. Die Standortgebiete Zürich Nordost und Jura Ost wurden von der Nagra als weiter zu untersuchende Standortgebiete sowohl für ein SMA- als auch ein HAA-Lager für die Etappe 3 SGT vorgeschlagen.

Die Nagra schlägt damit vor, die in Etappe 1 SGT aufgenommenen vier Standortgebiete für das SMA-Lager Nördlich Lägern, Südranden, Jura-Südfuss und Wellenberg und das Standortgebiet Nördlich Lägern für das HAA-Lager in Etappe 2 SGT zurückzustellen.

Im Rahmen des SGT trägt das Eidgenössische Nuklearsicherheitsinspektorat (ENSI) als zuständige Aufsichtsbehörde des Bundes die Gesamtverantwortung für die sicherheitstechnische Beurteilung der geologischen Standortgebiete bzw. Standorte. In dieser Rolle hat das ENSI den von der Nagra eingereichten Vorschlag geprüft und das vorliegende sicherheitstechnische Gutachten erstellt. Das ENSI prüfte darin insbesondere die verwendeten geologischen Grundlagen, die Resultate der quantitativen provisorischen Sicherheitsanalysen, die qualitative Beurteilung der 13 Kriterien zu Sicherheit und technischer Machbarkeit gemäss Konzeptteil SGT (BFE 2011b), sowie die Belastbarkeit der von der Nagra identifizierten eindeutigen Nachteile. Weiter prüfte das ENSI, ob das Auswahlverfahren der Nagra transparent und nachvollziehbar ist.

Der Vorschlag der Nagra von mindestens zwei Standortgebieten pro Lagertyp in Etappe 2 SGT wird in diesem Gutachten als «Einengungsvorschlag» bezeichnet; die von der Nagra angewandte Methodik für die Einengung der Standortgebiete in Etappe 2 SGT wird als «Einengungsmethodik» angegeben.

Kapitel 1 weist auf die gesetzlichen Grundlagen zur Entsorgung der radioaktiven Abfälle hin (Kapitel 1.1), gibt einen Überblick über die Vorgaben des SGT (Kapitel 1.2), beschreibt die Vorgaben bezüglich des sicherheitstechnischen Vergleichs für Etappe 2 SGT (Kapitel 1.3), legt die behördliche Überprüfung durch das ENSI dar (Kapitel 1.4), führt die von der Nagra eingereichten und vom ENSI überprüften und konsultierten Unterlagen auf (Kapitel 1.5) und gibt einen kurzen Überblick der Gliederung des vorliegenden Gutachtens (Kapitel 1.6).

1.1 Gesetzliche Grundlagen

Die Entsorgung der in der Schweiz anfallenden radioaktiven Abfälle wird durch das Kernenergiegesetz (KEG) vom 21. März 2003, die Kernenergieverordnung (KEV) vom 10. Dezember 2004, das Strahlenschutzgesetz (StSG) vom 22. März 1991 und die Strahlenschutzverordnung (StSV) vom 22. Juni 1994 umfassend geregelt.

Wer eine Kernanlage betreibt oder stilllegt, ist auf eigene Kosten zur sicheren Entsorgung der aus der Anlage stammenden radioaktiven Abfälle verpflichtet (Art. 31 KEG). Zur Entsorgungspflicht gehören auch die notwendigen Vorbereitungsarbeiten wie Forschung und erdwissenschaftliche Untersuchungen sowie die rechtzeitige Bereitstellung eines geologischen Tiefenlagers (Art. 31 KEG).

Nach Art. 5 KEV legt der Bund die Ziele und Vorgaben für die Lagerung der radioaktiven Abfälle in geologischen Tiefenlagern in einem Sachplan für die Behörden verbindlich fest. Im Konzeptteil SGT (BFE 2011b) wird insbesondere das Standortauswahlverfahren sowie das spätere Bewilligungsverfahren für ein geologisches Tiefenlager festgelegt.

1.2 Sachplan geologische Tiefenlager

Gemäss Konzeptteil SGT (BFE 2011b) mussten die Entsorgungspflichtigen die Notwendigkeit ergänzender Untersuchungen für Etappe 2 SGT frühzeitig mit dem ENSI abklären. Die Nagra kam diesem Auftrag mit dem technischen Bericht NTB 10-01 nach, in welchem sie im Jahr 2010 den bestehenden Kenntnisstand für jedes in Etappe 1 SGT vorgeschlagene geologische Standortgebiet darlegte. Darin schlug die Nagra ergänzende Untersuchungen zum Erreichen des für Etappe 2 SGT notwendigen Kenntnisstands vor. Zu diesem technischen Bericht hat das ENSI eine Stellungnahme verfasst (ENSI 33/115), in welcher es 41 zusätzliche sicherheitstechnische Forderungen an die Nagra gestellt hat. Die Arbeitsgruppe Sicherheit Kantone und Kantonale Expertengruppe Sicherheit (AG SiKa/KES), die Kommission Nukleare Entsorgung (KNE) und die KNS haben ebenfalls zum technischen Bericht NTB 10-01 Stellung genommen (AG SiKa und KES 2011; KNE 2011; KNS 2011). Das Vorgehen zur Überprüfung des Kenntnisstands und der Notwendigkeit von ergänzenden Untersuchungen wurde in ENSI 33/155 festgelegt. Anlässlich von elf Fachsitzungen zur Behandlung der 41 sicherheitstechnischen Forderungen beurteilte das ENSI den durch die Nagra erreichten Kenntnisstand im Hinblick auf den Einengungsvorschlag. 10 der 41 Forderungen wurden im Rahmen der Fachsitzungen als vollständig erfüllt beurteilt. Der Kenntnisstand zu den ausstehenden Forderungen wurde für Etappe 2 SGT als genügend beurteilt; die Umsetzung der Forderungen konnte jedoch erst im Rahmen der Detailprüfung zur Etappe 2 SGT abschliessend beurteilt werden. Im Rahmen der Überprüfung des Einengungsvorschlags der Nagra beurteilt das ENSI alle Forderungen als erfüllt.

Damit ist der geologische Kenntnisstand ausreichend für die provisorischen Sicherheitsanalysen und den sicherheitstechnischen Vergleich in Etappe 2 SGT.

Das Ziel von Etappe 2 SGT ist die Einengung der Anzahl der Standortgebiete für beide Lagertypen. Laut Konzeptteil SGT (BFE 2011b) ist dabei nach folgender Vorgehensweise zu verfahren:

- 1) Bezeichnung von Standortarealen für die Oberflächenanlage in den ausgewählten Standortgebieten: Die Bezeichnung durch die Nagra ist das Resultat der Zusammenarbeit mit den Standortregionen, das ENSI war daran nicht beteiligt.
- 2) Vergleichende Bewertung und Vorschlag von mindestens zwei Standortgebieten: Für die in Etappe 1 SGT bezeichneten Standortgebiete hat die Nagra quantitative provisorische Sicherheitsanalysen, eine qualitative Beurteilung der 13 Kriterien zu Sicherheit und technischer Machbarkeit und einen sicherheitstechnischen Vergleich durchzuführen. Für das HAA- und das SMA-Lager sind jeweils mindestens zwei Standortgebiete vorzuschlagen.

Das ENSI hat analog zu Etappe 1 SGT den Auftrag, den Einengungsvorschlag hinsichtlich Sicherheit und bautechnischer Machbarkeit zu prüfen und ein Gutachten zum Resultat der Prüfung zu veröffentlichen. Dieses dient dem Bundesrat als Grundlage für seinen Entscheid zur Etappe 2 SGT. Neben dem Einengungsvorschlag erarbeitet die Nagra auch ein Explorationskonzept für die in Etappe 3 SGT weiter zu untersuchende Standortgebiete, welches Bestandteil der einzureichenden Unterlagen zu Etappe 2 SGT ist. Das ENSI prüft dieses Explorationskonzept und hält das Resultat im Gutachten fest.

1.3 Vorgaben bezüglich des Einengungsvorschlags für Etappe 2 SGT

Der Auftrag zur behördlichen Überprüfung des Vorschlags der Nagra für geologische Standortgebiete für das SMA- und das HAA-Lager ist im Konzeptteil SGT (BFE 2011b) festgehalten. Das ENSI prüft und beurteilt die Vorschläge der Nagra aus Sicht der Sicherheit und der technischen Machbarkeit, sowie auf Transparenz, Nachvollziehbarkeit und Robustheit des Auswahlverfahrens und hält dies in seinem Gutachten fest. Die Kommission für nukleare Sicherheit (KNS) verfasst eine Stellungnahme zum entsprechenden Gutachten des ENSI.

Für die Überprüfung des durch die Nagra erarbeiteten Einengungsvorschlags ist im Konzeptteil SGT (BFE 2011b) festgelegt, dass das ENSI die Resultate der provisorischen Sicherheitsanalysen anhand der Sicherheitsanforderungen des Konzeptteils SGT (BFE 2011b) und der Richtlinie ENSI-G03 bewertet. Ferner stützt sich das ENSI auf die im Auswahlverfahren anzuwendenden sicherheitstechnischen Kriterien und Vorgaben für den Einengungsvorschlag Etappe 2 SGT, die in der Kernenergiegesetzgebung (KEG 2003; KEV 2004) und in verschiedenen Aktennotizen des ENSI festgelegt sind (HSK 33/001; ENSI 33/075; ENSI 33/115; ENSI 33/170; ENSI 33/154).

Für den Einengungsvorschlag wurde ein sicherheitstechnischer Vergleich aller Standortgebiete verlangt. Ein Standortgebiet wird in Etappe 2 SGT zurückgestellt, wenn (ENSI 33/154):

- es bei den quantitativen Dosisberechnungen das Dosis-Schutzkriterium von 0.1 mSv/Jahr zu einem Zeitpunkt des gesamten Betrachtungszeitraums überschreitet,
- es aufgrund der Dosisberechnung nicht gleichwertig im Vergleich mit den anderen Standortgebieten ist,
- es in der Gesamtbewertung schlechter als «geeignet» ist.

Ein Standortgebiet kann zurückgestellt werden, wenn es einen oder mehrere belastbare eindeutige Nachteile im Vergleich mit den anderen Standortgebieten aufweist.

Die sicherheitstechnische Überprüfung, die Beurteilung der vorgeschlagenen geologischen Standortgebiete und die Prüfung der bautechnischen Machbarkeit der geologischen Tiefenlager durch das ENSI stützen sich auf die im Konzeptteil SGT (BFE 2011b) für die Etappe 2 SGT aufgeführten Fragen:

- Haben die Entsorgungspflichtigen die 13 Kriterien hinsichtlich Sicherheit und technischer Machbarkeit bei der Erarbeitung der Vorschläge adäquat und stufengerecht berücksichtigt?
- Ist das Vorgehen der Entsorgungspflichtigen bei der Erarbeitung der Vorschläge transparent und nachvollziehbar?

- Haben die Entsorgungspflichtigen alle verfügbaren relevanten geologischen Informationen berücksichtigt und sind diese ausreichend für die Zwecke einer provisorischen Sicherheitsanalyse im Hinblick auf das Zwischenergebnis?
- Können die Behörden die Resultate der provisorischen Sicherheitsanalysen nachvollziehen?
- Können die Behörden die Resultate der Abwägungen aufgrund der qualitativen Sicherheitskriterien nachvollziehen und dem Resultat der gesamtheitlichen Bewertung zustimmen?
- Können die Behörden den Standortvorschlägen aus der Sicht von Sicherheit und Machbarkeit zustimmen?

1.4 Behördliche Überprüfung

Das ENSI hat für Etappe 2 SGT eine Grobprüfung der Unterlagen der Nagra zum Einengungsvorschlag vorgenommen, bevor diese beim BFE eingereicht wurden. Die Grobprüfung ist eine formelle, nicht inhaltliche Prüfung auf Vollständigkeit, Detaillierungsgrad und Konsistenz der eingereichten Unterlagen. Die Grobprüfung begann am 1. September 2014 und wurde aufgrund der Berichtentwürfe der Nagra vorgenommen, welche die Nagra dem ENSI Ende August 2014 zugestellt hatte (NAB 14-50; NAB 14-87; NAB 14-72 wurden im Oktober 2014 nachgereicht). Das ENSI hat das Resultat der Grobprüfung per Brief vom 4. Dezember 2014 an die Nagra und das BFE mitgeteilt. Die Nagra hat anschliessend ihre Gesuchsunterlagen finalisiert und beim BFE eingereicht. Das BFE hat diese am 30. Januar 2015 veröffentlicht, worauf die Detailprüfung des ENSI begann. Einzelne Gesuchsunterlagen der Nagra wurden beim ENSI bis zum Sommer 2015 nachgereicht.

Für die Prüfarbeiten zur Etappe 2 SGT wurde das ENSI in geowissenschaftlichen und bautechnischen Fragen durch die Expertengruppe Geologische Tiefenlagerung (EGT), das Bundesamt für Landestopografie (swisstopo), eine Reihe Experten aus Universitäten, Hochschulen und privaten Ingenieur- und Geologiebüros bzw. Fachpersonen aus dem In- und Ausland unterstützt. Deren Arbeiten wurden im vorliegenden Gutachten berücksichtigt und zusätzlich als separate ENSI-Expertenberichte publiziert (eine vollständige Liste der Expertenberichte befindet sich in Anhang B). An der Überprüfung waren neben den Spezialisten des ENSI häufig externe Expertengruppen beteiligt, beispielsweise zum Thema Seismik oder Bautechnik.

Im Verlaufe der behördlichen Überprüfung haben das ENSI und seine Experten festgestellt, dass die von der Nagra eingereichten felsmechanischen Grundlagen sowie die getroffenen Annahmen und Argumente für die Beurteilung und Festlegung der maximalen bautechnischen Tiefe der Lagerebene nicht ausreichend waren. Insbesondere war die Bewertung des Indikators «Tiefenlage im Hinblick auf die bautechnische Machbarkeit» der Nagra nicht nachvollziehbar. Ferner hatte die Nagra die vom ENSI im Vorfeld der Etappe 2 SGT formulierten Anforderungen in ENSI 33/170 nicht ausreichend umgesetzt. Aufgrund dieser Beurteilung hat das ENSI im November 2015 eine Nachforderung an die Nagra gestellt, in welcher sie aufgefordert wurde, die fehlenden Analysen und Darstellungen nachzureichen (ENSI 33/460; ENSI 33/461; ENSI 33/476). Die Nagra kam dieser Aufforderung mit einem Haupt- sowie fünf Schlüsselberichten und sechs Referenzberichten nach, welche vom BFE im August 2016 veröffentlicht wurden. Das ENSI und seine Experten haben diese Unterlagen anschliessend geprüft (Kapitel 2.9) und die Prüfergebnisse in die vorliegende Gesamtbeurteilung einbezogen.

Die Detailprüfung der Unterlagen der Nagra umfasste:

- 1) Prüfung der eingereichten Unterlagen und der nachgereichten Referenzberichte im Hinblick auf die quantitative provisorische Sicherheitsanalyse, die 13 Kriterien zu Sicherheit und bautechnischen Machbarkeit sowie den sicherheitstechnischen Vergleich anhand eindeutiger Nachteile,
- 2) eigene ausgewählte Berechnungen zu den charakteristischen Dosisintervallen und zu sicherheitstechnischen Anforderungen,
- 3) die Prüfung der Robustheit der angewandten Einengungsmethodik der Nagra im Rahmen der Vorgaben des SGT und des ENSI.

Im Verlauf der Detailprüfung haben das ENSI und seine Experten spezifische Fragen an die Nagra gestellt. Diese Fragen und die Antworten der Nagra wurden an regelmässigen Fachsitzungen zwischen dem ENSI und der Nagra erörtert und sind in einem Arbeitsbericht dokumentiert (NAB 17-01).

Der vollständige Gutachtenentwurf des ENSI wurde vor der Veröffentlichung an die KNS für die Vorbereitung ihrer Stellungnahme, an das BFE zur formalen Prüfung des sachplankonformen Vorgehens und der Verständlichkeit und an die Nagra zur Prüfung der korrekten Zitierung ihrer Aussagen abgegeben.

1.5 Eingereichte Unterlagen der Nagra zur Etappe 2 SGT

Der von der Nagra eingereichte Einengungsvorschlag ist in folgendem Hauptbericht begründet und dokumentiert:

NTB 14-01	SGT Etappe 2: Vorschlag weiter zu untersuchender geologischer Standortgebiete mit zugehörigen Standortarealen für die Oberflächenanlage: Sicherheitstechnischer Bericht zu SGT-Etappe 2: Sicherheitstechnischer Vergleich und Vorschlag der in Etappe 3 SGT weiter zu untersuchenden geologischen Standortgebiete
-----------	-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Nach Angaben der Nagra wurden für die Evaluation und Beurteilung der Standortmöglichkeiten alle verfügbaren, für die geologische Tiefenlagerung relevanten, geologischen Informationen verwendet. Der erarbeitete technisch-wissenschaftliche Kenntnisstand soll es erlauben, geologische Standortgebiete für die anschliessende Etappe 3 SGT fundiert vorzuschlagen.

Weitere Schlüsselberichte wurden von der Nagra eingereicht, die Grundlagen für den Einengungsvorschlag bilden:

NTB 14-02	SGT Etappe 2: Vorschlag weiter zu untersuchender geologischer Standortgebiete mit zugehörigen Standortarealen für die Oberflächenanlage: Geologische Grundlagen:
NTB 14-02-I	Dossier I: Einleitung und Zusammenfassung
NTB 14-02-II	Dossier II: Sedimentologische und Tektonische Verhältnisse
NTB 14-02-III	Dossier III: Geologische Langzeitentwicklung
NTB 14-02-IV	Dossier IV: Geomechanische Unterlagen
NTB 14-02-V	Dossier V: Hydrogeologische Verhältnisse
NTB 14-02-VI	Dossier VI: Barriereneigenschaften der Wirt- und Rahmengesteine
NTB 14-02-VII	Dossier VII: Nutzungskonflikte
NTB 14-02-VIII	Dossier VIII: Charakterisierbarkeit und Explorierbarkeit
NTB 14-03	SGT Etappe 2: Vorschlag weiter zu untersuchender geologischer Standortgebiete mit zugehörigen Standortarealen für die Oberflächenanlage: Charakteristische Dosisintervalle und Unterlagen zur Bewertung der Barriersysteme
NTB 14-04	Modellhaftes Inventar für radioaktive Materialien MIRAM 14

Diese Berichte stützen sich bei Detailbetrachtungen auf knapp 200 Referenzberichte ab, die von der Nagra ebenfalls eingereicht und vom ENSI zur Überprüfung konsultiert wurden.

1.6 Gliederung des Gutachtens

Das vorliegende Gutachten enthält das Ergebnis der sicherheitstechnischen Überprüfung durch das ENSI. Eigene Berechnungen und detaillierte technische und wissenschaftliche Überlegungen, die zum Ergebnis der Überprüfung geführt haben, sind in separaten ENSI-Aktennotizen festgehalten. Das Gutachten weist folgende Struktur auf:

In Kapitel 2 werden zunächst die Grundlagen für die sicherheitstechnische Beurteilung und die Einengung der Standortgebiete dargelegt und bewertet.

In Kapitel 3 werden die Charakterisierung und Konzeptualisierung der Wirt- und Rahmengesteine geprüft und beurteilt. Dies erfordert eine Bewertung der verschiedenen Eigenschaften der Wirt- und Rahmengesteine sowie eine Darlegung der Grundlagen und Modellkonzepte für die Radionuklidenausbreitung.

In Kapitel 4 wird die Einengungsmethodik der Nagra erläutert und vom ENSI beurteilt.

In Kapitel 5 erfolgen die Beurteilung und Bewertung der Abgrenzung der optimierten untertägigen Lagerperimeter aller Standortgebiete und der darin vorkommenden Wirtgesteine. Dieser Auswahlprozess beinhaltet neben der Überprüfung des Abgrenzungsprozesses der optimierten untertägigen Lagerperimeter die Bewertung der Wirtgesteinsoptionen in den Standortgebieten anhand quantitativer Dosisberechnungen und der 13 sicherheitstechnischen Kriterien.

In Kapitel 6 erfolgen die Beurteilung des sicherheitstechnischen Vergleichs und der vergleichenden Gesamtbewertung anhand eindeutiger Nachteile.

In Kapitel 7 wird die Platzierung der Oberflächenanlagen in den Standortgebieten Zürich Nordost, Jura Ost und Nördlich Lägern bewertet.

In Kapitel 8 werden die Standortuntersuchungskonzepte für Etappe 3 SGT beurteilt.

2 Beurteilung wichtiger Grundlagen für die Einengung der Wirtgesteine und Standortgebiete

2.1 Inventar und Abfallzuteilung

2.1.1 Beurteilung des MIRAM 14

Das «Modellhafte Inventar für radioaktive Materialien» (MIRAM) der Nagra erfasst sämtliche radioaktiven Abfälle der Schweiz und bildet in der aktuellen Version MIRAM 14 (NTB 14-04) eine Basis für die Projektierung und die Langzeit-Sicherheitsanalysen der geologischen Tiefenlager. Im Rahmen der Begutachtung des Einengungsvorschlags der Nagra hat das ENSI das MIRAM 14 (Basisszenarium) geprüft (ENSI 33/468). Im Fokus der Prüfung standen insbesondere das Material- und Aktivitätsinventar der verschiedenen Abfallsorten, das Abfallvolumen basierend auf dem neuen Verpackungskonzept, die Abfallzuteilung zu den jeweiligen Lagern für schwach- und mittelaktive Abfälle (SMA) und für langlebige SMA (LMA), die Einteilung der Abfälle in zwei Abfallgruppen sowie die Datengrundlage für die Abschätzung der durch anaerobe Metallkorrosion gebildeten Gasmenge im geologischen Tiefenlager.

Basisszenarium

Angaben der Nagra

Das Inventar des Basisszenariums im MIRAM 14 (NTB 14-04) weist nur geringe Unterschiede zum Inventar des Referenzszenarios «50 Jahre KKW-Betrieb» in der für Etappe 1 SGT verwendeten Version MIRAM 08 auf. Die Unterschiede werden unter anderem auf folgende Änderungen in den Rahmenbedingungen zurückgeführt (NTB 14-03, NTB 14-04):

- Verlängerung der Laufzeit der KKW Gösgen, Leibstadt und Beznau auf 60 Jahre (Laufzeit des KKW Mühleberg ist auf 47 Jahre festgelegt),
- Verlängerung der Sammelperiode für die Abfälle aus Medizin, Industrie und Forschung (MIF) bis 2065 aufgrund der angepassten Zeitpläne für die Realisierung des Tiefenlagers,
- Anpassung des «Referenzjahrs» für die Deklaration der Kenndaten und Inventare im MIRAM 14 Basisszenarium auf das Jahr 2075, in dem die letzten Abfälle eingelagert werden. Damit wird sichergestellt, dass das gesamte bis dahin angefallene Materialinventar und entstandene Nuklidinventar in den Dosisberechnungen berücksichtigt wird,
- Zwischenzeitlich erfolgte Substitution von bituminierten Wiederaufarbeitungsabfällen durch verglaste Schlämme aus der Wiederaufarbeitung,
- Berücksichtigung der voraussichtlichen Anpassung der radionuklidspezifischen Freigrenzen für radioaktive Abfälle in der Strahlenschutzverordnung gemäss IAEA-Empfehlung (IAEA 2004),
- Wegfall der Abfälle, welche nach einer Abklingzeit von maximal 30 Jahren gemäss den Vorgaben der neuen Freigrenzen nicht mehr als radioaktiv zu betrachten sind,
- deutliche Verringerung der gesamten Aktivität, Radiotoxizität und Wärmeleistung der SMA durch realistischere Berechnungen der Aktivierung der KKW-Gebäudeteile und -komponenten in den aktualisierten Stilllegungsstudien.

Beurteilung des ENSI

Das ENSI hat die von der Nagra getroffenen Annahmen zum Basisszenarium und zum Referenzjahr sowie die Anpassungen im Vergleich zum Vorgänger MIRAM 08 geprüft und kann diese nachvollziehen. Die unterstellten KKW-Laufzeiten von 47 Jahren für das KKW Mühleberg (bis 2019) und von 60 Jahren für die übrigen schweizerischen KKW sowie die Festlegung der Sammelperiode für MIF-Abfälle bis 2065 stellen eine plausible Annahme dar. Die im Zuge einer innereuropäischen Harmonisierung geplante Anpassung der Freigrenzen in der schweizerischen Strahlenschutzverordnung (StSV) an die IAEA-Empfehlungen (IAEA 2004; IAEA 2014) lässt

eine Zunahme des Abfallvolumens insbesondere bei den Stilllegungsabfällen erwarten. Allerdings wird diese Volumenzunahme durch eine mögliche Abklinglagerung von bis zu 30 Jahren praktisch vollständig kompensiert (BAG 2015).

Materialinventar

Angaben der Nagra

Für bereits produzierte Abfälle liegen Abfallgebindetyp (AGT)-spezifische Spezifikationen vor, für welche der Abfallproduzent mittlere Materialinventare mit Bandbreiten deklariert. Diese primären Informationen werden hinsichtlich der Tiefenlagerprojektierung von der Nagra in ein System von 208 Standardmaterialien konvertiert, welches MIRAM 14 zu Grunde gelegt wird. Die Materialinventare der zukünftig anfallenden Abfälle werden von der Nagra modellhaft und auf der Grundlage der Standardmaterialien abgeschätzt (NTB 14-04).

Beim Vergleich der SMA in MIRAM 14 gegenüber MIRAM 08 hat sowohl die Menge der Metalle (MIRAM 08: $3.85 \cdot 10^7$ kg; MIRAM 14: $6.5 \cdot 10^7$ kg) als auch die der organischen Stoffe (MIRAM 08: $2.21 \cdot 10^6$ kg; MIRAM 14: $2.99 \cdot 10^6$ kg) deutlich zugenommen. Diese Zunahme ist teilweise durch veränderte Rahmenbedingungen begründbar (siehe Abschnitt «Basisszenarium»). Bei den organischen Stoffen kommt hinzu, dass die organischen Massenanteile der Kabelisolierungen bei den CERN-Abfällen neu erfasst wurden und bei den Stilllegungsabfällen (unbrennbare Mischabfälle) der KKW eine detaillierte Erfassung bzw. Unterscheidung in organische und nicht organische Materialien erfolgte (NAB 17-01, Frage 65). Dabei wurde berücksichtigt, dass diverse Mischabfälle aus dem Betrieb und der Stilllegung der Kernkraftwerke aufgrund ihrer hohen PVC-Anteile für eine thermische Behandlung in der Plasma-Anlage der ZWILAG nicht in Frage kommen (NAB 17-01, Frage 68).

Beurteilung des ENSI

Das ENSI beurteilt die Erfassung des Materialinventars in 208 Standardmaterialien als zweckmässig. Damit wird eine Empfehlung des ENSI aus Etappe 1 SGT umgesetzt (ENSI 33/54).

Das ENSI erachtet die Begründung der Nagra bezüglich der Zunahme der Metallmengen in den SMA im Vergleich zur Etappe 1 SGT als nachvollziehbar. Auch die Erklärung für die Zunahme der organischen Stoffe konnte vom ENSI durch einen detaillierten Vergleich der organikareichen Abfallsorten verifiziert werden.

In den AGT-Spezifikationen wird die Geometrie der Rohabfälle, welche unter Tiefenlagerbedingungen als potenziell Wasserstoff-produzierend einzustufen sind, bisher nicht erfasst. Da diese Angaben für die Gasbildungs-raten eine wichtige Rolle spielen, sind diese in neuen AGT-Spezifikationen konsequent zu erfassen.

Radiologisches Inventar

Im MIRAM 14 wird zwischen den folgenden Abfallkategorien unterschieden:

- Betriebsabfälle (BA), Reaktorabfälle (RA) und Stilllegungsabfälle (SA) der Kernkraftwerke,
- Wiederaufarbeitungsabfälle (WA) und abgebrannte Brennelemente (BE),
- Abfälle aus Medizin, Industrie und Forschung (MIF),
- Betriebsabfälle (BA) und Stilllegungsabfälle (SA) der ZWILAG,
- Abfälle der Oberflächenanlagen geologischer Tiefenlager (OFA).

Angaben der Nagra

Aufgrund der Heterogenität der Abfallkategorien sind die Methoden zur radiologischen Inventarisierung unterschiedlich (NTB 14-04).

Die radiologische Inventarisierung der Betriebsabfälle aus Kernkraftwerken erfolgt mit der «Methode der Kor-

relationsfaktoren», welche die direkte Messung von Schlüsselnucliden mit der indirekten Berechnung des vollständigen Radionuclidvektors kombiniert (NTB 14-04).

Die Nuklidinventare für Reaktorabfälle der Kernkraftwerke werden mit Hilfe von nuklearen Rechenmethoden für Strahlungsausbreitung, Aktivierung und Zerfall abgeleitet und anhand von experimentell ermittelten Dosisleistungsraten und chemischen Analysen an repräsentativen Proben validiert.

Für Stilllegungsabfälle der Kernkraftwerke wird die Aktivierung und das hierdurch induzierte Nuklidinventar basierend auf KKW-spezifischen 3D-Monte-Carlo-Simulationen der verschiedenen Komponenten und Strukturen berechnet und anhand von Messungen validiert.

Die Nuklidinventare der Wiederaufarbeitungsabfälle basieren für die bereits ins ZwiLag gelieferte Kokillen auf den Datensätzen existierender Einzelgebinde. Für die künftig zu liefernden Kokillen basieren die in MIRAM 14 importierten Daten auf den Spezifikationen der Entsorgungspflichtigen. Dabei werden sicherheitsrelevante Nuklide in den Wiederaufarbeitungsabfällen mittels Abbrandberechnungen mit dem Programm ORIGEN-ARP ergänzt. Das Programm wird auch für die Berechnung der Aktivität bzw. der Isotopeninventare von abgebrannten Brennelementen verwendet.

Die MIF-Abfälle bestehen aus Betriebs- und Stilllegungsabfällen. Die Betriebsabfälle setzen sich zusammen aus im Auftrag des BAG gesammelten Abfällen, Abfällen des PSI (PSI-Ost, inkl. Abfälle aus der Brennstoffforschung und dem Betrieb der Beschleunigeranlagen am PSI) und Abfällen des CERN. Dazu kommen die Stilllegungsabfälle der Abfall-Behandlungsanlagen und der Forschungsreaktoren am PSI sowie der Beschleunigeranlagen des PSI und CERN. Die Lieferanten der im Auftrag des BAG gesammelten Abfälle tragen in physischen Begleitkarten Informationen über alle bekannten Eigenschaften der Abfälle ein. Die Inventarisierung der Abfälle aus der Brennstoffforschung erfolgt analog wie bei den abgebrannten Brennelementen. Die Angaben zu den Betriebsabfällen und Stilllegungsabfällen der Beschleunigeranlagen basieren auf Berechnungen seitens PSI und CERN. Die aktivierten Komponenten der Forschungsreaktoren werden analog zu den Stilllegungsabfällen der KKW inventarisiert. Für die Abfälle aus den Abfall-Behandlungsanlagen wird die Methode der Korrelationsfaktoren verwendet (NTB 14-04).

Die Inventarisierung der Betriebs- und Stilllegungsabfälle der ZWILAG und der Oberflächenanlagen der geologischen Tiefenlager beruht auf der «Methode der Korrelationsfaktoren».

Beurteilung des ENSI

Das ENSI hat das Vorgehen der Nagra für die Ableitung der Nuklidinventare in den Betriebsabfällen der Kernkraftwerke auf der Grundlage der Schlüssel- und Leitnuclide 2015 im Rahmen eines Audits geprüft (ENSI 33/445). Die «Methode der Korrelationsfaktoren» wird seit vielen Jahren in der Schweiz angewendet und entspricht den international anerkannten und üblichen Verfahren. Der Ablauf der Berechnungen ist aus Sicht des ENSI zweckmässig.

Das Vorgehen der Nagra für die Herleitung der Inventare für die Reaktorabfälle der Kernkraftwerke ist nachvollziehbar. Die Plausibilität der mit Aktivierungsberechnungen hergeleiteten Aktivitäten wurde u. a. im Rahmen früherer Genehmigungsverfahren für Abfallbindetypen gemäss Richtlinie ENSI-B05 geprüft.

Das ENSI kann das Vorgehen der Nagra zur Charakterisierung und Inventarisierung der Stilllegungsabfälle der Kernkraftwerke ebenfalls nachvollziehen. Die entsprechenden Mengenangaben hat das ENSI bereits in seiner Stellungnahme zur Kostenstudie (ENSI 10/677) überprüft. Das ENSI nimmt zur Kenntnis, dass die Nagra in MIRAM 14 die gemäss IAEA (IAEA 2004; IAEA 2014) aktualisierten Freigrenzen verwendet und eine Abklinglagerung von 30 Jahren berücksichtigt.

Die Angaben zu den Wiederaufarbeitungsabfällen und den abgebrannten Brennelementen wurden vom ENSI anlässlich des Gutachtens zum Entsorgungsnachweis überprüft und als nachvollziehbar befunden (HSK 35/78; HSK 35/90). Zusätzlich erfolgte eine Prüfung des Inventars für die aus der Wiederaufarbeitung in die ZWILAG gelieferten Kokillen im Rahmen von Übertrittsgenehmigungen gemäss Richtlinie ENSI-B05. Im Sinne einer Plausibilitätsbetrachtung hat das ENSI im Rahmen der Etappe 2 SGT die Aktivitätsangaben der Nagra für abgebrannte Brennelemente mit den entsprechenden Werten der Swedish Nuclear Fuel and Waste Management

Company (SKB 2010) für das schwedische Entsorgungsprogramm verglichen. Im Ergebnis liegt der Aktivitätswert der Nagra für die meisten Radionuklide über dem entsprechenden Wert der SKB, die Abweichung beträgt jeweils weniger als einen Faktor 2. Die Aktivitäten insbesondere der sicherheitsrelevanten Radionuklide sind somit vergleichbar.

Für MIF-Abfälle hat das ENSI die Plausibilität der mit den vorgeschlagenen Methoden berechneten Aktivitäten im Rahmen von Genehmigungsverfahren gemäss Richtlinie ENSI-B05 geprüft und bestätigt.

Bezüglich der Inventarangaben für die Abfälle der ZWILAG und der Oberflächenanlagen der geologischen Tiefenlager schliesst sich das ENSI dem Vorgehen der Nagra an.

Verpackungskonzept und Abfallvolumen

Angaben der Nagra

Die Basis für die Berechnung der Abfallvolumina im Rahmen der Planungen der geologischen Tiefenlager ist das MIRAM 14. Unter der Annahme fallspezifischer Szenarien (z. B. Basisszenarium) lässt sich mit MIRAM 14 das Volumen der konditionierten Abfälle berechnen. Das «konditionierte Volumen» wird u. a. für die logistischen Überlegungen (z. B. Zwischenlagerung), die Kostenstudien und die betriebstechnische Auslegung der Verpackungsanlagen und der geologischen Tiefenlager benötigt. Das aus der zusätzlichen Verpackung resultierende und gegenüber dem konditionierten Volumen vergrösserte «verpackte Volumen» ist u. a. für den Platzbedarf in den Tiefenlagern und für die Sicherheitsanalysen der Tiefenlager massgebend (NAB 14-104 und Tabelle 1). Für die geologische Tiefenlagerung sind derzeit neun standardisierte Typen von Endlagerbehältern vorgesehen (NAB 14-104).

Tabelle 1: Gesamte konditionierte und in Endlagerbehälter verpackte (in Klammern) Abfallvolumina in m³ für das MIRAM 14 Basisszenarium (NTB 14-04, Tabelle 6).

[m ³]	KKW, ZWILAG ¹⁾					MIF	OFA	Total
	BE	WA	BA	RA	SA			
HAA	1'363 (8'125)	115 (381)				1 (9)		1'479 (8'515)
ATA		102 (634)			24 (24)	211 (783)		337 (1'441)
SMA			8'465 (31'302)	473 (1'807)	23'024 (31'459)	21'005 (25'775)	646 (2'293)	53'613 (92'636)
Total	1'363 (8'125)	217 (1'015)	8'465 (31'302)	473 (1'807)	23'048 (31'483)	21'217 (26'567)	646 (2'293)	55'429 (102'592)

¹⁾ Inkl. Lucens (VKKL) Abfälle.

Beurteilung des ENSI

Die Erläuterungen der Nagra zur Verpackung radioaktiver Abfälle sind aus Sicht des ENSI stufengerecht. Die vorgeschlagenen Abfallsorten-Behältertypen und Endlagerbehälter haben sich mit dem fortschreitenden Kenntnisstand über die zu entsorgenden radioaktiven Abfälle und die Auslegung der geologischen Tiefenlager sowie die operationellen Aspekte (Sicherheit der Handhabung) kontinuierlich entwickelt und erlauben die gewünschte Flexibilität für die sichere und lagergerechte Verpackung sämtlicher in der Schweiz anfallender radioaktiver Abfälle.

Der Ersatz der bisher vorgesehenen grossen Endlagerbehälter LC-1 (Aussenvolumen ca. 26 m³) und LC-2 (ca. 14 m³) durch die handlicheren Endlagerbehälter LC-84 (ca. 6 m³) und LC-86 (ca. 9 m³) ist aus betrieblichen Gründen nachvollziehbar und zu begrüssen.

Das ENSI hat auf der Grundlage des MIRAM 14 (Basisszenarium) die Volumenangaben für die unterschiedlichen Abfallkategorien stichprobenweise geprüft und ist mit den Werten der Nagra für konditionierte bzw. verpackte

Abfälle einverstanden. Daher kommt das ENSI zum Schluss, dass das aktualisierte Verpackungskonzept der Nagra dem aktuellen Projektstand angemessen ist und die Nagra die Abfallvolumina nachvollziehbar abgeleitet hat.

2.1.2 Abfallzuteilung auf SMA- und LMA-Lager

Angaben der Nagra

Durch die Abfallzuteilung sollen Abfälle mit ähnlichen sicherheitsbezogenen Eigenschaften im gleichen Lager entsorgt werden, so dass möglichst ausgewogene Anforderungen an die Barrierensysteme und an die SMA- und HAA-Lager resultieren (NTB 14-03). In einem separaten Teil des HAA-Lagers können zusätzlich besonders langlebige oder stark radiotoxische SMA und alphatoxische Abfälle (ATA) aufgenommen werden (LMA-Lager). Die Zuteilung der ATA und SMA zum LMA-Lager bzw. zum SMA-Lager erfolgt zunächst basierend auf den Resultaten von generischen (d. h. standortunabhängigen) Dosisberechnungen für ein SMA-Lager. Konkret werden mit diesen Dosisberechnungen die sogenannten dosisdominierenden SMA- und ATA-Abfallsorten im MIRAM 14 ermittelt (NTB 14-03).

Infolge der laufenden Weiterentwicklung des modellhaften Inventars ist eine einfache Übertragung der Abfallzuteilung aus Etappe 1 SGT auf das in Etappe 2 SGT zu verwendende Inventar nicht möglich. Aus diesem Grund muss die Abfallzuteilung für das aktualisierte Inventar neu vorgenommen werden. Dazu wird die exakt gleiche Methodik wie in Etappe 1 SGT verwendet (NTB 08-05).

Bei den im Rahmen der Abfallzuteilung als dosisdominierend identifizierten Abfallsorten in MIRAM 14 handelt es sich um ATA aus der Wiederaufarbeitung von abgebrannten Brennelementen, diverse Mischabfälle aus den Sammelaktionen des BAG, metallische Stilllegungsabfälle des Forschungsreaktors Lucens, Forschungsabfälle mit vergleichsweise hohen Uran- und/oder Plutoniumgehalten, stark aktivierte Teile der Reaktorsteuerstäbe und Messlanzen sowie sonstige stark aktivierte Kleinteile (NTB 14-03).

Beurteilung des ENSI

Das ENSI ist damit einverstanden, dass die Nagra aufgrund der Aktualisierung des modellhaften Inventars die Abfallzuteilung aus Etappe 1 SGT überarbeitet hat. Die dabei angewandte Methodik wurde vom ENSI in Etappe 1 SGT nachvollzogen und mit eigenen Berechnungen verifiziert (ENSI 33/070).

In MIRAM 14 hat die Nagra im Unterschied zu MIRAM 08 für die Abfallsorten eine neue Nomenklatur verwendet (NTB 14-04). Auf Nachfrage des ENSI hat die Nagra dargelegt, welche Abfallsorten im MIRAM 08 den Abfallsorten im MIRAM 14 entsprechen (NAB 17-01, Frage 43). Damit hat das ENSI eine Differenzanalyse zwischen der Abfallzuteilung für Etappe 1 und 2 SGT durchgeführt, d. h. es wurden Abfallsorten identifiziert, die in Etappe 1 SGT dem LMA-Lager zugeteilt wurden, während die entsprechenden Abfallsorten in Etappe 2 SGT dem SMA-Lager zugeteilt wurden und umgekehrt. Anhand der Ergebnisse der Differenzanalyse und den Erläuterungen der Nagra zur unterschiedlichen Zuteilung einzelner Abfallsorten in MIRAM 08 und MIRAM 14, kann das ENSI die von der Nagra vorgeschlagene Abfallzuteilung im MIRAM 14 auf SMA- und LMA-Lager nachvollziehen.

2.1.3 Einteilung der SMA/LMA in zwei Abfallgruppen

Angaben der Nagra

In Übereinstimmung mit der bisherigen Praxis (NTB 08-05) werden die SMA und ATA im modellhaften Inventar entsprechend ihrem Gehalt an Stoffen, welche die Mobilität der Radionuklide im Zementnahfeld des SMA-Lagers oder des LMA-Lagers erhöhen könnten, in zwei Abfallgruppen eingeteilt. Dabei werden der Gruppe 1 solche Abfälle zugeteilt, die im Hinblick auf eine mögliche Beeinträchtigung der geochemischen Rückhalte-mechanismen nur geringe Konzentrationen an Störstoffen enthalten, der Gruppe 2 alle übrigen Abfälle. Sowohl im SMA-Lager als auch im LMA-Teil des HAA-Lagers ist vorgesehen, die beiden Gruppen in räumlich getrennten

Lagerkammern einzulagern, um den Einfluss der Störstoffe auf die Radionuklidmobilität insgesamt möglichst gering zu halten (NTB 14-03). Für die Dosisberechnungen werden für die zwei Abfallgruppen unterschiedliche chemische Bedingungen angenommen und bei der Ableitung der Transportparameter für das Zementnahfeld berücksichtigt (NTB 14-03).

Bei den Störstoffen, welche die Radionuklidrückhaltung negativ beeinflussen können, handelt es sich um organische Verbindungen, durch deren Zersetzung der Zement degradiert werden kann oder um anorganische und organische Komplexbildner (NAB 14-52 Rev. 1).

Beurteilung des ENSI

Das Vorgehen bei der Einteilung der SMA und der LMA in jeweils zwei Abfallgruppen entspricht grundsätzlich dem Vorgehen bei früheren Einteilungen in zwei Abfallgruppen mit unterschiedlichen Transportparametern der Radionuklide, namentlich im Entsorgungsnachweis (NTB 02-05), in Etappe 1 SGT (NTB 08-05) und in der Beurteilung des geologischen Kenntnisstands für die provisorischen Sicherheitsanalysen in Etappe 2 SGT (NTB 10-01). Im Zuge der Etappe 1 SGT hat das ENSI die Einteilung in die zwei Abfallgruppen geprüft und als zweckmässig und stufengerecht beurteilt (ENSI 33/070). Auch in Etappe 2 SGT ist das ENSI mit dem Vorgehen der Nagra zur Einteilung der SMA bzw. LMA in die Abfallgruppen 1 und 2 einverstanden. Die Überprüfung der Abfallgruppeneinteilung erfolgte anhand einer Differenzanalyse zwischen den Ergebnissen für Etappe 1 SGT auf der Grundlage MIRAM 08 und den Ergebnissen für das Inventar MIRAM 14.

Die eigene Analyse hat ferner gezeigt, dass der relative Organikagehalt der SMA-Abfallgruppe 1 im Mittel ca. 1.0 Gew.-% (Bandbreite der repräsentativen Gebinde 0 bis 18.7 Gew.-%) und für die SMA-Abfallgruppe 2 im Mittel ca. 16.4 Gew.-% (Bandbreite 0.1 bis 79.6 Gew.-%) beträgt. Für die LMA-Abfallgruppe 1 liegt der mittlere Organikagehalt bei ca. 0.6 Gew.-% (Bandbreite 0 bis 11.5 Gew.-%). Die LMA-Abfallgruppe 2 beinhaltet lediglich zwei Abfallsorten mit relativen Organikagehalten von ca. 7.7 und 9.0 Gew.-%.

2.2 Lagerkonzepte

Die Anforderungen an den Standort eines geologischen Tiefenlagers sind eng mit dem Lagerkonzept verknüpft. Über die gesetzlichen (KEG, KEV) und untergesetzlichen (Richtlinie ENSI-G03) Anforderungen hinaus werden durch die Wahl der Lagerauslegung wichtige Randbedingungen wie die laterale und vertikale Ausdehnung des geologischen Tiefenlagers oder die Rollenverteilung zwischen natürlichen und technischen Barrieren festgelegt. Daher ist es sinnvoll, basierend auf dem vorliegenden Abfallinventar und stufengerecht zum Stand der Lagerrealisierung, mögliche und dem gesetzlichen Rahmen entsprechende Lagerkonzepte vorzulegen und zu erläutern, welche Gründe zum vorliegenden Referenzkonzept geführt haben. Das ENSI hat in seiner Nachforderung (ENSI 33/476) eine entsprechende Auslegeordnung verlangt.

Angaben der Nagra

Im Rahmen ihrer Unterlagen zur Nachforderung hat die Nagra mögliche Lager- und Barrierenkonzepte im Hinblick auf ihre Verwendung für die Einengung in Etappe 2 SGT geprüft und verglichen (NAB 16-41; NAB 16-42) und damit die Angaben im NTB 14-01 präzisiert. Wegen der Bedeutung für die Abgrenzung der Lagerperimeter und ihrer Bewertung wurde auch geprüft, ob es Varianten gibt, die sich – bei gleichwertigen Eigenschaften bezüglich Sicherheit und Barrierenwirkung – für eine grössere Tiefenlage besser eignen oder bezüglich Platzbedarf günstiger sind als die im NTB 14-01 für die Einengung verwendeten Referenzkonzepte.

Die Prüfung der Lager- und Barrierenkonzepte erfolgt in zwei Schritten. Als Erstes wird die grundsätzliche Eignung der weltweit betrachteten Lager- und Barrierenkonzepte geprüft in Bezug auf die in der Schweiz gültigen gesetzlichen und behördlichen Vorgaben und unter Berücksichtigung der Randbedingungen in den geologischen Standortgebieten gemäss Bundesratsentscheid zu Etappe 1 SGT (NAB 16-42). In einem zweiten Schritt werden für die verbleibenden grundsätzlich möglichen Lager- und Barrierenkonzepte die Lagerarchitektur (Zugang nach Untertag, Erschliessung der Lagerkammern auf Lagerebene, räumliche Anordnung sowie Länge

und Durchmesser der Lagerkammern) und die Ausgestaltung der Lagerkammern (inkl. technische Barrieren) beurteilt. Dazu werden die Lagerkammern mit den technischen Barrieren in Sub-Systeme gegliedert, welche getrennt beurteilt werden. Dies führt zu einer Bewertung unter Berücksichtigung der Beurteilung der Lagerarchitektur und der Sub-Systeme der Lagerkammern für das HAA- und das SMA-Lager.

Die Beurteilung der grundsätzlichen Lager- und Barrierenkonzepte führt zur Schlussfolgerung, dass für die weitere Evaluation nur solche Konzepte betrachtet werden, bei denen die Lagerkammern mindestens einige 100 m unter Terrain auf mittig platzierter Lagerebene parallel zum Schichtverlauf des Wirtgesteins bzw. horizontal angeordnet sind. Die Lagerkammern werden von einem Erschliessungsbereich mit genügend lateralem Abstand von den Lagerkammern über etwa schichtparallele Tunnel erschlossen. Die Lagerkammern und allfällig damit verbundene Bauten haben eine beschränkte vertikale Ausdehnung.

Die Beurteilung des Zugangs nach Untertag für BE/HAA und SMA/LMA geht von zwei Varianten aus, entweder einem Tunnel bzw. eine Wendelrampe mit Einfach- bzw. Doppelröhre oder einem Schacht bzw. Blindschacht (beide Varianten in Kombination mit weiteren Schächten). Mit beiden Varianten können die erforderlichen Funktionen erbracht werden, es ergeben sich keine grundsätzlichen Vorbehalte. Für Etappe 2 SGT drängt sich keine frühzeitige weitere Einschränkung dieser Varianten auf. Für die Beurteilung des Zugangs nach Untertag können deshalb insbesondere standortspezifische bauliche und betriebliche Aspekte berücksichtigt werden. Der Zugang nach Untertag hat keinen direkten Einfluss auf die anzustrebende maximale Tiefenlage, auch wenn mit zunehmender Tiefe der Zugang nach Untertag aufwändiger wird.

Für die räumliche Anordnung sowie für Länge und Durchmesser der Lagerkammern für BE/HAA werden verschiedene Varianten betrachtet. Die Nagra folgert aufgrund der Diskussion verschiedener Aspekte, dass nur die HAA-Lagerkammervariante mit langen horizontalen Lagerstollen (mit einem Durchmesser von ca. 3 m und einer Länge von einigen 100 m) alle Lagerkammeraspekte erfüllt und diese Variante daher für die Einengung in Etappe 2 SGT verwendet werden soll. Die Festlegung der Lagerkammervariante hat keinen direkten Einfluss auf Platzbedarf und maximale Tiefenlage und damit für die Einengung in Etappe 2 SGT.

Für die Diskussion der Ausgestaltung der HAA-Lagerkammern (inkl. der technischen Barrieren) werden diverse Sub-Systeme betrachtet. Aus der Diskussion des Sub-Systems «Abfälle und Behältergeometrien» folgert die Nagra, dass für die Einengung in Etappe 2 SGT von Endlagerbehältern mit nicht-zerschnittenen Brennelementen auszugehen ist. Die Festlegung des Behälters hat keinen Einfluss auf die maximale Tiefenlage. Der Platzbedarf wird massgeblich durch den Zielwert der mittleren Wärmebelastung bestimmt.

Für das Sub-System «Endlagerbehälter und Verfüllung» bevorzugt die Nagra unter Berücksichtigung von verschiedenen Aspekten folgende Behälter- und Verfüllmaterialien: Als Behältermaterial wird geschmiedeter Stahl ohne Beschichtung gewählt (NTB 14-01). Die Gasbildung und deren Auswirkungen werden nicht als problematisch beurteilt (NAB 16-42). Bei Bedarf kann unter anderem ein beschichteter Stahlbehälter gewählt und die Entfernung von metallischen Einbauten vorgesehen werden, womit die Gasbildung reduziert würde. Keramik als Behältermaterial wird aufgrund von diversen Vorbehalten nicht vorgeschlagen. Als Verfüllmaterial wird kompaktierter Bentonit vorgeschlagen, als zusätzliche Variante kann für ausgewählte Bedingungen auch ein zementbasiertes Verfüllmaterial in Betracht gezogen werden, insbesondere dann, wenn die Bedingungen keinen genügend guten Einbau von kompaktiertem Bentonit zulassen. Die Variante mit zementbasiertem Verfüllmaterial ist jedoch gegenwärtig bedeutend weniger ausgereift. Aufbereiteter Opalinuston wird als Verfüllmaterial nicht weiter verfolgt (reduzierte Quellfähigkeit, deshalb mikrobielle Aktivität möglich, nachteilig bzgl. Interaktion mit Endlagerbehälter). Die Festlegung des Behälter- und Verfüllmaterials hat bei der Einengung in Etappe 2 SGT keinen direkten Einfluss auf den Platzbedarf und die anzustrebende maximale Tiefenlage.

Zum Sub-System «Ausbau der Lagerkammern und Bedingungen im direkt umgebenden Wirtgestein» werden Varianten des Innenausbaus im Austausch mit der Stollenverfüllung betrachtet. Bei der Verwendung von kompaktiertem Bentonit ist eine Beschränkung der Menge an Zement anzustreben (Zielwert Spritzbetondicke < 30 cm mittlere Mächtigkeit). Der Grund dafür ist, dass eine grosse Mächtigkeit des Spritzbetons langfristig mehr Mineralumwandlungen im Bentonit bewirken könnte. Die dadurch verursachte reduzierte Quellfähigkeit ist dann ungünstig, wenn die Bentonitdichte wegen ungünstiger Einbaubedingungen zusätzlich reduziert ist. Angrenzend an die Spritzbetonschicht können einige cm des Bentonits durch das Zementporenwasser zementiert werden. Die resultierenden Mineralphasen sind nicht mehr quellfähig. Bei Bedarf kann als zusätzli-

che Variante für ausgewählte Situationen auch ein zementbasiertes Verfüllmaterial in Betracht gezogen werden (NAB 16-42).

Bei den Lagerkammern für SMA bzw. LMA werden die Varianten K09, K06, K04 und eine neue Variante K04a (ohne Krankonsolen, mit kreisrundem Ausbruchsprofil) betrachtet. Der Einfluss der maximalen Tiefenlage auf die Kavernenquerschnitte ist gross, die grösseren Kavernenquerschnitte sind in grossen Tiefen nicht in jedem Fall machbar. Dennoch werden alle Varianten für die Einengung in Etappe 2 SGT mit einer vorgesehenen Lagerkammerlänge von etwa 200 m verwendet.

Für die Diskussion der Ausgestaltung der SMA-Lagerkammern (inkl. der technischen Barrieren) werden ebenfalls diverse Sub-Systeme betrachtet. Für das Sub-System «Abfälle, Endlagerbehälter und Verfüllung» werden weitergehende Konditionierverfahren zur weiteren Reduktion der Organika bzw. Reduktion der metallischen Oberflächen bewertet, ausserdem ein Zement- und ein Bentonit-basiertes Verfüllmaterial diskutiert. Für weitergehende Konditionierverfahren ergeben sich seitens Nagra keine Notwendigkeiten und als Verfüllmaterial hat ein Zementmörtel sicherheitstechnische Vorteile gegenüber Bentonit. Die Festlegung des Verfüllmaterials hat keinen Einfluss auf die anzustrebende maximale Tiefenlage und auf den Platzbedarf.

Für das Sub-System «Ausbau der Lagerkammern und Bedingungen im direkt umgebenden Wirtgestein» werden für die SMA-Lagerkammerquerschnitte K09, K06, K04 und K04a verschiedene Varianten des Bauvorgangs und des Lagerkammerausbaus diskutiert. Mit Blick auf den Platzbedarf, die maximale Tiefenlage und den vertikalen Migrationspfad werden Kavernenquerschnitte vorgeschlagen, deren Grösse auf die lokalen Bedingungen in den entsprechenden Lagerperimetern abgestimmt ist. Dies gilt auch für den Ausbau und den Bauvorgang.

Die Prüfung der Lager- und Barrierenkonzepte für HAA-, LMA- und SMA-Lager im Hinblick auf die Verwendung für die Einengung in Etappe 2 SGT zeigt, dass die bisher verwendeten Referenzkonzepte im Vergleich zu anderen Konzepten vorteilhaft sind (NAB 16-42). Aus Sicht der Nagra ist es deshalb von Vorteil, keine Standortgebiete zu wählen, welche die Verwendung des heutigen Lager- und Barrierenkonzepts verunmöglichen würden.

Beurteilung des ENSI

Das ENSI und seine Experten (ENSI 33/530; EGT 2016) haben die Aussagen der Nagra zur Lagerkonzeption geprüft und kommen zum Schluss, dass die Ausführungen der Nagra nachvollziehbar und mehrheitlich plausibel sind. Das ENSI stimmt mit der Nagra überein, dass für die Geometrie der in der Nordschweiz vorhandenen tonreichen Gesteine eine horizontale (SMA) bzw. schichtparallele (HAA) Lagerung der Abfälle mit möglichst beschränkter vertikaler Ausdehnung sicherheitsgerichtet ist. Eine sicherheitstechnische Präferenz gegenüber Schächten oder Rampen ist auf generischer Basis nicht vorhanden, sondern muss sich aus der standortspezifischen Beurteilung ergeben. Zu den Aspekten bzgl. weitergehender Konditionierungen aller Abfallsorten (z. B. Zerschneiden der Brennelemente, Mineralisierung der verbleibenden LMA- und SMA-Organika, Einschmelzen der Metallteile zur Reduktion der Oberflächen/Volumen-Verhältnisse), welche einen Einfluss auf die Lagerkonzepte haben, wird sich das ENSI im Rahmen seiner Überprüfung des Entsorgungsprogramms 2016 äussern.

Das ENSI stellt fest, dass die Nagra in ihren Unterlagen zur Nachforderung keine alternativen Konzepte zu allen bezüglich Langzeitsicherheit sinnvollen, aber ggf. die maximale Tiefenlage einschränkenden Aspekten vorlegt. Die Zwischensiegel in den HAA-Lagerstollen (ohne oder mit reduzierter Stollensicherung) werden in der Diskussion verschiedener Varianten der Lagerauslegung nicht weiter ausgeführt, d. h. dafür keine alternativen Varianten vorgeschlagen. Es wird seitens Nagra lediglich festgehalten, dass das Element der Zwischensiegel «nicht zwingend notwendig» ist (NAB 16-42). Mehrere Punkte in Bezug zur im NAB 16-45 vorgeschlagenen Ausführung der Versiegelungsstrecken (einschl. der Zwischensiegel) sind aus bautechnischer Sicht kritisch. Die von der Nagra geplante Stützung durch Stahlbögen stellt einen beschränkten Ausbauwiderstand zur Verfügung, was zu grösseren Konvergenzen und erhöhter Gebirgsschädigung führen kann. Durch die nicht flächige Stützung kann nicht ausgeschlossen werden, dass das Gebirge über die Stahlbögen hinaus nachbricht, wodurch sich aus geotechnischer und bautechnischer Sicht, aber auch bezüglich Arbeitssicherheit Bedenken ergeben. Es ist mit einer vermehrten Auflockerung des Gebirges zwischen den Bögen zu rechnen, was den angestrebten satten Kontakt zwischen Versiegelungsmaterial und Gebirge entscheidend reduzieren und ggf. umfangreiche Nacharbeiten vor der Verfüllung erforderlich machen würde (EGT 2016).

Eine vollständige Verfüllung der Versiegelungsstrecken mit pumpfähigem Material (z. B. mit einem zementbasierten Verfüllmittel) ist erfahrungsgemäss schwer zu erreichen. Mit losem Material (Bentonitgranulat) ist eine Verfüllung aufgrund der im Wirtgestein entstehenden Auflockerung und des damit verbundenen unregelmässigen Profils zusätzlich anspruchsvoller (EGT 2016). Die Nagra hat im Rahmen des FE-Experiments am Felslabor Mont Terri dazu bereits erste Erfahrungen gesammelt (NAB 16-45). Die Nagra hat in der Weiterentwicklung der Lagerkonzepte zu zeigen, wie sie einen satten Kontakt zwischen Versiegelung und Gebirge erreicht und inwiefern dazu zusätzliche Schritte (z. B. das Entfernen von losem Material) notwendig sind.

Bezüglich HAA-Endlagerbehälter diskutiert die Nagra eine breite Palette von möglichen Materialien, von denen jedoch nur die reinen Stahl- oder Gusseisen-Behälter und die beschichteten bzw. ummantelten Eisenbehälter tatsächlich in Erwägung gezogen werden. Das ENSI beurteilt aus heutiger Sicht die Darstellung der technischen Möglichkeiten als korrekt. Ein definitiver Entscheid bezüglich der HAA-Endlagerbehälter sollte jedoch erst im Rahmen der weiteren Schritte der Lagerrealisierung gefällt werden. Bei der Frage der Beschichtung/Ummantelung stimmt das ENSI der Nagra zu, dass der Entscheid im Zusammenhang mit den zu erwartenden Gasbildungs- bzw. -migrationsraten und damit auch der gewählten Stollenverfüllung geklärt werden muss.

Die Nagra schlägt bei den HAA-Lagerstollen eine Verfüllung mit hochkompaktiertem Bentonit und einen Ausbau mit Spritzbeton vor. Das ENSI bestätigt, dass mit zunehmender Stärke des Spritzbetons generell eine zunehmende für die Langzeitsicherheit ungünstige Mineralumwandlung im angrenzenden Bentonit zu erwarten ist. Die Stärke des Spritzbetonausbaus ist dabei auf die Tiefe der Lagerebene und die dort zu erwartenden geotechnischen Bedingungen und Gefährdungen anzupassen. Der tatsächliche Umfang der durch den Spritzbeton verursachten Umwandlung ist aus Sicht des ENSI basierend auf den verfügbaren Experimenten und Modellen nur in beschränktem Umfang prognostizierbar. Abschätzungen auf Basis einer Massenbilanzierung geben Hinweise auf den maximal möglichen Umfang. Aus Sicht des ENSI ist jedoch aufgrund der bestehenden Ungewissheiten in den Daten und ablaufenden Prozessen eine konkrete Anforderung an das Ausbaukonzept mit einer maximal zulässigen Spritzbetondicke von 30 cm daraus nicht robust ableitbar, zumal unklar bleibt, welche Konsequenzen sich aus einem Spritzbetonausbau von leicht erhöhter Dicke ergeben würden. Aus Sicht des ENSI sollten zunächst die erforderlichen lagerperimeterspezifischen und tiefenabhängigen Ausbaukonzepte und Ausbaumittel erarbeitet werden. Anschliessend sollte für Etappe 3 SGT deren Einfluss auf die Langzeitsicherheit bewertet werden. In diesem Zusammenhang verweist das ENSI auf seine Nachforderung (ENSI 33/476), in der ein entsprechendes Vorgehen gefordert worden war.

Das ENSI nimmt zur Kenntnis, dass die Nagra für die Verfüllung eines HAA-Lagerstollens auch die Möglichkeit in Erwägung zieht, statt der Bentonit- eine Zementverfüllung zu verwenden, falls der Bentonit «nur in ungenügender Qualität» eingebracht werden kann (NAB 16-42). Das ENSI und seine Experten gehen davon aus, dass solche zementbasierten Verfüllungen keine nennenswerten Auswirkungen auf die resultierende bautechnische Gebirgsschädigung haben, da die relevanten Gebirgsdeformationen bereits im Ausbruchsbereich während des Stollenvortriebs entstehen. Im Fall einer Zementverfüllung wären keine ungünstigen Wechselwirkungen mit dem Spritzbeton zu erwarten, so dass eine aufgrund ungünstiger Wechselwirkungen notwendige Einschränkung der Spritzbetondicke, wie sie von der Nagra im Fall einer Bentonitverfüllung vorgeschlagen wird, und die daraus resultierende indirekte Einschränkung der Tiefe der Lagerebene, nicht erforderlich wären. Das ENSI stimmt mit der Nagra überein, dass die Variante mit Zementverfüllung in ihren Auswirkungen für Bau, Betrieb und Langzeitsicherheit generell weniger umfangreich untersucht ist als die Variante mit Bentonitverfüllung. Daher sind aus Sicht des ENSI für Etappe 3 SGT diese Auswirkungen gleichwertig zu einer Bentonitverfüllung zu untersuchen. Für eine Verfüllung mit Bentonit sind insbesondere die Gründe und deren Eintretenswahrscheinlichkeiten für ein Einbringen «in ungenügender Qualität» darzulegen. Aus heutiger Sicht kann ein Entscheid für die eine oder andere Variante noch nicht mit der genügenden Argumentationstiefe bzgl. Bau-, Betrieb- und Langzeitsicherheit gefällt werden. Eine Diskriminierung aufgrund der Tiefenlage und eine daraus möglicherweise resultierende Einengung aufgrund der Betrachtung der Situation mit einer Bentonitverfüllung wären aus Sicht des ENSI zum jetzigen Zeitpunkt zu früh.

Das ENSI weist bezüglich der Grösse der SMA- bzw. LMA-Lagerkavernen darauf hin, dass die Aussagen der Nagra im NAB 16-42 unterschiedlich zu denjenigen im NAB 16-45 sind, wo die Kavernengrösse K09 für die geomechanischen Berechnungen als Richtschnur über alle Tiefenlagen benutzt wird. Hinsichtlich des stand-

ortspezifischen Platzbedarfs für Etappe 3 SGT ist der Einfluss der Kavernengrösse und Kavernenabstände in Abhängigkeit der zu erwartenden felsmechanischen Eigenschaften auf Lagerebene und der Lagertiefe zu prüfen. Von speziellem Interesse ist der neu vorgestellte Kavernentyp K04a, der zwar gegenüber den K09-Kavernen einen maximalen Platzbedarf aufweist, jedoch aufgrund des kreisrunden Querschnitts günstige Ausbruchseigenschaften aufweist und ohne Konsolen in den Ulmen und entsprechenden Krananlagen auskommt. Aufgrund der Ausführungen der Nagra bleibt zurzeit unklar, inwiefern bei den K04a-Kavernen auch auf entsprechende Ablade- und Umladebereiche (NAB 16-42) verzichtet werden kann.

Im Hinblick auf die weitere Entwicklung der Lagerkonzepte sollte die Nagra aus Sicht des ENSI und seiner Experten (ENSI 33/530; EGT 2016) den Fokus verstärkt auch auf folgende Aspekte richten: (i) Es sind unabhängige Fluchtwege zur Oberfläche einzurichten, insbesondere in Fällen, in denen durch Eintreten bautechnischer Gefährdungen an neuralgischen Stellen im Bereich der Zugangsbauwerke vorhandene Fluchtwege unbrauchbar werden. (ii) Bereiche mit sich ändernden Querschnitten sind detailliert zu betrachten, z. B. bei den mit Spannweiten von bis zu 12 m geplanten Abzweignern von Betriebstunneln zu den HAA-Stollen. Diese Bereiche sind bautechnisch anspruchsvoll in der Herstellung und kritisch bzgl. Stabilität. (iii) Falls die geplanten Blindstollen mittels Tunnelbohrmaschine (TBM) erstellt werden sollen, sind Konzepte für den Abbau der TBM und für die Ausbruchsicherung am Stollenende zu entwickeln, welche eine minimale Schädigung des Gebirges gewährleisten.

2.3 Sicherheitskonzepte und Sicherheitsfunktionen für HAA- und SMA-Lager

2.3.1 Nahfeld des SMA-Lagers

Das Nahfeld des SMA-Lagers umfasst im Referenzkonzept den in Kavernen eingelagerten Abfall, die zementbasierte Verfüllung sowie das unmittelbare geologische Umfeld. Der Abfall wird grösstenteils in Stahlfässern eingelagert und überwiegend mit Zementmörtel fixiert. Die Stahlfässer dienen im Wesentlichen der Zwischenlagerung, der Handhabung und dem Transport der Abfälle. Die Gewährleistung eines sicheren Einschlusses der Abfälle in den Fässern im Tiefenlager über eine längere Zeit ist nicht vorgesehen. Die Stahlfässer wiederum werden in Betoncontainer (Endlagerbehälter) platziert und ebenfalls mit Zementmörtel verfüllt. Die Endlagerbehälter werden in Kavernen eingelagert. Der verbleibende Hohlraum wird mit einem hochporösen Zementmörtel verfüllt. Die Freisetzung der Radionuklide wird durch die Verfügbarkeit von Wasser, die Degradation des Zements sowie der organischen Abfälle, die Metallkorrosion und die Zement-Ton-Wechselwirkungen beeinflusst.

Angaben der Nagra

In einem Tiefenlager für schwach- und mittelaktive Abfälle (SMA) und in den Lagerkavernen für langlebige mittelaktive Abfälle (LMA) werden grosse Mengen an zementhaltigen Materialien (Mörtel, Beton) für die Konditionierung der Abfälle, für den Ausbau der Einlagerungskavernen (Spritzbetonschale) und für die Verfüllung der Hohlräume verwendet. Das Abfallinventar in einem solchen «Zementlager» ist durch eine grosse Vielfalt an organischen, metallischen und anorganischen Materialien charakterisiert (NTB 14-11).

Die geochemische Entwicklung des Zementnahfelds wird durch verschiedene Prozesse beeinflusst (NTB 14-11). Als wichtig erachtet werden die Entwicklung der Wassersättigung, die Wechselwirkungen mit dem Wirtgestein, die Wechselwirkungen mit den eingelagerten Abfällen, die Degradierung von Zementmaterialien durch Alkali-Kieselsäure-Reaktionen und die Karbonatisierung.

Der diffusive und advektive Austausch von Porenwässern zwischen Zementmaterialien und dem Wirtgestein führt zu Mineralreaktionen und Änderungen des pH-Werts im Porenwasser. Ausgehend von den Materialgrenzflächen werden in den Wirtgesteinen Tonminerale bis zu einigen dm in 100 000 Jahren (Betrachtungszeitraum der Sicherheitsanalyse für ein SMA-Lager), bei grossen Wasserflüssen im Wirtgestein vielleicht auch bis zu 1 m aufgelöst und in andere Minerale (z. B. Zeolithe) umgewandelt. Die Sorptionskapazität des Wirtgesteins, in dem der Wasserfluss langsam ist und die Diffusion den Transport dominiert, wird durch die Mineralumwandlungen nicht beeinflusst. Der Einfluss der pH-Fahne auf die Sorptionskapazität der geklüfteten Wirtgesteine wird in den provisorischen Sicherheitsanalysen für Etappe 2 SGT berücksichtigt. Im Zementlager selbst könnte

der Portlandit in einem diffusiv dominierten Transportregime bis zu einer Entfernung von etwa 2 m von der Grenzfläche zum Wirtgestein aufgelöst werden.

Falls Beton kieselsäurehaltige Zuschlagstoffe enthält, können Zementminerale durch die Alkali-Kieselsäure-Reaktion degradiert werden. Hierbei reagieren kieselsäurehaltige Zuschläge mit Portlandit oder C-S-H Phasen mit hohem Ca/Si-Verhältnis und bilden C-S-H Phasen mit reduziertem Ca/Si-Verhältnis. Dieser Prozess führt zum Absinken des pH-Werts im Porenwasser und wird langfristig zu einer vollständigen Auflösung der Zementminerale führen. Über den längerfristigen zeitlichen Verlauf dieser Reaktion ist wenig bekannt. Die Bewertung bekannter Reaktionsgeschwindigkeiten lässt allerdings den Schluss zu, dass die Zementdegradation durch diesen Prozess relativ schnell, d. h. in einigen hundert bis tausend Jahren erfolgen könnte. Neben den Wechselwirkungen zwischen Zement und den Zuschlagstoffen/Tonmineralen ist die Eisenkorrosion ein wichtiger Prozess im Zementnahfeld. Die Eisenkorrosionsprodukte können Einfluss auf die Zusammensetzung der Zementminerale haben und zur Bildung von Sekundärmineralen führen und können damit Auswirkungen auf die Sorption u. a. der Anionen haben. Die potenziellen Auswirkungen eisenreicher Abfälle in der Abfallgruppe 2 auf die Sorption sind wenig bekannt. Ebenfalls kann die Porosität des Zementnahfelds durch die Eisenkorrosionsprodukte beeinflusst werden.

Die Degradierung organischer Abfälle in einem Zementlager wird vermutlich überwiegend mittels Methanogenese erfolgen, wobei CO_2 und CH_4 freigesetzt werden. Für den Abbau hochmolekularer organischer Substanzen werden mindestens einige tausend Jahre, aber eher bis zu einigen zehner- oder gar hunderttausend Jahren erwartet. Der Einfluss der Radionuklidkomplexierung in einer zementhaltigen Umgebung, wird bei der Erstellung der entsprechenden Sorptionsdatenbasis, welche für die provisorische Sicherheitsanalyse angewandt wird, berücksichtigt.

Der Einfluss der Salinität des Porenwassers auf die Langzeitsicherheit der Tiefenlager wird als klein bis vernachlässigbar eingestuft. Soweit erforderlich wurde der Einfluss in der provisorischen Sicherheitsanalyse berücksichtigt (NAB 14-09).

Beurteilung des ENSI

Das ENSI beurteilt die Darstellung der Nagra bzgl. der wichtigen Prozesse für die Entwicklung des SMA-Nahfelds als nachvollziehbar und stufengerecht. Das ENSI beurteilt den von der Nagra dargestellten Wissensstand zu den relevanten Prozessen und den abgeleiteten Parameterwerten als stufengerecht und ausreichend für die Beurteilung in Etappe 2 SGT. Insbesondere erachtet das ENSI die in ENSI 33/115 zum Untersuchungsprogramm NTB 10-01 geforderte Abklärung hinsichtlich des Einflusses der Salinität auf die Langzeitsicherheit (Forderung 28) als erfüllt.

Ein wichtiges Indiz für die mögliche Geschwindigkeit der Mörtel/Beton-Degradation und für die Ausbreitung der alkalischen Zementporenwässer ist die Anzahl der zu erwartenden Porenwasseraustauschzyklen bis zur vollständigen Auflösung des Portlandits. Die Anzahl ist proportional zur hydraulischen Durchlässigkeit und zum hydraulischen Gradienten. Über eine Massenbilanzierung lässt sich abschätzen, dass etwa 200 Porenwasseraustauschzyklen notwendig sind, um den im Mörtel/Beton enthaltenen Portlandit vollständig zu lösen. Die im NTB 14-11 dokumentierte Portlanditauflösungsgeschwindigkeit ist dagegen sehr niedrig und führt selbst nach 1000 Porenwasseraustauschzyklen nur zu einer Verlagerung der Portlanditauflösungsfront um etwa 1 m. Das ENSI beurteilt diese Abschätzung als eher optimistisch und mit Experimenten wenig validiert, jedoch ist der aus der Massenbilanzierung resultierende Zeitraum für die Portlanditauflösung durch die Wechselwirkungen mit dem Porenwasser im Wirtgestein deutlich länger als der Betrachtungszeitraum und damit sind die Abschätzungen der Nagra für Etappe 2 SGT ausreichend.

Aus Sicht des ENSI und der EGT (EGT 2016) kann sich die von der Nagra beschriebene Alkali-Kieselsäure-Reaktion jedoch ungünstig auf die langfristige Zementstabilität auswirken. Dies kann zu einer sehr schnellen Reduktion des pH-Werts auf etwa 10 im Zementnahfeld des SMA-Lagers innerhalb von einigen hundert Jahren führen, wenn kieselsäurehaltige Zuschlagstoffe verwendet werden oder silikatreiche Materialien in den Abfällen vorkommen. Eine Abnahme des pH-Werts im Zementnahfeld kann z. B. zu einer erhöhten Korrosionsrate insbesondere für Eisen führen. Sowohl das ENSI als auch die Nagra sind der Ansicht, dass bisher nur wenige

Untersuchungen vorliegen, welche für die hier betrachteten Zeiträume relevant sind. Auf Grund der möglichen erheblichen Konsequenzen für das Nahfeldverhalten des SMA-Lagers sind die Alkali-Kieselsäure-Reaktion und die möglichen Konsequenzen für die Langzeitsicherheit in Etappe 3 SGT zu untersuchen. Zudem sind aus Sicht des ENSI und der EGT (EGT 2016) der Einfluss von Eisen und der Eisenkorrosionsprodukte auf die Prozesse im Zementnahfeld (z. B. Zementstabilität, Sorption, Porositätsänderungen und deren Einfluss auf die Gastransportfähigkeit sowie mikrobielle Aktivität) für Etappe 3 SGT vertieft zu untersuchen, insbesondere weil nicht nur in der Abfallgruppe 2 sondern auch in der Abfallgruppe 1 eisenreiche Abfallsorten enthalten sind.

Die Beschreibung der Nagra zur Degradierung organischer Abfälle und des möglichen Einflusses auf die Sorption ist nachvollziehbar und plausibel. Die Berücksichtigung der Radionuklidkomplexierung in den Sorptionsdaten wird in Kapitel 3.3.4 beurteilt.

2.3.2 Nahfeld des HAA-Lagers

Das Nahfeld des HAA-Lagers umfasst im Referenzkonzept die BE/HAA-Lagerbehälter, die Bentonitverfüllung und Betonverkleidung (die alternative Zementverfüllung wird in Kapitel 2.2 diskutiert) der Lagerstollen sowie das unmittelbare geologische Umfeld. Die radioaktiven Abfälle sind in massiven Endlagerbehältern verpackt, welche über lange Zeit einen vollständigen Einschluss der Radionuklide gewährleisten. Während dieser Zeit zerfällt ein Teil der bei der Einlagerung vorhandenen Radionuklide in stabile Nuklide. Nach dem Versagen des Behälters löst sich die Brennstoff-/Glasmatrix langsam auf und die Radionuklide werden diffusiv durch die Bentonitverfüllung und die Betonverkleidung der Lagerstollen ins angrenzende Wirtgestein freigesetzt. Diese Freisetzung wird beeinflusst durch die Abfalleigenschaften (z. B. Brennstoff-/Glasauflösung, Hüllrohrkorrosion), durch transportrelevante Eigenschaften des Barrierensystems (Behälterlebensdauer, Diffusion, Sorption, Löslichkeit) sowie durch Wechselwirkungen zwischen den Systemkomponenten (Eisenkorrosionsprodukte-Bentonit, Zement-Bentonit, Zement-Opalinuston).

Angaben der Nagra

Für die Endlagerbehälter der abgebrannten Brennelemente und verglasten hochaktiven Abfälle wird unter in situ-Bedingungen eine Lebensdauer von 10 000 Jahren oder mehr erwartet. Damit ist die in den provisorischen Sicherheitsanalysen angenommene Referenz-Lebensdauer von 10 000 Jahren gut abgestützt (NTB 14-03). Auch nachdem die Endlagerbehälter undicht geworden sind, stellen sie weiterhin eine Barriere für den Radionuklidtransport aufgrund des begrenzten Wasserzutritts zur Abfallmatrix und aufgrund der für viele Radionuklide günstigen Retentionseigenschaften der Behälterkorrosionsprodukte dar (NTB 14-03).

Die Grundlagen zur Festlegung der in den provisorischen Sicherheitsanalysen zu verwendenden Referenzwerte für die Auflösungsrate der Brennstoffmatrix und der Hüllrohre der Brennelemente sind im NAB 13-37 zusammengestellt und diskutiert. Für die Brennstoffauflösung wird eine konstante fraktionale Rate von 10^{-7} pro Jahr vorgeschlagen. Für die Auflösungsrate der Hüllrohre der BE wird von einer Zircaloy-Korrosionsrate von 10 nm/Jahr ausgegangen (NTB 14-03). Bei den abgebrannten Brennelementen wird zusätzlich auch ein spontan freigesetzter Anteil von besonders mobilen Radionukliden berücksichtigt («Instant Release Fraction», IRF) (NTB 14-03). Für die Freisetzung von Radionukliden aus verglasten hochaktiven Abfällen ist die Glasauflösungsrate relevant. Für Wiederaufarbeitungsabfälle aus La Hague wird eine Referenzauflösungsrate von $2.0 \cdot 10^{-4}$ g/(m² d) und aus Sellafield eine solche von $1.5 \cdot 10^{-3}$ g/(m² d) verwendet (NTB 12-01; NTB 14-03).

Bentonit als Verfüllmaterial ist ein wichtiges Element im Konzept der technischen Barrieren der Nagra für hochaktive Abfälle mit einer Vielzahl von Eigenschaften, die sich günstig auf die Rückhaltung der Radionuklide auswirken. Das Langzeitverhalten von Bentonit kann durch die Temperaturerhöhung in Folge der Zerfallswärme hochaktiver Abfälle oder durch chemische Wechselwirkungen mit Materialien wie Stahl oder Spritzbeton beeinträchtigt werden (NTB 13-02). Deshalb wird die Wärmeleistung der eingelagerten Behälter so weit beschränkt, dass der äussere Teil des Bentonits keine Temperatur deutlich über 100 °C erreicht (NTB 14-03). Die Nagra geht im NTB 12-01 von keiner nennenswerten Veränderung des Bentonits durch die erhöhte Temperatur aus. Die Temperatur im Opalinuston bleibt auch bei grösserer Lagertiefe unter 100 °C und hat daher keine

Bedeutung für die Mineralumwandlung im Opalinuston. Im aktuellen Ausbaurkonzept des HAA-Lagers geht die Nagra von einem Spritzbetonausbau aus, welcher eine Dicke von höchstens 30 cm aufweisen soll (NAB 16-42). Für die Betrachtung der Auswirkungen im Nahfeld wurde von einer 15 cm starken Spritzbetonschicht ausgegangen (NTB 12-01).

Die an den zementhaltigen Spritzbeton angrenzende Bentonit-Verfüllung wird durch die pH-Fahne langsam und lokal degradiert (Bentonit-Zement-Wechselwirkung). Die Ausdehnung dieser Zone ist gering (ca. 20 cm), insbesondere auch, weil der Einsatz von «Niedrig-pH»-Zement vorgesehen ist. Das Quellvermögen wird in dieser Zone lokal stark reduziert. Hingegen wird das Radionuklid-Rückhaltevermögen bzw. -Transportverhalten (Sorption, Löslichkeitslimitierung, Diffusion) in dieser Zone gegenüber dem ursprünglichen Bentonit nur geringfügig verändert. Für den an Spritzbeton angrenzenden Opalinuston gelten sinngemässe Aussagen, allerdings sind die sicherheitstechnischen Auswirkungen auf Grund der grösseren Mächtigkeit der geologischen Barriere nicht von Belang (NTB 14-03). Im NTB 13-02 wird als realistischer Wert für die Bentonitdegradation innerhalb von 100 000 Jahren ein Wert von 2 cm und als pessimistischer Wert 20 cm angegeben.

Die Eisen-Bentonit-Wechselwirkung führt zur Bildung eisenhaltiger Doppelschichtsilikate, welche eine kleinere spezifische Oberfläche haben als die Ausgangsminerale. Dementsprechend haben eisenhaltige Schichtsilikate wie z. B. Chlorit und Biotit ein ca. 10-fach kleineres Sorptionsvermögen im Vergleich zu Montmorillonit (Bradbury et al. 2010; NTB 14-03). Nach aktuellem Wissensstand können der Umfang der Bentonitumwandlung durch die Eisenkorrosion und die genaue Art der Umwandlungsprodukte nicht vorhergesagt werden. Einfache Massenbilanzbetrachtungen mit einer Stahlkorrosionsrate von 1 µm/Jahr deuten darauf hin, dass mit den Endlagerbehältern genügend Eisen vorhanden ist, um in der Bentonitverfüllung etwa 70 % des Montmorillonits in Chamosit und 100 % des Montmorillonits in Berthierin in einem Zeitraum von 155 000 Jahren umzuwandeln. Die Eisen-Bentonit-Wechselwirkungen können daher nicht vernachlässigt werden (NTB 12-01).

Der Einfluss der Salinität des Porenwassers auf die Langzeitsicherheit der Tiefenlager wird als klein bis vernachlässigbar eingestuft. Soweit erforderlich wurde der Einfluss in der provisorischen Sicherheitsanalyse berücksichtigt (NAB 14-09).

Das für die Dosisberechnungen verwendete Nahfeldmodell der Nagra umfasst einen einzelnen BE- oder HAA-Behälter inkl. Lagerstollenverfüllung sowie das unmittelbare geologische Umfeld. Für die Lagerbehälter wird eine Lebensdauer von 10 000 Jahren angenommen. Die Mobilisierung der Radionuklide und allfällig relevanter stabiler Isotope aus der Abfallmatrix in eingedrungenes Porenwasser nach Behälterversagen erfolgt unter Berücksichtigung der langsamen Matrixauflösung und der elementspezifischen Löslichkeit. Der Radionuklidtransport in der Bentonitverfüllung eines BE-/HAA-Lagerstollens erfolgt radial diffusiv, unter Berücksichtigung der Sorption, der elementspezifischen Löslichkeit und des radioaktiven Zerfalls bzw. Aufbaus (NTB 14-03). Die berechnete Radionuklidfreisetzung aus dem Nahfeld liefert den Quellterm für die Transportmodellierung in der Geosphäre.

Beurteilung des ENSI

Das ENSI ist mit der Darstellung der Nagra bzgl. der relevanten Prozesse und der zeitlichen Entwicklung im Nahfeld des HAA-Lagers einverstanden. Das ENSI beurteilt den von der Nagra dargestellten Wissensstand zu den relevanten Prozessen und den abgeleiteten Parameterwerten als ausreichend für Etappe 2 SGT. Insbesondere erachtet das ENSI die in ENSI 33/115 zum Untersuchungsprogramm NTB 10-01 geforderte Abklärung hinsichtlich des Einflusses der Salinität auf die Langzeitsicherheit (Forderung 28) als erfüllt.

Beurteilt werden an dieser Stelle Aspekte der Lebensdauer der Endlagerbehälter, der Brennstoff- und Glasauflösung, der chemischen Veränderung des Bentonits sowie die modellhafte Umsetzung des HAA-Nahfeldes zur Berechnung der Radionuklidfreisetzung (Nahfeldmodell). Für das Nahfeld relevante, aber an anderer Stelle diskutierte Parameter umfassen das Radionuklidinventar (Kapitel 2.1), die Löslichkeitslimiten, die Sorptionskoeffizienten und die effektiven Diffusionskoeffizienten der Radionuklide (Kapitel 3.3) sowie die Porosität von Bentonit und Opalinuston (Kapitel 3.1).

Die basierend auf den Korrosionsraten für Stahl (Kapitel 3.4) abgeleitete Lebensdauer der Endlagerbehälter von 10 000 Jahren wird vom ENSI als plausibel beurteilt. Der von der Nagra gewählte Referenzwert für die fraktionale Auflösungsrate der Brennstoffmatrix von $1 \cdot 10^{-7}$ 1/a und der Hüllrohre von $3,3 \cdot 10^{-5}$ 1/a wird vom ENSI und von seinen Experten (ENSI 33/459) basierend auf den derzeit vorliegenden Daten ebenfalls als plausibel beurteilt. In ENSI 33/075 wird die Nagra aufgefordert, in den Dosisberechnungen eine gegenüber dem Referenzwert 100-fach höhere Auflösungsrate für Brennstoff und Hüllrohre zu berücksichtigen. Aus Sicht des ENSI ist damit die mögliche Bandbreite der Auflösungsrate unter anoxischen und reduzierenden Bedingungen im HAA-Nahfeld abgedeckt. Die von der Nagra angegebenen Werte für die Instant Release Fraction (IRF) beurteilt das ENSI als plausibel und nachvollziehbar. Das ENSI beurteilt die Auflösungsrate der Glasmatrix hochaktiver Abfälle aus der Wiederaufarbeitung pessimistisch. Berechnungen des ENSI zeigen aber nur einen geringen Einfluss der vom ENSI verwendeten höheren Auflösungsrate auf die Dosiskurven.

Basierend auf den vorliegenden Daten und eigenen Temperatursausbreitungsberechnungen beurteilt das ENSI die Darstellung der Nagra zur möglichen Illitisierung im Bentonit (Umwandlung von Montmorillonit in Illit) als nachvollziehbar. Der zu erwartende Einfluss der Temperatur auf die Umwandlung des Bentonits ist gering und die Dicke der an die Lagerbehälter angrenzende Umwandlungsschicht mit maximal 10 cm (NTB 13-02) konservativ abgeschätzt.

An der Grenzfläche zwischen der Bentonitverfüllung der Lagerstollen und der Stollenverkleidung aus Spritzbeton kommt es zu einer Degradierung des Bentonits als Folge der Bentonit-Zement-Wechselwirkungen. Das ENSI beurteilt die gewählten Referenz- und oberen Eckwerte der Nagra für die Dicke der degradierten Bentonitschicht als zu niedrig. Basierend auf den Massenbilanzberechnungen, den Ungewissheiten im notwendigen Ausbau, den Berechnungen der Nagra im NTB 12-01 und der Berücksichtigung von Portlandzement als eventuell notwendige Ausbauvariante geht das ENSI im Referenzszenario davon aus, dass bis zu 10 cm des Bentonits degradieren. Im pessimistischen Szenario nimmt das ENSI auf Grund der bisher fehlenden Berücksichtigung von Temperatureffekten auf die chemischen Reaktionen und des möglicherweise durch die lokalen Verhältnisse erforderlichen stärkeren Ausbaus der HAA-Lagerstollen an, dass es zur Degradation von bis zu 35 cm kommen kann. Für die Etappe 3 SGT empfiehlt das ENSI, die Eignung des gering-alkalischen Spritzbetons als Ausbaumaterial vertieft zu untersuchen. Die möglichen Auswirkungen der Zement-Bentonit-Wechselwirkungen werden durch die Nagra in laufenden Forschungsprojekten (z. B. Mont Terri Experiment CI, Cement-Clay-Interaction) thematisiert. Diese sollten mit Langzeitexperimenten mit erhöhten Temperaturen ergänzt werden, um die Bandbreite der Auswirkungen auf die Bentonitumwandlung besser abschätzen zu können.

Durch die Korrosion des Stahls der Endlagerbehälter, der Schienen und Ausbauten der Lagerstollen wird Eisen(II) freigesetzt. Dieses kann durch Eisen-Bentonit-Wechselwirkung zu einer Umwandlung des Montmorillonits in z. B. Chlorite oder Berthierin führen. Ergebnisse von Carlson et al. (2007) deuten darauf hin, dass umfangreiche Wechselwirkungen zwischen Eisen und Bentonit unter Lagerbedingungen möglich sind (ENSI 33/459). Das ENSI hat in seinen Abschätzungen im Gegensatz zur Nagra den Referenzwert der Stahlkorrosionsrate berücksichtigt und auch dessen Bandbreite einfließen lassen (Kapitel 3.4). Mit einer höheren Stahlkorrosionsrate erscheint es möglich, dass basierend auf der Massenbilanz der gesamte Montmorillonit bereits nach 15 000 Jahren (Stahlkorrosionsrate $5 \mu\text{m}/\text{Jahr}$) bzw. nach 36 000 Jahren (Stahlkorrosionsrate $2 \mu\text{m}/\text{Jahr}$) in Berthierin umgewandelt sein könnte (ENSI 33/459). Dies würde mit dem Verlust der Quellfähigkeit und der Reduktion der Sorptionskapazität des Bentonits einhergehen. Die Abschätzungen sind vermutlich sehr konservativ, allerdings sind die Eisen-Montmorillonit-Wechselwirkungen für Etappe 3 SGT noch nicht ausreichend gut verstanden. Für Etappe 3 SGT sind die Wechselwirkungen zwischen Eisenkorrosionsprodukten und Tonmineralen vertieft zu untersuchen. Dazu gehören z. B. Experimente und reaktive Stofftransportmodellierungen, die auch die erhöhten Temperaturen im Nahfeld berücksichtigen.

Das ENSI hat die Nahfeldfreisetzung der dosisdominierenden Radionuklide $^{14}\text{C}_{\text{org-c}}$, $^{14}\text{C}_{\text{org}}$, ^{36}Cl , ^{129}I , ^{79}Se , und ^{40}K aus abgebrannten Brennelementen, verglasten hochaktiven Abfällen und langlebigen mittelaktiven Abfällen mit eigenen Modellberechnungen überprüft. Dies erfolgte für den Referenzfall, für Fälle mit erhöhter Brennstoff- bzw. Glasauflösungsrate (ENSI-Fall f, Kapitel 5.2), für Fälle mit erhöhten Diffusionskoeffizienten (ENSI-Fall b & b*) und für eine erhöhte IRF im Fall von ^{36}Cl . Basierend auf eigenen Berechnungen kann das ENSI die im NAB 14-36 (EDR) dokumentierte Nahfeldfreisetzung der Nagra für hochaktive Abfälle nachvollziehen.

Zusammenfassend hält das ENSI fest, dass für Etappe 3 SGT insbesondere der Einfluss gekoppelter Prozesse auf das HAA-Nahfeld sowie der Einfluss erhöhter Temperaturen auf die chemischen Prozesse im HAA-Nahfeld darzulegen und abdeckend zu berücksichtigen sind.

2.4 2D-Seismik: Processing und Interpretation

Ein wichtiger Bestandteil des Untersuchungsprogramms in Etappe 2 SGT waren die 2D-reflexionsseismischen Untersuchungen. Die in Etappe 2 SGT zur Verfügung stehende Seismik-Datengrundlage umfasst einen bereits vorgängig vorhandenen, vollständig reprozessierten Datensatz (68 Seismikprofile mit einer Gesamtlänge von rund 1300 km) und einen in der 2D-Seismik-Kampagne 2011/12 neu aufgenommenen Datensatz (20 Seismikprofile mit einer Gesamtlänge von ca. 300 km).

Durch die Ergebnisse der 2D-Seismik und deren Interpretation können geologisch-tektonische Elemente identifiziert und die Tiefenlage der Horizonte und deren Ungewissheiten abgeschätzt werden. Diese bilden eine wichtige Grundlage für die Abgrenzung der Lagerperimeter, die lokale Überarbeitung der geologischen Schichtmodelle in den Standortgebieten und die Beurteilung der geologisch-tektonischen Situation in der Nordschweiz.

Angaben der Nagra

Der aus Etappe 1 SGT zur Verfügung stehende Datensatz wurde in Etappe 2 SGT reprozessiert, durch neue Seismikprofile ergänzt und integrativ interpretiert. Dies führte zu einer wesentlichen Verbesserung der seismischen Datenlage in den Standortgebieten der Nordschweiz. Die Hauptziele der 2D-Seismik sind (1) die Verifikation und Präzisierung des Verlaufs von regionalen Störungszonen, (2) Information zu anordnungsbestimmenden Störungen innerhalb der Standortgebiete und (3) die Vertiefung des regionalen kinematisch-tektonischen Verständnisses um die HAA-Gebiete Jura Ost und Nördlich Lägern. Als zusätzliche Ziele wurden die Quantifizierung der Ungewissheiten der Tiefenlage und Mächtigkeit der Wirtgesteine, die Verifikation von Verlauf und Tiefe der wichtigsten quartären Felsrinnen, die Identifikation von Faziesübergängen (z. B. im 'Braunen Dogger'), die Verbesserung des Verständnisses des Permokarbondrogs und Feldparameterstests für zukünftige 3D-Seismik-Kampagnen formuliert.

Die im Rahmen der Reprozessierung angewandten Bearbeitungssequenzen trugen zur Verbesserung des seismischen Abbilds der älteren Profile in der Nordschweiz bei. Die Datenverarbeitung zur 2D-Seismik 2011/12 wurde weitgehend analog derjenigen der Reprozessierung durchgeführt (NAB 13-10; NAB 13-09) und führte meist zu sehr guter Abbildungsqualität (NTB 14-02-II). Insgesamt wurde dadurch die Vergleichbarkeit zwischen den nur mit 2D-Seismik untersuchten Standortgebieten und dem bereits mit 3D-Seismik überdeckten Gebiet Zürich Nordost verbessert. Im Standortgebiet Wellenberg zeigte die Reprozessierung der seismischen Profile aufgrund der komplexen geologischen Struktur des Untergrunds und des schlecht bestimmbar Geschwindigkeitsmodells insgesamt keine verlässlichere Abbildung von geologischen Strukturen, weshalb auf eine Neubearbeitung aller seismischen Linien verzichtet wurde.

Als Ergebnis der seismischen Datenverarbeitung (NAB 13-10; NAB 13-09; NAB 13-80; NAB 14-34) liegen für die seismische Interpretation verschiedene Auswertungen der 2D-Seismikprofile vor (Pre-Stack-Zeitmigration (PSTM), Pre-Stack-Tiefenmigration (PSDM) und Tiefe-Zeit-Konversion (DTconv)). Zentral für die Umwandlung der Seismik von Zeit in Tiefe sind die zugrundeliegenden Geschwindigkeitsmodelle. Im Zuge der Reprozessierung der bestehenden 2D-Seismikdaten wurde zunächst ein provisorisches PSDM-Geschwindigkeitsmodell erarbeitet. Am Ende der Reprozessierung wurde in der Folge ein sogenanntes Depthing durchgeführt, bei dem Unstimmigkeiten zwischen den in Tiefe interpretierten Horizonten an Linienkreuzungen und an Bohrungen durch ein Editieren des PSDM-Modells korrigiert wurden. Das resultierende finale Geschwindigkeitsmodell aus der Reprozessierung wird als Depthing-Modell bezeichnet. Die Depthing-Geschwindigkeitsmodelle für die im Rahmen von Etappe 2 SGT neu aufgenommenen Profile wurden anschliessend ausgehend von Kreuzungspunkten mit reprozessierten Profilen mittels einer profilbezogenen Interpolation abgeleitet. All diese Bearbeitungsschritte trugen zu einer wesentlichen Verbesserung des seismischen Abbilds des Untergrunds der Nordschweiz und zur Homogenisierung des Datensatzes bei.

Die Interpretation des 2D- und 3D-Seismik-Datensatzes (NTB 14-02-II) bildet die Grundlage für die Abgrenzung regionaler geologischer Elemente. Die resultierenden seismischen Markerhorizonte Top Lias (entspricht Basis Opalinuston), Basis Malm und der modellierte seismischen Hilfshorizonte Near-Top Opalinuston und Near-Top Effinger Schichten bilden eine wichtige Grundlage sowohl für die geologischen Profilschnitte (NAB 14-105) als auch für die Tiefen- und Mächtigkeitskarten der Wirtgesteine in den Standortgebieten inklusive einer Abschätzung der diesbezüglichen Ungewissheiten. Die Konstruktion der lokalen Tiefenkarten der ausgewählten geologischen Schichtgrenzen erfolgt ausgehend von der Interpretation der seismischen Marker- und Hilfshorizonte entlang des 2D-Seismiknetzes.

Die regionalen tektonischen Elemente (NTB 14-02-II) werden vom gleichnamigen Indikator berücksichtigt. Ihnen wird bei der Abgrenzung der Lagerperimeter ausgewichen. Die lokalen strukturgeologischen Charakteristika der Standortgebiete insbesondere die Bedeutung von potenziell anordnungsbestimmenden tektonischen Elementen, wurden bei der Bewertung des Indikators «Platzangebot untertags» berücksichtigt (NTB 14-01). Die Nagra identifiziert Gebiete, welche im Einflussbereich von post-paläozoisch reaktivierten Grundgebirgsstörungen liegen und mehrheitlich mit dem Nordschweizer Permokarbondrog sowie mit Antiklinalstrukturen im Nahbereich des Faltenjuras (NTB 14-02-II) assoziiert sind als zu meidende tektonische Zonen. Diesen Zonen weicht die Nagra bei der Abgrenzung der Lagerperimeter ebenfalls aus.

Beurteilung des ENSI

Das ENSI und seine Experten haben die von der Nagra in der Etappe 2 SGT durchgeführte Datenverarbeitung und Interpretation der 2D-Seismik überprüft (ENSI 33/464). Das ENSI hält fest, dass die neuen und älteren 2D-seismischen Daten und deren geologische Interpretation eine für Etappe 2 SGT geeignete Datengrundlage zur Identifizierung der geologisch-tektonischen Elemente und der Tiefenlage der Horizonte darstellt. Die Erarbeitung des 2D-Seismik-Datensatzes erfolgte nach Ansicht des ENSI mit hoher Sorgfalt und die angewandten Techniken entsprechen grundsätzlich dem heutigen Stand von Wissenschaft und Technik. Das ENSI erachtet die in ENSI 33/115 zum Untersuchungsprogramm NTB 10-01 geforderte Abklärung hinsichtlich der möglichen Fortsetzung der Born-Engelberg-Antiklinale nach Osten im Standortgebiet Jura-Südfuss (Forderung 9) mit den vorliegenden Arbeiten als erfüllt.

Das ENSI und seine Experten halten fest, dass die Ergebnisse aufgrund der sorgfältigen Bearbeitung der statischen Korrekturen, der Rauschunterdrückung und der Anwendung unterschiedlicher Stapelungs- und Migrationsmethoden gegenüber Etappe 1 SGT ein deutlich verbessertes seismisches Abbild der regionalen tektonischen Elemente im Untersuchungsgebiet zeigen. Gemäss den Experten des ENSI zeigen die vorliegenden Resultate, dass die Störungsdetektion durch die neue, jedoch noch nicht allgemein etablierte CRS-Stapelung (Common-Reflection-Surface) nicht negativ beeinflusst wurde.

Nach Ansicht des ENSI bietet die 2D-Seismik in Zeit (Darstellung der Profile mit den Zweiweglaufzeiten) bereits wertvolle Informationen zur Kontinuität der Reflektoren sowie zur lateralen Lage und Frequenz von Störungen in den Standortgebieten. Um die Tiefenlage der Reflektoren und die Geometrie der Störungen zu erhalten, wird ein seismisches Abbild in Tiefe unter Berücksichtigung des Geschwindigkeitsfelds und der Bohrdaten erstellt. Das ENSI und seine Experten kommen zum Schluss, dass die Wahl der Methode für diese sogenannte Tiefenmigration eine für die Zielsetzung hohe Qualität des Abbilds liefert.

Die Entscheidung, das Geschwindigkeitsfeld nur über die reprozessierten Seismikprofile zu ermitteln, führt nach Ansicht der Experten zu keiner Verschlechterung des seismischen Abbilds. Die Experten des ENSI halten fest, dass es sich beim angewandten Depthing-Verfahren um eine ungewöhnliche Vorgehensweise im Rahmen einer seismischen Datenverarbeitung handelt. Das resultierende Tiefenmodell kann jedoch als ein Best-Case-Szenario für die Tiefenwandlung betrachtet werden. Bezüglich der Bestimmung der Ungewissheiten kommen das ENSI und seine Experten zum Schluss, dass bis auf die Abschätzung der Ungewissheiten in der Tiefenlage der Horizonte die Arbeiten dem Stand von Wissenschaft und Technik entsprechen. Aufgrund von Erfahrungswerten, von Vergleichen mit Bohrprognosen und tatsächlich erbohrten Teufen sowie basierend auf der Qualität der 2D-Seismik (Akquisition, Datenverarbeitung) erscheinen die von der Nagra ausgewiesenen, teilweise grossen Fehlerbandbreiten sehr konservativ. Deshalb erachtet das ENSI die vorliegende Fehlerabschät-

zung als abdeckend. Aufgrund dieser sehr konservativen Betrachtung berücksichtigt das ENSI bei seiner Betrachtung ebenfalls die Tatsache, dass das resultierende Tiefenmodell als Referenzwert für die Tiefenlage der Markerhorizonte angesehen werden kann und dass der allfällige Fehler in der Tiefenlage zu einem gewissen Teil einer Normalverteilung folgt. Folglich ist die Wahrscheinlichkeit, dass die Tiefenlage den unteren oder oberen Eckwert erreicht, gering.

Das ENSI und seine Experten kommen zum Schluss, dass die Bearbeitung mittels etablierter, standardisierter Verfahren und die Verwendung neuerer Abbildungstechniken zu einem harmonisierten Datensatz geführt hat. Die Vergleichbarkeit der Ergebnisse, insbesondere bezogen auf die Informationen über den Horizont «Top Lias» in den Nordschweizer Standortgebieten ist im Wesentlichen gegeben. Den Vergleich des Standortgebiets Zürich Nordost, für welches auf eine 3D-Seismik zurückgegriffen werden kann (NTB 00-03), mit den anderen Standortgebieten der Nordschweiz sieht das ENSI als belastbar an, da mit der 2D-Seismik die regionalen Störungselemente verlässlich identifiziert werden können und der Mehrwert durch die 3D-Seismik vor allem in der genaueren Identifizierung der zu meidenden tektonischen Zonen und der anordnungsbestimmenden Störungen liegt.

Aufgrund der Ergebnisse der Reprozessierung der 2D-Seismik-Daten im Standortgebiet Wellenberg kann das ENSI den Entscheid der Nagra nachvollziehen, dass eine Reprozessierung weiterer Daten und eine Akquisition neuer 2D-Seismikdaten hinsichtlich der Abgrenzung eines geeigneten Lagerperimeters keinen Mehrwert bieten würde.

Aus Sicht des ENSI ist die vorliegende Interpretation der seismischen Daten (NTB 14-02-II und weiterführende Referenzen) von hoher Qualität. Sie erfolgte nach Stand von Wissenschaft und Technik und ist grundsätzlich stufengerecht. Die Lokationen und die Verläufe der regionalen Störungszonen wurden mit der vorliegenden 2D-Seismik vollständig erfasst. Hinsichtlich der Interpretation der zu meidenden tektonischen Zone im Standortgebiet Nördlich Lägern und der Verwendung der anordnungsbestimmenden Störungen für die Abschätzung des Platzbedarfs (Kapitel 5.1 und 6.1) kommt das ENSI zu anderen Ergebnissen.

Das ENSI sieht es als sicherheitsgerichtet an, tektonischen Elementen im Einflussbereich von post-paläozoisch möglicherweise reaktivierten Grundgebirgsstörungen auszuweichen. Diese zu meidenden tektonischen Zonen sind für die Abgrenzung der Lagerperimeter in den Standortgebieten Zürich Nordost und Nördlich Lägern von grosser Bedeutung. Die diesbezügliche südliche Abgrenzung des Lagerperimeters in Zürich Nordost kann das ENSI aufgrund der vorliegenden Daten aus der Gravimetrie und der 2D- und 3D-Seismik nachvollziehen. Für die Einengung ist es wichtig, dass die Ergebnisse auch unter Berücksichtigung der Ungewissheiten Gültigkeit haben (ENSI 33/154). Bei der Beurteilung der zu meidenden tektonischen Zone in Nördlich Lägern ist deshalb klar zwischen belastbaren Daten und konzeptuellen Überlegungen zu unterscheiden. Die Abgrenzung der zu meidenden tektonischen Zone durch die Nagra stellt nach Ansicht des ENSI eine mögliche, jedoch keine zwingende Abgrenzung dar (Abbildung 2). Das ENSI vermutet wie die Nagra, dass der Bereich aufgrund der langsam gegen Norden aufsteigenden Schichtpakete zur Siglistorf-Antiklinale stärker geneigte Schichten besitzt und vermutlich stärker tektonisiert ist. Aus Sicht des ENSI kann jedoch die zu meidende tektonische Zone im Norden aufgrund der vorliegenden Daten weder exakt abgegrenzt, noch der Grad der tektonischen Zergliederung (und somit die Bedeutung für die geologische Langzeitstabilität) belastbar belegt werden. Eine 3D-Seismik im Rahmen der Etappe 3 SGT würde es bezüglich des Grads und der räumlichen Ausdehnung der Tektonisierung in Nördlich Lägern erlauben, die vorhandenen Modellvorstellungen zu präzisieren (analog dem Vorgehen in Zürich Nordost).

Die aus der vorliegenden regionalen 2D-Seismik bestimmten, anordnungsbestimmenden Störungen werden aufgrund des Linienabstandes der Seismiklinien von ca. 2 km weder vollständig erfasst noch bezüglich deren Verwerfungsrichtung oder Orientierung genau bestimmt (Abbildung 2 als Beispiel für Nördlich Lägern). Das ENSI begrüsst grundsätzlich den von der Nagra aufgrund dieser Einschränkungen gewählten Ansatz, die Frequenz der Störungen statistisch zu simulieren, hält indessen fest, dass die Ergebnisse für die Abschätzung des Platzbedarfs auf Basis der vorliegenden Datengrundlage nicht quantitativ belastbar sind (eine detaillierte Begründung findet sich in ENSI 33/464).

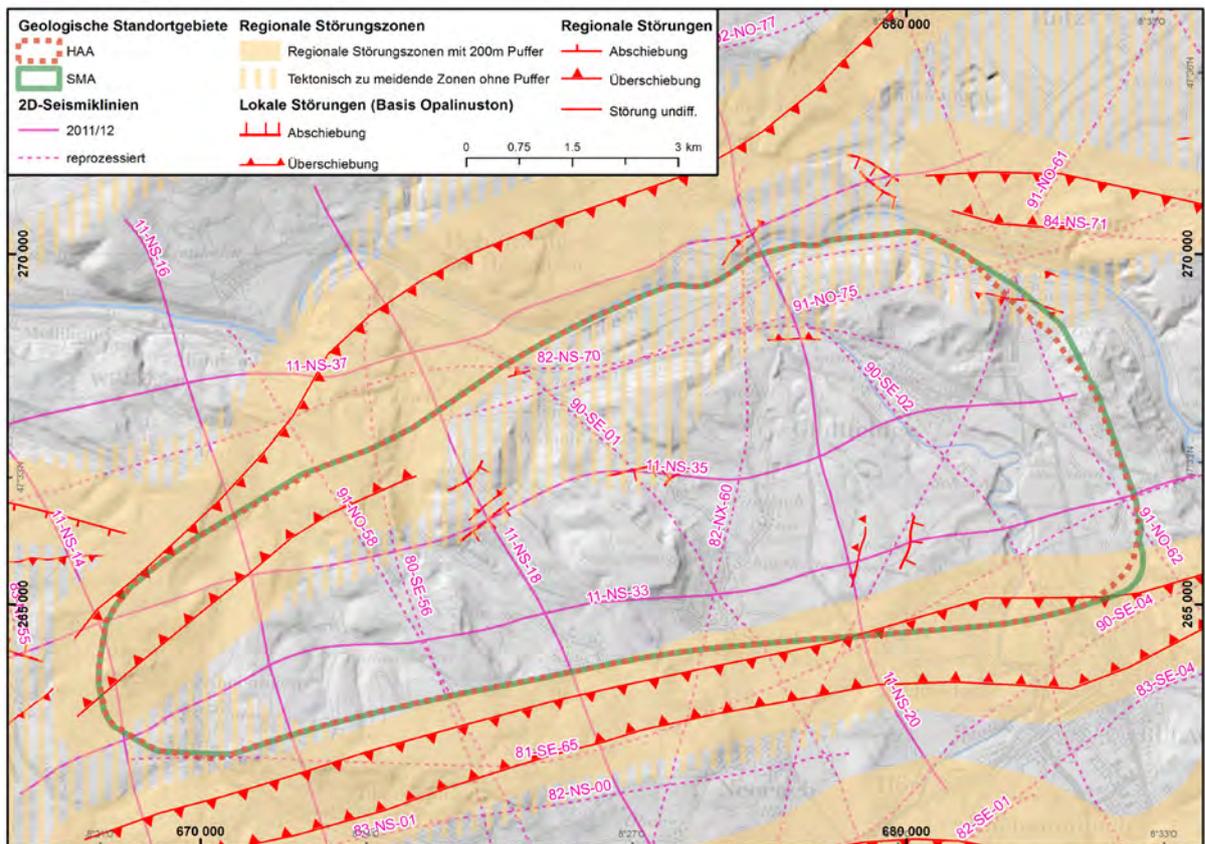


Abbildung 2: Übersicht über die von der Nagra identifizierten tektonischen Elemente für das Standortgebiet Nördlich Lägeren mit dem Verlauf der regionalen Störungen (rote Linien mit Überschiebungssignatur) inklusive Sicherheitsabständen (orange), der zu meidenden tektonischen Zonen (orange-schraffiert) und lokalen Störungen.

Für die Beurteilung der 2D-Seismik hinsichtlich der regionalen kinematisch-tektonischen Verhältnisse um die HAA-Gebiete Jura Ost und Nördlich Lägeren, der Verifikation von Verlauf und Tiefe der wichtigsten quartären Felsrinnen (Kapitel 2.6.3), der Identifikation von Faziesübergängen (z. B. im 'Braunen Dogger') (Kapitel 3.1.2), der Verbesserung des Verständnisses des Permokarbondrogs und Feldparameterstests für zukünftige 3D-Seismik-Kampagnen wird auf ENSI 33/464 verwiesen.

2.5 Herleitung der Mächtigkeit

Die Angaben zur Mächtigkeit der lithofaziellen Einheiten der Wirt- und Rahmengesteine in den Standortgebieten werden in Etappe 2 SGT für die geologische Konzeptualisierung (Kapitel 3.1 und 3.2), die Modellkonzepte für die Radionuklidenausbreitung (Kapitel 3.3), die Abgrenzung der Lagerperimeter (Kapitel 5.1), die Dosisberechnungen (Kapitel 5.2) und die qualitative Bewertung sowie die Identifikation eindeutiger Nachteile (Kapitel 5.3 und 6.1) herangezogen. Im vorliegenden Kapitel wird die Datengrundlage zur Mächtigkeit der Wirt- und Rahmengesteine beurteilt.

Angaben der Nagra

Die Mächtigkeiten der lithofaziellen Einheiten sind im NTB 14-01 für die verschiedenen Wirtgesteine und Standortgebiete der Nordschweiz zusammengestellt. Diese Angaben wurden aufgrund der gemessenen Mächtigkeiten in Bohrungen und Aufschlüssen innerhalb und in der weiteren Umgebung der Standortgebiete und aufgrund von geologischen Überlegungen abgeschätzt (NTB 14-02-II). Dabei wurden auch die standortspezifischen Mächtigkeitskarten, welche vor allem auf reflexionsseismischen Analysen beruhen, konsultiert.

Die Karten der vertikalen Mächtigkeiten für die Wirtgesteine innerhalb der Standortgebiete wurden aus den modellierten (nicht geglätteten) Tiefenkarten errechnet. Die Konstruktion der lokalen Tiefenkarten erfolgte ausgehend von der Interpretation der entsprechenden seismischen Marker- und Hilfshorizonte entlang des in Etappe 2 SGT verdichteten 2D-Seismiknetzes (Kapitel 2.4). Für die Konstruktion dieser Tiefenkarten wurden allgemein nur solche Bohrungen genutzt, bei denen die Tiefenangaben der einzelnen Horizonte aufgrund der vorhandenen Bohrberichte verifiziert werden konnten und deren Angaben deshalb im Vergleich zu den Tiefenangaben aus der Seismik (NAB 14-34) mit deutlich geringeren Ungewissheiten behaftet sind (NTB 14-02-II). Die aktuellen Mächtigkeitskarten basieren somit zwischen den Bohrungen und Aufschlüssen auf seismischen Daten. Diese Mächtigkeitskarten wurden jedoch nicht direkt für die Bewertung verwendet.

Für das Untersuchungsgebiet in der Nordschweiz wurde das in Etappe 1 SGT erstellte regionale Schichtmodell (NTB 08-04) unter Berücksichtigung der in Etappe 2 SGT erweiterten Datenlage im Bereich der fünf in der Nordschweiz gelegenen geologischen Standortgebiete verfeinert. Für das Standortgebiet Wellenberg wurde ein lokales 3D-Modell mit den relevanten geologischen Grenzflächen erstellt (NAB 14-33).

Die Referenzwerte der Mächtigkeiten der lithofaziellen Einheiten in einem Standortgebiet stützen sich auf den «best guess», d. h. auf die zuverlässigsten und qualitativ guten Daten (meistens eine Bohrung in der Umgebung) ab. Die oberen und unteren Eckwerte werden aus allen zur Verfügung stehenden Daten abgeschätzt (NAB 17-01, Fragen 15 und 17). Dies bedeutet, dass nicht alle Standortgebiete gleich grosse Ungewissheiten in der Abschätzung der Mächtigkeiten haben.

Beurteilung des ENSI

Das ENSI unterscheidet bei der Beurteilung der Mächtigkeiten zwischen Angaben aus Bohrdaten, Angaben aus seismischen Profilen und Interpolationen zwischen den seismischen Profilen. Während die Angaben aus den Bohrungen zur Tiefenlage praktisch eine Genauigkeit im Meter-Bereich aufweisen, sind die Angaben zur Genauigkeit entlang der seismischen Profile als Erwartungswert mit eher konservativen Abschätzungen hinsichtlich der Ungewissheiten für die Tiefenlage zu verstehen (Kapitel 2.4). Aufgrund der vorliegenden Datenbasis erachtet das ENSI es als zielführend, dass sich die Angaben zu den Mächtigkeiten (insbesondere für die Wirt- und Rahmengesteine) hauptsächlich auf belastbare Bohrungs- und Aufschlussdaten abstützen.

Nach Einschätzung des ENSI und seiner Experten (ENSI 33/464) basieren die zwischen den seismischen Profilen berechneten Tiefenlagen mit Ausnahme jener im Standortgebiet Zürich Nordost, in welchem die bereits vorhandene 3D-Seismik berücksichtigt werden konnte, ausschliesslich auf mathematischen Interpolationen. Das ENSI kommt zum Schluss, dass die Verwendung des seismisch schlecht abbildbaren Horizonts am Übergang des Opalinustons zum 'Braunen Dogger' («near Top Opalinuston») wegen der grossen Unschärfe für eine Abschätzung der Mächtigkeit des Opalinustons gegenüber den Mächtigkeitsinformationen aus Bohrungen keinen Mehrwert bietet. Für die Abschätzung der Mächtigkeiten der anderen Wirtgesteine bzw. der Rahmengesteine in der Nordschweiz sind die Angaben aus den Mächtigkeitskarten grundsätzlich ebenfalls mit Ungewissheiten verbunden. Daher zieht das ENSI für die Bewertung des Indikators 5 «Mächtigkeit» für die Standortgebiete der Nordschweiz nur Bohrlochdaten heran.

Nach Ansicht des ENSI zeigen die modellierten Tiefenkarten und die daraus hergeleiteten geglätteten Mächtigkeitskarten (NTB 14-02-I) eine räumliche Auflösung, welche sich aus der Dichte der seismischen Linien und der Güte des Geschwindigkeitsmodells nicht in dieser Genauigkeit begründen lassen. Entsprechende berechnete Tiefenlagen zwischen den seismischen Profilen beruhen ausschliesslich auf mathematischen Interpolationen und werden deshalb nicht direkt für die Bewertung des Indikators «Mächtigkeit» herangezogen werden.

Das ENSI kommt zum Schluss, dass die von der Nagra gewählte Ableitung der Mächtigkeiten des Wirtgesteinskörpers im Standortgebiet Wellenberg anhand des 3D-Modells, welches auf Basis von vorhandenen Bohrinformationen sowie geologischen Schichtausbissen modelliert wurde, für Etappe 2 SGT zielführend ist.

2.6 Geologisches Modell: Schichtmodell, Felsoberfläche und lokale Erosionsbasis

Um die aus Etappe 1 SGT resultierenden geologischen Standortgebiete einem sicherheitstechnischen Vergleich unterziehen zu können, werden in Etappe 2 SGT untertägige Lagerperimeter innerhalb der Standortgebiete abgegrenzt (Kapitel 5.1). Diese Abgrenzung basiert massgeblich auf den Lagerungsverhältnissen der geologischen Schichten sowie allfällig vorhandenen tektonischen Störungen im Untergrund. Der Schnittprozess wird mit Hilfe eines geographischen Informationssystems (GIS) umgesetzt. Hierzu werden die Grundlageninformationen aus Bohrungen, Seismikdaten und weiteren Quellen in digitalen Modellen wiedergegeben. Das Geologische Schichtmodell (Kapitel 2.6.1) bildet die räumliche Lage wichtiger Bezugshorizonte, wie der Ober- und Unterkanten von Gesteinsformationen sowie Mächtigkeitsangaben ab. Die Abgrenzung der Lagerperimeter erfolgt in Etappe 2 SGT ausschliesslich anhand des Bezugshorizonts Basis Opalinuston, welcher dem seismischen Markerhorizont Top Lias entspricht. Weitere für die Abgrenzung sowie für den sicherheitstechnischen Vergleich zentrale Bezugsniveaus bilden die Terrainoberfläche, die Felsoberfläche (Kapitel 2.6.2) sowie die lokale Erosionsbasis (Kapitel 2.6.3).

2.6.1 Geologisches Schichtmodell

Angaben der Nagra

Für die Nordschweiz wurde das in Etappe 1 SGT erstellte regionale Schichtmodell im Bereich der geologischen Standortgebiete aktualisiert. Die Bereiche der aktualisierten Tiefen- und Mächtigkeitskarten wurden standortspezifisch festgelegt, wobei die geologische Situation und die in Etappe 2 SGT erweiterte Datenlage (Bohrungs-/Bohrlochinformationen, interpretierte Seismik, bilanzierte geologische Profile und Informationen aus Aufschlüssen) mitberücksichtigt wurden. Aufbauend auf den Tiefenkarten wurden für die Wirtgesteine Opalinuston, 'Brauner Dogger' und Effinger Schichten Karten der vertikalen Schichtmächtigkeiten berechnet. Für die aktualisierten Tiefen- und Mächtigkeitskarten wurden in allen geologischen Standortgebieten der Nordschweiz die seismischen Markerhorizonte Top Lias (entspricht Basis Opalinuston), Basis Malm und die modellierten seismischen Hilfshorizonte Near-Top Opalinuston und Near-Top Effinger Schichten berücksichtigt (Kapitel 2.4 und NTB 14-02-II).

Die Tiefenlage der Schichtgrenze Basis Opalinuston unterliegt im Vergleich zur Etappe 1 SGT relativ starken Änderungen. So liegt diese in den geologischen Standortgebieten Südranden und Jura Ost z. T. deutlich flacher, im Standortgebiet Nördlich Lägern hingegen deutlich tiefer als bisher angenommen (NTB 14-02-II). Ungewissheiten bzgl. der Tiefenlage wurden nur für die Basis Opalinuston erarbeitet, da gemäss Vorgehen der Nagra nur dieser Horizont im Rahmen des sicherheitstechnischen Vergleichs für die Abgrenzung der Lagerperimeter und deren Bewertung verwendet wird (NTB 14-02-II). Die berechneten Mächtigkeitskarten zeigen z. T. grosse, kleinräumig auftretende Mächtigkeitschwankungen, die nicht durch die stratigraphische Korrelation der entsprechenden Gesteinsformationen impliziert werden. Ursächlich hierfür ist, dass die Karten mehrheitlich auf seismischen Daten beruhen und diese im Vergleich zu entsprechenden Informationen aus Bohrungen mit grösseren Ungewissheiten behaftet sind. Im geologischen Standortgebiet Nördlich Lägern ergeben sich so beispielsweise teils erhebliche Abweichungen. So weist das Schichtmodell eine vertikale Opalinustonmächtigkeit von z. T. über 140 m aus, wohingegen in der Bohrung Weiach nur 111 m Opalinuston erbohrt wurden. Ein Zusammenhang zwischen lokaler Mächtigkeitssteigerung und tektonischen Prozessen kann gegenwärtig nur vermutet werden (NTB 14-02-II). Für das geologische Standortgebiet Jura-Südfuss ergeben sich trotz der vergleichsweise geringen Tiefenlage des Opalinustons aufgrund des grossen Abstands zur nächstgelegenen, berücksichtigten Tiefbohrung etwas grössere Ungewissheiten für die Tiefenangaben seismischer Horizonte (NAB 14-34).

Im Standortgebiet Jura-Südfuss muss für den Opalinuston mit den geringsten Mächtigkeiten gerechnet werden. Aus den vorliegenden Mächtigkeitskarten des Wirtgesteins 'Brauner Dogger' geht hervor, dass im Standortgebiet Zürich Nordost eine mehrheitlich geringere Mächtigkeit im Vergleich zur in der Tiefbohrung Benken angetroffenen Mächtigkeit von 89 m vorherrscht. Im Gegensatz dazu zeigt sich, dass die in der Bohrung Weiach ermittelte Mächtigkeit von 77 m die durchschnittlichen Mächtigkeiten des 'Braunen Doggers' im Standortgebiet Nördlich Lägern eher unterschätzt. Die vertikale Mächtigkeit der Effinger Schichten wurde im geologischen

Standortgebiet Jura-Südfuss im Schichtmodell zusammen mit den Birnenstorfer Schichten als Wildegg-Formation abgebildet (NTB 14-02-II).

Für das geologische Standortgebiet Wellenberg wurde ein lokales 3D-Modell mit den relevanten geologischen Grenzflächen erstellt (NAB 14-33). Das Modell basiert auf neu erstellten Profilschnitten (NAB 12-04 Rev.1) sowie auf Bohrungsdaten und geologischen Karten. Die Ungewissheiten in den Profilschnitten übertragen sich entsprechend auf das geologische Modell.

Beurteilung des ENSI

Die von der Nagra zu Etappe 2 SGT überarbeiteten geologischen Schichtmodelle wurden vom ENSI und seinen Experten stichprobenartig überprüft (ENSI 33/452). Das ENSI beurteilt die Erweiterung und Verfeinerung der Datenbasis und die daraus abgeleiteten und aktualisierten Schichtmodelle in den geologischen Standortgebieten als stufengerecht und plausibel. Die lokal z. T. erheblichen Differenzen der Tiefenlage der Basis Opalinuston gegenüber Etappe 1 SGT (Abbildung 3) dokumentieren anschaulich die Anpassungen aufgrund der neuen Erkenntnisse aus der 2D-Seismik und aus neuen Bohrdaten.

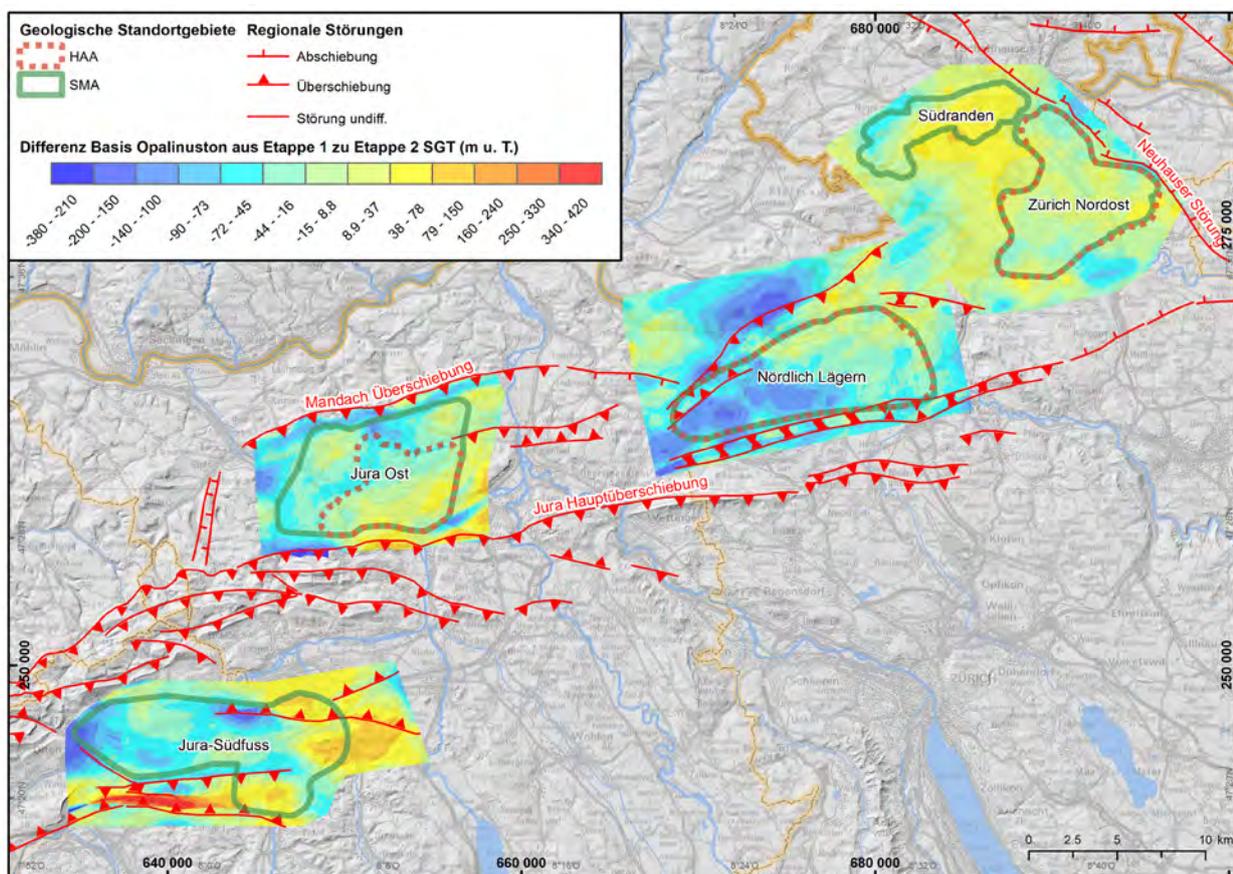


Abbildung 3: Vergleich der Tiefenlage der Basis Opalinuston in Etappe 2 SGT gegenüber Etappe 1 SGT. Gelb-, Orange- und Rottöne markieren Bereiche in denen das Schichtmodell der Etappe 2 SGT neu eine geringere Tiefenlage der Basis Opalinuston ausweist, blaue Bereiche spiegeln eine neu grössere Tiefenlage wider.

Die Abschätzung der Ungewissheiten bzgl. der Tiefenlage der Basis Opalinuston erfolgte zunächst entlang der vorhandenen 2D-Seismiklinien (NAB 14-34). Zur praktischen Anwendung im Rahmen des sicherheitstechnischen Vergleichs wurden die entsprechenden Informationen von der Nagra im Bereich der Standortgebiete zu flächendeckenden Rasterdatensätzen weiterverarbeitet (NTB 14-02-II). Die sich so ergebende Ungewissheit für die Tiefenlage der Basis Opalinuston in den Standortgebieten liegt zwischen 20 und 165 m, wobei im Standortgebiet Nördlich Lägern die grössten und in den Standortgebieten Jura Ost und Zürich Nordost die

geringsten Ungewissheiten vorhanden sind (NTB 14-02-II; Details siehe auch Kapitel 2.4). Die Abgrenzung untertägiger Lagerperimeter erfolgt auf Basis des Bezugsniveaus Basis Opalinuston auf Referenztiefe. Die in den Standortgebieten flächendeckend ausgewiesenen Ungewissheiten werden bei der Abgrenzung alternativer Lagerperimeter (untiefere bzw. tiefere Lage des Wirtgesteins) berücksichtigt (Kapitel 5.1). Aus Sicht des ENSI und seiner Experten ist das Vorgehen der Nagra im Umgang mit den Ungewissheiten aus der Seismik inhaltlich nachvollziehbar und zweckmässig für die Etappe 2 SGT.

Für das geologische Standortgebiet Wellenberg wurde ein geologisches 3D-Modell neu erstellt, welches vor allem die Grenzflächen des Wirtgesteinskörpers umfasst und sich auf neueste geologische Interpretationen und tektonische Analysen abstützt. Das ENSI beurteilt das resultierende geologische Modell des Wellenbergs als inhaltlich nachvollziehbar und zweckmässig.

2.6.2 Modell der Felsoberfläche

Angaben der Nagra

In Etappe 2 SGT wurde das bestehende Modell der Felsoberfläche (digitales Höhenmodell (DHM) «Basis Quartär») aufgrund der erweiterten Datenlage überarbeitet und dem aktuellen Kenntnisstand angepasst (NAB 14-02). Aus dem DHM «Basis Quartär» lassen sich die folgenden generellen Aussagen ableiten: Ein Grossteil der heutigen Flüsse der Nordschweiz verläuft über weite Strecken über tiefen Rinnenstrukturen in der Felsoberfläche. Die Lockergesteinsmächtigkeiten dieser Rinnen betragen typischerweise 100 bis 300 m (NTB 14-02-III). Es kann dabei zwischen fluvialen Rinnen, welche zwar einzelne Auskolkungen aufweisen können, aber ansonsten ein kontinuierliches Gefälle aufweisen, und glazial übertieften Rinnen (abflusslose Becken) unterschieden werden. Die absoluten Tiefen dieser Rinnen sind häufig nicht nachgewiesen, können jedoch mit Hilfe von konzeptionellen Überlegungen abgeschätzt werden (NAB 14-02).

Das geologische Standortgebiet Zürich Nordost liegt im Bereich der westlichen Ausläufer des glazial übertieften Bodensee-Thur-Rinnensystems. Im Süden wird das Standortgebiet von der glazial übertieften Thurtal-Rinne begrenzt, welche mindestens bis 75 m ü. M. reicht. Mit dieser verbunden ist die Marthalen-Rinne, deren Ausmass aus der Interpretation der 3D-Seismik neu übernommen wurde. Ebenfalls aus der 3D-Seismik übernommen wurden die Niderholz-Rinne (zuvor unbekannt) und die Rudolfingen-Rinne (NAB 14-02).

In der Umgebung des geologischen Standortgebiets Nördlich Lägern liegen mehrere tiefe quartäre Rinnen. Im Osten reichen die nördlichen Ausläufer der Glatttal-Rinne in das Standortgebiet. Das aktualisierte Modell der Felsoberfläche zeigt verschiedene Generationen von oft übertieften, relativ schmalen Rinnen. Im Südwesten grenzt das glazial übertiefte Wehntal an das Standortgebiet. Für die westliche Hälfte des Standortgebiets Nördlich Lägern ist die Datenbasis zur Felsoberfläche relativ hoch. Für die nicht übertieften Täler in der Osthälfte des Standortgebiets Nördlich Lägern liegen ebenfalls viele Bohrungen vor. Die Basis Quartär der Glatttalrinne an der Südostgrenze des Standortgebiets und weiter südlich davon wurde ausser im Bereich der Talflanken bislang hingegen noch nicht durchteuft, so dass sich die Tiefenangaben des Modells aus konzeptionellen Überlegungen ergeben (NAB 14-02).

Das geologische Standortgebiet Jura Ost liegt als einziges nicht im Bereich von grösseren Rinnen mit mächtigen Quartärlagerungen. Beim Aaretal zwischen Schinznach und Brugg, sowie dem Rinikerfeld handelt es sich um fluviale Talabschnitte, welche nicht glazial übertieft sind. In den Nordwesten des Standortgebiets reicht das fluviatile Fricktal (Sissle und ihre Zuflüsse). Die Basis Quartär ist im Standortgebiet Jura Ost gut bekannt und durch Festgesteinsaufschlüsse sowie viele Bohrungen belegt (NAB 14-02).

Die Morphologie der Felsoberfläche im Bereich des geologischen Standortgebiets Jura-Südfuss wird von zwei quartären Tälern dominiert. Die westliche Hälfte des Gebiets durchzieht das Aaretal und in der östlichen Hälfte dominiert der nördliche Ausläufer des Suhretals. Sowohl Aare- als auch Suhretal sind im Bereich des Standortgebiets nicht übertieft. Im gesamten Standortgebiet liegen viele Bohrungen vor, so dass sich bezüglich der Basis Quartär ein weitgehend gesichertes Bild ergibt. Heute unbekannte Übertiefungen sind praktisch auszuschliessen (NAB 14-02).

Das Modell der Felsoberfläche im Standortgebiet Wellenberg mit dem Engelbergertal basiert auf diversen Bohrdaten, geologischen Karten sowie refraktionsseismischen Informationen. Aufgrund der Daten lässt sich eine glazial überprägte Talform von Grafenort talabwärts im Engelbergertal erkennen. Die Talform im oberen Talbereich weist dagegen auf eine starke Überprägung durch Wildbachprozesse hin. Die konstruierten Felsisohypsen lassen Rückschlüsse auf eine geringfügige glaziale Übertiefung im Bereich des geologischen Standortgebiets Wellenberg zu. Aus dem Bannalpgebiet, im Nordosten des Standortgebiets Wellenberg ist keine glaziale Übertiefung bekannt.

Beurteilung des ENSI

Basierend auf den Prüfergebnissen seiner Experten (ENSI 33/453; EGT 2016) beurteilt das ENSI die überarbeiteten Modelle der Felsoberfläche in der Nordschweiz und im Bereich des Standortgebiets Wellenberg als inhaltlich nachvollziehbar und grundsätzlich plausibel. Die Nagra identifiziert und visualisiert jedoch mit ihrem Vorgehen nur jene Täler als glazial übertieft, welche mindestens 50 m unter der lokalen Erosionsbasis liegen (NTB 14-01; NTB 14-02-III). Die Kenntnis über kleinere glaziale Rinnen erachtet das ENSI jedoch als wichtig hinsichtlich der Frage, wo eine allfällige zukünftige glaziale Tiefenerosion stattfinden könnte. Das ENSI betrachtet deshalb alle Rinnen, die unter die lokale Erosionsbasis reichen, als glazial übertieft.

Das ENSI und seine Experten anerkennen, dass die Herleitung eines flächendeckenden Modells der Felsoberfläche keine triviale Aufgabe ist und folglich ein gewisser, unvermeidbarer Interpretationsspielraum besteht. Das ENSI kritisiert jedoch, dass die Ungewissheiten der Grundlagedaten in der Dokumentation weder systematisch ausgewiesen noch diskutiert werden.

In Bezug auf nachfolgende Schritte im Sachplanverfahren erwartet das ENSI, dass (i) methodisch bedingte Ungewissheiten systematisch analysiert und ausgewiesen werden; (ii) weitere Grundlagedaten, wie z. B. Felsisohypsenkarten zur Basis von Deckenschottervorkommen berücksichtigt werden; (iii) bestehende Ungewissheiten vor allem betreffend Lage und Tiefe von glazial übertieften Rinnen innerhalb der geologischen Standortgebiete durch erdwissenschaftliche Untersuchungen minimiert werden.

2.6.3 Modell der lokalen Erosionsbasis

Angaben der Nagra

Die Beurteilung der geologischen Standortgebiete im Hinblick auf zukünftige Erosion erfolgt anhand von verschiedenen Indikatoren, die unterschiedliche Aspekte und Prozesse beurteilen. Dabei ist die lokale Erosionsbasis von grosser Bedeutung, sie entspricht dem Niveau der Hauptflüsse. Lokale fluviatile Prozesse und Hangprozesse stellen sich auf dieses Niveau ein und greifen nicht wesentlich darunter. Substantielle Erosion unter die lokale Erosionsbasis ist nur durch glaziale Tiefenerosion möglich.

Das Modell der lokalen Erosionsbasis wird basierend auf dem Modell der Felsoberfläche konstruiert und berücksichtigt das Niveau der tiefsten Paläoflusstäler. Folglich zeigt es nicht die heutige, sondern die tiefste in der Vergangenheit erreichte lokale Erosionsbasis an, unabhängig vom Alter dieser Rinnen. Im Hinblick auf Erosions-szenarien werden damit die leichte Erodierbarkeit von Lockergesteinen und die unter gegebenen Umständen rasche Rückerosion von Felsriegeln berücksichtigt. Aus diesem Arbeitsablauf ergibt sich für die Berechnung der lokalen Erosionsbasis ein Interpretationsspielraum, vor allem betreffend Auswahl der relevanten Täler, Interpolation dazwischen und Umgang mit übertieften Abschnitten.

Die Mächtigkeit der lokalen Topographie kann durch Abzug des Modells der lokalen Erosionsbasis von der heutigen Terrainoberfläche berechnet werden. Dabei zeigt sich, dass in den Standortgebieten Jura Ost, Südranden und im Westteil von Nördlich Lägern eine lokale Topographie von mindestens 100 m besteht, während sie in den Standortgebieten Zürich Nordost, Jura-Südfuss und im östlichen Teil von Nördlich Lägern grösstenteils kleiner ist. Durch Abzug des Modells der Felsoberfläche von der lokalen Erosionsbasis lassen sich die Bereiche mit glazialer Übertiefung abgrenzen.

Beurteilung des ENSI

Mit dem Modell der lokalen Erosionsbasis wurde eine neue Bezugsfläche entwickelt, welche im Wesentlichen die Höhenlage der tiefsten fluviatilen Rinnen in den Haupttälern auf das Gesamtgebiet extrapoliert. Das Vorgehen hierzu ist aus Sicht des ENSI inhaltlich nachvollziehbar und plausibel. Mit ihrem Vorgehen setzt die Nagra eine Empfehlung des ENSI, resp. seiner Experten aus Etappe 1 SGT um, welche die Berücksichtigung des Niveaus der Paläoflusstäler anstelle einer pauschaler Verwendung von Lockergesteinsmächtigkeiten für die Abgrenzung von glazial übertieften Rinnen beinhaltete (ENSI 33/063). Die Nagra konnte so den grössten Teil der durch glaziale Tiefenerosion entstandenen Rinnen identifizieren und visualisieren (Kapitel 2.6.2).

Bei der Erstellung des Modells kann die Festlegung der als Haupttäler zu interpretierenden Felsrinnen grosse Auswirkungen auf die resultierende Fläche der lokalen Erosionsbasis haben, was am Beispiel des geologischen Standortgebiets Jura Ost deutlich wird: Die Entscheidung, ob das Sissletal als Haupttal betrachtet wird oder nicht, hat gemäss Angaben der Nagra einen lokalen Niveauunterschied der Erosionsbasis von bis zu 100 m zur Folge. Eine Quantifizierung der Ungewissheiten der lokalen Erosionsbasis in den übrigen Standortgebieten erfolgt hingegen nicht. Da in den weiteren Betrachtungen der Nagra die Erosionsbasis eine zentrale Rolle einnimmt, kritisiert das ENSI die fehlende systematische Ausweisung und Diskussion von Ungewissheiten.

Zusammenfassend beurteilt das ENSI das Modell der lokalen Erosionsbasis als eine grundsätzlich sinnvolle Bezugsgrösse für weiterführende Analysen bzgl. glazialer Tiefenerosion, der Erstellung von Erosionsszenarien sowie deren Sensitivitätsbetrachtungen. Das Modell ist für Etappe 2 SGT stufengerecht, jedoch ist der erwartete konservative, sicherheitsgerichtete Charakter aufgrund der ungenügenden Betrachtung der Ungewissheiten zu hinterfragen (ENSI 33/452; EGT 2016). Das ENSI erwartet daher bei einer Weiterentwicklung des Konzepts der Erosionsbasis, dass eine Version zur Verfügung gestellt wird, welche im Hinblick auf das Standortwahlverfahren eindeutig konservativ ist.

2.7 Modellierung der hydrogeologischen Verhältnisse

Die hydrogeologischen Verhältnisse der Standortgebiete wurden unter Berücksichtigung der Ergebnisse numerischer Modelle im NTB 14-02-V aktualisiert und zusammengestellt. Mit dem 3-dimensionalen Regionalmodell der Nordschweiz und des angrenzenden Süddeutschlands werden die regionalen Grundwasser-Fliesssysteme untersucht. Das Regionalmodell liefert die hydraulischen Randbedingungen für die eingebetteten, feiner diskretisierten Lokalmodelle der potenziellen Standortgebiete. Diese dienen der Beurteilung der potenziellen Wirtgesteine im Zusammenhang mit der Wirksamkeit als hydraulische Barriere und im Hinblick auf konzeptionelle und parametrische Unbestimmtheiten. Für das Standortgebiet Wellenberg hat die Nagra die auf verschiedenen Skalen bestehenden hydrogeologischen Modelle (Regionalmodell, Blockmodell, Kavernenumfeldmodell) verwendet und die tiefere Platzierung der Lagerebenen berücksichtigt.

Angaben der Nagra

Die Geometrie des Regionalmodells beruht auf dem geologischen Modell 2012.1 (NAB 13-28) und beinhaltet auch die regionalen Störungszonen. Das Modell umfasst alle wesentlichen hydrogeologischen Einheiten vom Quartär bis zu den Gesteinen der Anhydritgruppe. Betrachtet werden insbesondere die regionalen Fliesssysteme oberhalb und unterhalb der potenziellen Wirtgesteine: Malm-Aquifer, Hauptrogenstein-Aquifer und Muschelkalk-Aquifer. Der Keuper, der lokal als Aquifer wirksam sein kann, wird im Regionalmodell als 10 Meter mächtige hydraulische Einheit berücksichtigt.

Die hydraulischen Eigenschaften der hydrogeologischen Einheiten basieren auf der Datenkompilation von NAB 13-43 und weiterer Literatur. Die in Bohrungen gemessenen hydraulischen Potenziale werden für einen Vergleich mit den Resultaten des stationären hydrogeologischen Modells verwendet.

Die Ergebnisse des regionalen Modells (NAB 13-23) fokussieren auf die Auswirkungen der regionalen Störungen auf die Grundwasser-Fliesssysteme. Dabei werden drei hydrogeologische Szenarien unterschieden:

- 1) Der Versatz an den Störungen verändert den Durchflussquerschnitt der hydrogeologischen Einheiten. Typische Exfiltrationszonen von Malm-, Hauptrogenstein-, Keuper- und Muschelkalk-Aquiferen liegen in den Flusstälern, wo das Vorflutniveau durch die Flüsse oder die Lockergesteins-Grundwasserleiter definiert wird. Das Grundwasser stammt meist von den Infiltrationsgebieten im Falten- und Tafeljura wie auch von der Südgrenze des Modells. Der Betrag des hydraulischen Gradienten über den Opalinuston liegt hier meist unter 0.5 m/m.
- 2) Abdichtende Störungzonen separieren kleinräumige Fließsysteme und führen in den tiefen Aquiferen (beispielsweise Muschelkalk) zu langen Exfiltrationspfaden. Verbunden damit sind hohe hydraulische Gradienten über den Opalinuston mit Beträgen meist kleiner als 1 m/m.
- 3) Hydraulisch aktive Störungen führen zu vertikalen hydraulischen «Kurzschlüssen» zwischen verschiedenen geologischen Einheiten und zu deutlichen Verschiebungen in den In- und Exfiltrationszonen; letztere liegen dort, wo die Störungen grosse Flusstäler queren. Die hydraulischen Gradienten betragen in diesem Fall weniger als 0.5 m/m.

Die Auswertung der Modellberechnungen in Bezug auf das regionale Fließsystem erfolgt auf der Basis hydraulischer Druckverteilungen (Iso-Linien-Darstellung) und der Ergebnisse des «Particle Tracking».

Hinsichtlich der Sensitivität des Modells gegenüber Eingabeparametern und Annahmen zeigt sich im regionalen Massstab ein robustes Modellverhalten bezüglich der Randbedingungen an der südlichen Modellgrenze und der Verkarstungstiefe von Malm und Hauptrogenstein-Aquifer. Eine moderate Sensitivität existiert bezüglich der Grundwasserneubildungsbedingungen, der Durchlässigkeit der quartären Lockergesteine und der Verkarstungstiefe im Muschelkalk-Aquifer. Das Modell reagiert stark auf die Durchlässigkeitsverteilung in den wichtigsten Aquiferen; dies beeinflusst insbesondere die Grundwasserflüsse. Die maximalen vertikalen Gradienten über den Opalinuston liegen in den Sensitivitätsanalysen bei Werten nahe 1 m/m.

Das «Particle Tracking» liefert überwiegend unbefriedigende Ergebnisse, weil viele Partikel in einem derart komplexen Modell aus numerischen Gründen die Modellgrenze nicht erreichen.

Mit den hydrogeologischen Lokalmodellen wurden die Wechselwirkung zwischen regionalen und lokalen Aquifersystemen, die Identifikation potenzieller Exfiltrationspfade und die Abschätzung der standortspezifischen hydraulischen Gradienten in den Wirtgesteinen beurteilt. Sie umfassen alle wesentlichen hydrogeologischen Einheiten vom Quartär bis zu den Gesteinen der Anhydritgruppe. Störungen von regionaler Bedeutung - Neuhäuser Störung (Zürich Nordost und Südranden), Teile der Mandach-Überschiebung, Siglistorf Antiklinale und Baden-Irchel-Herdern Lineament (Nördlich Lägern), Jura-Hauptüberschiebung und Mandach-Überschiebung (Jura Ost), Teile der Jura-Überschiebungen und Born-Engelberg Antiklinale (Jura-Südfuss) - sind ebenfalls in den lokalen Modellen abgebildet. Wie auch beim Regionalmodell wurden der Schichtverlauf der hydrogeologischen Einheiten und die Geometrie der tektonischen Strukturen aus einem regionalen, geologischen Modell entnommen (3D Geologisches Modell 2012, NAB 13-28). Die für das lokale Modell erforderlichen lateralen Randbedingungen wurden aus dem hydrogeologischen Regionalmodell der Nordschweiz abgeleitet.

Das Lokalmmodell Wellenberg wurde im Zusammenhang mit der damaligen Rahmenbewilligung entwickelt und ist im NTB 96-01 dokumentiert. Weitere Untersuchungen wurden im Rahmen von Etappe 2 SGT nicht durchgeführt.

Zürich Nordost und Südranden (NTB 14-02-V; NAB 13-24) sowie Nördlich Lägern (NTB 14-02-V; NAB 13-25)

Die lokalen hydrogeologischen Verhältnisse in den drei Standortgebieten werden massgeblich von den hydraulischen Eigenschaften des regionalen Störungssystems geprägt. Ober- und unterhalb der tonreichen Formationen des Doggers ('Brauner Dogger' und Opalinuston) und des Tonigen Lias lassen sich hydraulisch voneinander entkoppelte Grundwasserstockwerke unterscheiden. Die oberen Grundwasserstockwerke beinhalten den Malm-Aquifer und die Wedelsandstein-Formation ('Brauner Dogger') im Fall von Zürich Nordost und Südranden bzw. den Malm-Aquifer und die lokal wasserführenden Schichten des Hauptrogensteins/Spatkalks und des Sissach-Members ('Brauner Dogger') im Fall von Nördlich Lägern. Die unteren Grundwasserstockwerke

umfassen die hydrogeologischen Einheiten Arietenkalk, Keuper-Aquifer und den Muschelkalk-Aquifer. Eine Grundwasserzirkulation zwischen den Stockwerken kann praktisch nur über Störungen ausserhalb der Standortgebiete erfolgen, sofern diese permeabel sind.

Jura Ost (NTB 14-02-V; NAB 13-26)

Die lokalen hydrogeologischen Verhältnisse im Standortgebiet Jura Ost werden massgeblich von den hydraulischen Eigenschaften der regionalen Störungssysteme geprägt. Die Aquitarde des Keupers entkoppeln den Muschelkalk-Aquifer hydraulisch weitgehend von den darüber liegenden Aquiferen. Eine Grundwasserzirkulation zwischen den beiden Stockwerken kann praktisch nur über Störungen ausserhalb des Standortgebiets erfolgen, sofern diese permeabel sind. Die oberen Grundwasserstockwerke beinhalten den Malm-Aquifer, den Hauptrogenstein-Aquifer und als potenziell wasserführende Systeme das Sissach-Member. Der Arietenkalk, der Keuper- und der Muschelkalk-Aquifer bilden die Grundwasserstockwerke unterhalb des Opalinustons.

Jura-Südfuss (NTB 14-02-V; NAB 13-27)

Die hydrogeologischen Verhältnisse sind stark an die Topographie gekoppelt, vor allem entlang der Jura-Überschiebungen. Alle im Modell berücksichtigten Einheiten haben entlang dieser Störungen Aufschlüsse, die als Infiltrationsorte massgeblich den Grundwasserfluss bestimmen. Zusätzlich haben die hydraulischen Eigenschaften der Eppenbergs-Flexur einen grossen Einfluss auf das Grundwasserfliesssystem. Lassen die hydraulischen Eigenschaften der Störungen einen vertikalen Fluss zu, ist die Eppenbergs-Flexur ein bevorzugtes Exfiltrationsgebiet. Die regionalen Aquifere des Muschelkalks, des Hauptrogensteins und des Malms werden durch die südliche Jura-Überschiebung und die Born-Engelberg-Antiklinale in ihrer lateralen Ausdehnung unterbrochen. Die resultierende Fragmentierung bestimmt die Grundwasserfliesssysteme des geologischen Standortgebiets.

Wellenberg (NTB 14-02-V)

Die für Etappe 2 SGT überarbeiteten geologischen Schnitte und das daraus abgeleitete geologische Modell bestätigen die Erkenntnisse früherer Untersuchungen. Die relativ geringen Unterschiede sind bezüglich der hydrogeologischen Verhältnisse vernachlässigbar (NTB 14-02-V). Auch bei tieferer Platzierung der Lagerebene bleiben sämtliche Fliesspfade gegen die Unterdruckzone gerichtet. Nach Abbau der Unterdruckzone ergeben sich tiefere und längere Fliesspfade. Der nicht dekomprimierte Bereich der Mergel-Formationen des Helvetikums trennt die oberflächennahen Grundwasserfliesssysteme von den Aquiferen der Axen-Decke im Liegenden.

Für alle Standortgebiete gilt, dass durch den Vergleich der errechneten Grundwasserpotenziale mit den vorhandenen gemessenen Potenzialen aufgrund der Simulationen keines der simulierten hydrogeologischen Szenarien (siehe oben) ausgeschlossen bzw. als weniger wahrscheinlich bewertet werden kann.

Beurteilung des ENSI

Die Zusammenstellung der hydrogeologischen Verhältnisse im NTB 14-02-V erachtet das ENSI als aktuelle Grundlage hydrogeologischer Bewertungen, Modellvorstellungen und numerischer Simulationen. Die Zielsetzung der hydraulischen Modellierung der Nagra, d. h. die Untersuchung der lokalen Grundwasserflüsse auf der Grundlage unterschiedlicher Annahmen, die das Verhalten von Störungen und die Bedeutung von lokalen Grundwasserleitern bzw. potenziell wasserführenden Einheiten betreffen, erachtet das ENSI als sinnvoll. Eine Grundwasserzirkulation zwischen verschiedenen Stockwerken kann über Störungen oder allenfalls über dekomprimierte Gesteinsbereiche erfolgen, wobei insbesondere die Trennung der Grundwasserstockwerke bzw. Grundwassersysteme oberhalb und unterhalb des Wirtgesteins von Bedeutung ist. Eine Unterteilung in ein regionales Modell und mehrere standortspezifische Lokalmodelle ist zielführend. Die getroffenen Annahmen und Vereinfachungen werden nachvollziehbar dargelegt und begründet (z. B. NAB 13-14).

Ungewissheiten in der Parametrisierung der modellierten Lithologien oder der implementierten Störungen werden im Rahmen von Sensitivitätsanalysen untersucht. Die Ergebnisse der Modellierung und der Sensitivitäts-

vitätsanalysen werden nachvollziehbar dargestellt und diskutiert. Die Vorgehensweise bei der hydraulischen Modellierung erachtet das ENSI als stufengerecht.

Das ENSI empfiehlt im Hinblick auf Etappe 3 SGT, die Resultate der Sensitivitätsanalysen zu verwenden, um die Erhebung zusätzlicher Daten beispielsweise bezüglich der grossräumigen hydraulischen Potenziale, der Grundwasserneubildung, des südlichen Grundwasserzustroms, der räumlichen Verteilung der hydraulischen Durchlässigkeit und der Verkarstungstiefe im Muschelkalk-Aquifer zielorientiert zu planen. Das ENSI empfiehlt zusätzlich, die von der Nagra gesammelten und ausgewerteten hydrochemischen und isotopengeochemischen Daten (NAB 13-63) im Hinblick auf Etappe 3 SGT mit den hydraulischen Modellierungen zu verbinden, um damit weitere Erkenntnisse zur hydrogeologischen Gesamtsituation, über mögliche Verkarstungsprozesse, hydraulische Kurzschlüsse und die Verweilzeiten der Wässer zu gewinnen.

In den quantitativen provisorischen Sicherheitsanalysen wird den Ungewissheiten, mit denen die Ergebnisse der hydraulischen Modellierungen behaftet sind, im Rahmen von Parametervariationen und alternativen Rechenfällen ausreichend Rechnung getragen.

Hinsichtlich der hydraulischen Gradienten haben die Modelle gezeigt, dass heute und langfristig sowohl mit nach oben als auch nach unten gerichteten hydraulischen Gradienten gerechnet werden muss. Dadurch wird die Vorgehensweise der Nagra bestätigt, die Lagerkammern jeweils in der Mitte des Wirtgesteins (sensu stricto) zu platzieren. Ebenfalls als realistisch haben sich die Werte der vertikalen hydraulischen Gradienten in den Standortgebieten Wellenberg (0.4 m/m) und der Nordschweiz (1 m/m, ausser Jura-Südfuss) erwiesen. Der in den Dosisberechnungen für das Standortgebiet Jura-Südfuss von der Nagra mit 0.1 m/m für die Effinger Schichten verwendete, geringere (vertikale) hydraulische Gradient ist aus dem Modell und aus Messwerten nicht direkt ableitbar, erscheint aber aufgrund der potenziell erhöhten hydraulischen Durchlässigkeit aller lithofaziellen Einheiten plausibel (NTB 14-03). In den meisten Fällen ist die Radionuklidfreisetzung ohnehin durch die barriierenwirksamen geologischen Einheiten diffusionsdominiert. Die spezifischen Durchflüsse der Aquifere werden wesentlich von der ebenfalls nur ungenau bekannten Verteilung der hydraulischen Durchlässigkeiten geprägt und nicht allein von den hydraulischen Gradienten.

Aus Sicht des ENSI hat die Nagra mit den vorliegenden hydrogeologischen Analysen die im Rahmen der Beurteilung der geologischen Unterlagen für die provisorischen Sicherheitsanalysen in Etappe 2 SGT gestellten Forderungen (ENSI 33/115) bezüglich

- der Annahmen zu den hydraulischen Gradienten (Forderung 12),
- der potenziellen Exfiltration über den Oberen Muschelkalk im Standortgebiet Zürich Nordost (Forderung 19),
- der Beschreibung der hydrogeologischen Verhältnisse in den (regionalen) Aquiferen (Forderungen 22 und 24),
- der Beschreibung der regionalen und lokalen Hydrogeologie (Forderungen 23 und 36),
- der tieferen Lagerebene am Standortgebiet Wellenberg (Forderung 25) und
- der Berücksichtigung der INTERREG IIIA-Studie bei der Evaluation der regionalen Grundwasserverhältnisse im Standortgebiet Südranden (Forderung 15) erfüllt.

2.8 Biosphärenmodellierung

Das Modell der Biosphäre dient dazu, aus einer langfristig möglichen Freisetzung von Radionukliden aus dem Tiefenlager über die Geosphäre in die Biosphäre eine Strahlendosis für die meist betroffene Bevölkerungsgruppe zu ermitteln. Diese wird mit dem regulatorischen Dosischutzkriterium verglichen. Das Biosphärenmodell besteht aus dem Transportmodell und dem Expositionsmodell. Im Transportmodell wird zunächst die Verteilung der Radionuklide in der Umwelt («Biosphäre») nach deren Freisetzung aus der Geosphäre berechnet. Dazu werden verschiedene Umweltkompartimente (z. B. Bodenschichten, Aquifer, Oberflächengewässer) und der Austausch von Wasser und Feststoffen zwischen diesen Kompartimenten betrachtet. Die Radionuklide werden in gelöster Form im Wasser oder zusammen mit den Feststoffen zwischen den Kompartimenten transportiert.

Anschliessend wird im Expositionsmodell die Strahlendosis berechnet, die sich über die verschiedenen Expositionspfade (Ingestion, Inhalation, Direktstrahlung) aus den Radionuklidkonzentrationen in den betrachteten Kompartimenten ergibt.

Unter vereinfachten Annahmen lässt sich die Strahlendosis aus den zeitabhängigen Radionuklid-Freisetzungsraten aus der Geosphäre durch Multiplikation mit den nuklidspezifischen Biosphären-Transferkoeffizienten (BTK) und anschliessender Summation der nuklidspezifischen Dosisbeiträge ausrechnen.

Angaben der Nagra

Gemäss Ausführungen der Nagra setzt die Biosphärenmodellierung in Etappe 2 SGT die bisherigen Arbeiten im Rahmen des Projekts Entsorgungsnachweis (NTB 02-05) und der Etappe 1 SGT (NTB 08-05) fort. Fortschritte sind insbesondere erzielt worden bei der modellhaften Beschreibung des Verhaltens von radioaktivem Kohlenstoff (^{14}C) in der landwirtschaftlich genutzten Umwelt und der Entwicklung eines neuen und qualitätsgesicherten Rechencodes (NAB 13-04). Ferner sind die Kenntnisse zum Klima, zur Geomorphologie und zur lokalen und regionalen Hydrogeologie im Hinblick auf die geologische Langzeitentwicklung weiter vertieft worden und es wurden zusätzliche Informationen über die heutige Bewässerungssituation in der Schweiz zusammengestellt. Allgemeine, weitgehend standortunabhängige Eingabeparameter wurden einem umfassenden internationalen Review unterzogen (NAB 13-49) und das Biosphärenmodell in einzelnen Punkten an internationale Konventionen angepasst.

Exfiltrationsgebiete

Die potenzielle Freisetzung der Radionuklide aus dem Tiefenlager in die Biosphäre (nach der Barriere Wirtgestein) erfolgt über wasserführende Schichten in den Rahmengesteinen und / oder über die regionalen Tiefenaquifere (NTB 14-03). Für zwischeneiszeitliche Bedingungen wird angenommen, dass ein zukünftiger Radionuklid-Eintrag in die Biosphäre an den tiefsten Punkten der Kontaktzone zwischen Biosphärenaquifer und dem regionalen Tiefenaquifer stattfindet. Die tiefsten Punkte befinden sich meist in Talsohlen von Haupt- und grösseren Seitentälern innerhalb des betreffenden Exfiltrationsgebiets. Eine breite Evaluation der Daten zu den Grundwasserströmen in Talsohlen von typischen Haupt- und Seitentälern (NAB 10-15; NAB 13-75) zeigt, dass diese in der Grössenordnung von $10^6 \text{ m}^3/\text{a}$ liegen (NTB 14-03).

Es wird davon ausgegangen, dass die Flussnetze und Landschaftsbilder in allen zukünftigen Zeitphasen innerhalb des Betrachtungszeitraums, in denen eine selbstversorgende landwirtschaftliche Produktion möglich ist, grundsätzlich etwa vergleichbar sind mit den heutigen geomorphologischen Verhältnissen.

Klimavarianten

Für die Abschätzung der Wasserflüsse bei der Biosphärenmodellierung werden die verschiedenen Phasen der Klimaentwicklung - insbesondere wärmeres und trockeneres sowie eiszeitliches Klima - in vereinfachter Form berücksichtigt. In den Dosisberechnungen werden modellhafte, zeitlich konstante klimatische Verhältnisse angenommen, die für verschiedene Phasen der Klimaentwicklung typisch sind (NTB 14-03).

Referenzbiosphäre

Aufgrund der nicht reduzierbaren Ungewissheiten über die geomorphologische und klimatische Entwicklung in den verschiedenen Standortgebieten bzw. in den zugehörigen potenziellen Exfiltrationsgebieten werden für die Dosisberechnungen in Etappe 2 SGT grundsätzlich für alle potenziellen Exfiltrationsgebiete der einzelnen Standortgebiete dieselben Annahmen bzgl. der geomorphologischen und hydrogeologischen Bedingungen sowie bzgl. der klimatischen Verhältnisse getroffen. Dies führt zur Definition einer generischen Referenzbiosphäre, welche für die Dosisberechnungen zur Ermittlung der charakteristischen Dosisintervalle verwendet wird. Mit einem solchen Vorgehen wird sichergestellt, dass die mit den Dosisberechnungen aufgezeigten Unterschiede in

den Rückhalteeigenschaften der untersuchten Barrierensysteme in den verschiedenen Standortgebieten nicht durch unterschiedliche Annahmen bzgl. Biosphäre überdeckt werden (NTB 14-03).

Standortspezifische Biosphärenmodelle

Zur Illustration der Variabilität der heute und in der unmittelbaren Zukunft herrschenden geomorphologischen, hydrogeologischen und klimatischen Verhältnisse und zur Bewertung der sicherheitstechnischen Bedeutung dieser Variabilität werden für potenzielle Exfiltrationsgebiete ausgehend vom Referenzfall standortspezifische Biosphärenmodelle entwickelt. Die standortspezifischen Biosphärenmodelle dienen der Verankerung der generischen Referenzbiosphäre, indem aufgezeigt wird, dass die Resultate für die Referenzbiosphäre innerhalb der Bandbreite liegen, welche durch die standortspezifischen Biosphärenmodelle aufgespannt wird (NTB 14-03).

Dynamik von Kohlenstoff in der Biosphäre

Zur Modellierung des radioaktiven Isotops ^{14}C wird das Transportmodell mit separaten Kompartimenten für die oberirdische und unterirdische Biomasse der Kulturpflanzen sowie dem Kohlenstoffaustausch über die Gasphase (Bodenluft und atmosphärische Grenzschicht) erweitert. Aus der berechneten Verteilung von ^{14}C im so erweiterten Transportmodell lassen sich anschliessend effektive Parameter für ^{14}C zur Verwendung im Standard-Transport- und Expositionsmodell ableiten (NTB 14-03).

Wie die Vergleichsberechnungen der Nagra zeigen, führt das dynamische Modell für ^{14}C für die Referenzbiosphäre und heutige klimatische Verhältnisse zu einer Vergrösserung des Biosphären-Transferkoeffizienten um den Faktor 4 (NAB 12-26).

Beurteilung des ENSI

Die Modellkonzepte und die Datengrundlage der Nagra zur Radionuklidenausbreitung in der Biosphäre und zu den Dosisberechnungen wurden durch das ENSI und seine Experten geprüft. Die ausführlichen Ergebnisse der Überprüfung sind in ENSI 33/219 und in der Stellungnahme der EGT zum Vorschlag weiter zu untersuchender Standortgebiete (EGT 2016) dokumentiert.

Exfiltrationsgebiete

Die Anforderungen an die provisorischen Sicherheitsanalysen und den sicherheitstechnischen Vergleich (ENSI 33/075) verlangen, dass die Entsorgungspflichtigen die regionale hydrogeologische Situation darlegen und das Spektrum typischer Exfiltrationssituationen aufzeigen. Ferner verlangte das ENSI in seiner Forderung 36 (ENSI 33/115) eine Untersuchung der regionalen Fliessverhältnisse in den geologischen Standortgebieten auf der Grundlage eines grossräumigen hydrogeologischen Modells.

Die Nagra definiert das Exfiltrationsgebiet als denjenigen Ort, an dem der massgebende Felsaquifer mit einem Lockergesteinsaquifer in direkten Kontakt tritt und ein Übertritt von Tiefengrundwasser ins Lockergestein erfolgen kann (NAB 13-75). Die relevanten Exfiltrationszonen in den geologischen Standortgebieten hat die Nagra im NAB 13-75 anhand verfügbarer geologischer und hydrogeologischer Unterlagen im Hinblick auf den durchflossenen Querschnitt des Lockergesteinsaquifers, den hydraulischen Gradienten, die hydraulische Durchlässigkeit und als Vergleichsgrösse die jährlichen Entnahmeleistungen lokaler Grundwasserentnahmestellen charakterisiert.

Gemäss der Beurteilung des ENSI hat die Nagra mit ihren Arbeiten zur Charakterisierung der Lockergesteinsaquifere (NAB 13-75), sowie den Arbeiten zum regionalen hydrogeologischen Modell der Nordschweiz (NAB 13-23) und den standortspezifischen Modellen gemäss NAB 13-24 (Zürich Nordost und Südranden), NAB 13-25 (Nördlich Lägern), NAB 13-26 (Jura Ost), NAB 13-27 (Jura-Südfuss) und NAB 14-33 (Wellenberg) die entsprechenden Anforderungen bzw. die Forderung 36 im Rahmen von Etappe 2 SGT stufengerecht erfüllt.

Im Zusammenhang mit der Beurteilung der geologischen Unterlagen für die provisorischen Sicherheitsanalysen in Etappe 2 SGT hat das ENSI die Forderung 10 (ENSI 33/115) nach einer standortspezifischen Darstellung der geomorphologischen Verhältnisse gestellt und verlangt, für alle drei HAA-Standortgebiete vergleichende Betrachtungen zur geomorphologischen Entwicklung im Betrachtungszeitraum mit dem notwendigen Tiefgang durchzuführen und zu dokumentieren. Dieser Forderung ist die Nagra mit NTB 14-02-III aus Sicht der Biosphärenmodellierung stufengerecht nachgekommen.

Klimavarianten

Das ENSI verlangt in den Anforderungen an die provisorischen Sicherheitsanalysen und den sicherheitstechnischen Vergleich, dass die Entsorgungspflichtigen die Abhängigkeit von plausiblen Klimaentwicklungen aufzeigen (ENSI 33/075). Die Nagra hat dementsprechend in ihren Unterlagen zum Vorschlag für Etappe 2 SGT neben dem heutigen Klima die radiologischen Auswirkungen bei Annahme eines eiszeitlichen Klimas und eines wärmeren und trockeneren Klimas (mit Bewässerung) in den provisorischen Sicherheitsanalysen untersucht. Mit diesen Variationen hat die Nagra die entsprechende Vorgabe aus Sicht des ENSI stufengerecht erfüllt.

Referenzbiosphäre

Für die Dosisberechnungen zur Ermittlung der charakteristischen Dosisintervalle in Etappe 2 SGT verwendet die Nagra für alle geologischen Standortgebiete und Lagertypen ein generisches Referenz-Biosphärenmodell auf der Basis der heutigen klimatischen Verhältnisse. Damit wird vermieden, dass im sicherheitstechnischen Vergleich der Standortgebiete die Barrierenwirkung des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs durch die standortspezifischen Eigenschaften der Biosphäre (speziell das Verdünnungspotenzial der Grundwasserleiter bzw. Oberflächengewässer) überdeckt werden. Das ENSI beurteilt dieses Vorgehen als sinnvoll und zielführend.

Der Referenzfall repräsentiert ein Gebiet in der Nordschweiz mit einem grossen Fluss. Er entspricht in seinen Grundzügen dem Biosphärensystem, welches die Nagra dem Entsorgungsnachweis (NTB 02-05) zu Grunde gelegt und in den Testberechnungen für die quantitative provisorischen Sicherheitsanalysen (NAB 10-15) weiter entwickelt hat. Das im Entsorgungsnachweis verwendete Biosphärenmodell wurde durch das ENSI im Rahmen seiner behördlichen Aufsicht mit eigenen Berechnungen überprüft und bestätigt (ENSI 33/219).

Standortspezifische Biosphärenmodelle

Der Vergleich der radiologischen Langzeitauswirkungen eines geologischen Tiefenlagers soll für die verschiedenen geologischen Standortgebiete auf der Grundlage einer Referenzbiosphäre erfolgen. Ergänzend zum Referenzfall verlangt das ENSI zusätzliche Modellvarianten mit standortspezifischen Wasserflüssen im Biosphären-Aquifer. Diese sollen auf einer Analyse der vorhandenen Daten in Bezug auf die Grundwasserhältnisse in den quartären Ablagerungen typischer grosser und kleiner Täler der Nordschweiz basieren (ENSI 33/115).

Zu diesem Zweck hat die Nagra für die in Etappe 1 SGT vorgeschlagenen geologischen Standortgebiete standortspezifische Biosphärenmodelle (als BG-1 bis BG-16 bezeichnet) hergeleitet und die entsprechenden Biosphären-Transferkoeffizienten (BTK) berechnet (NAB 13-04). Die standortspezifischen Biosphärenmodelle unterscheiden sich hauptsächlich durch die räumlichen Verhältnisse beim Eintritt der Radionuklide in die Biosphäre («grosses Tal» vs. «kleines Tal») und damit neben ihrer Grösse (typischerweise zwischen 0.1 und 3 km²) hauptsächlich in der Verdünnung in den oberflächennahen Wasserströmen (flaches Grundwasser, Fluss). Für das Szenarium «Kleines Tal mit kleinem Fluss» (BG-8, Sissletal, Bözen) ergeben sich erwartungsgemäss die höchsten und für das Szenarium «Direkter Eintrag in grossen Fluss» (BG-1, Rheinfallrinne) die kleinsten Biosphären-Transferkoeffizienten. Die Bandbreite beträgt je nach betrachtetem Radionuklid bis zu fünf Grössenordnungen.

Die Nagra hält fest, dass in allen Standortgebieten im Prinzip jedes der untersuchten räumlichen Freisetzungsszenarien möglich ist, mit der Begründung, dass die Entwicklung der zukünftigen Topographie (und damit der Übertrittsstellen zwischen Fels- und Lockergesteinsaquifer) weitgehend offen ist und sich keine detaillierten Aussagen über den Ort und die räumlichen Verhältnisse bei der Radionuklidfreisetzung machen lassen. Das

ENSI teilt diese Einschätzung und erachtet die Berücksichtigung der unterschiedlichen Szenarien als zielführend.

Die Modellberechnungen zeigen, dass die Variabilität der (über die standortabhängigen BTK abgeleiteten) Strahlendosen zwischen den verschiedenen standortspezifischen Biosphärenmodellen vergleichbar ist mit der Variabilität der Strahlendosen, die sich aus den unterschiedlichen Klimaszenarien ergeben. Deshalb lassen sich die erwarteten Strahlendosen für die unterschiedlichen Klimavarianten (heutige klimatische Verhältnisse, warmes-trockenes Klima, eiszeitliches Klima – NAB 13-04) in guter Näherung als Mass für die Variabilität der Strahlendosen aus den verschiedenen (standortspezifischen) Biosphärenmodellen (NAB 13-04) interpretieren.

Mit den im NAB 13-04 dokumentierten Untersuchungen für insgesamt 16 unterschiedliche Biosphärengebiete hat die Nagra aus Sicht des ENSI die Forderung 37 aus ENSI 33/115 umfassend und stufengerecht erfüllt.

Dynamik von Kohlenstoff in der Biosphäre

Der Biosphärentransferkoeffizient für ^{14}C wurde bereits in Etappe 1 SGT basierend auf einem erweiterten Modell zur Kohlenstoffdynamik in landwirtschaftlich genutzten Ökosystemen berechnet (NAB 08-01). Die Nagra hat das Modellkonzept in Etappe 2 SGT im Einklang mit internationalen Entwicklungen¹ verfeinert und programmtechnisch umgesetzt. Darüber hinaus wurden die generischen (d. h. nicht standortspezifischen) Daten inklusive diejenigen für ^{14}C von der Nagra einer fachlichen Begutachtung unterzogen und aktualisiert (NAB 13-49). Schliesslich wurde das neue ^{14}C -Modell in einem speziellen Programm implementiert (NAB 12-27; NTB 14-09) und im NAB 12-26 sowie einer wissenschaftlichen Publikation (van Dorp und Brennwald 2009) dokumentiert. Aus Sicht des ENSI entspricht das Vorgehen der Nagra zur ^{14}C -Modellierung dem aktuellen Stand der Wissenschaft.

2.9 Grundlagen für die Beurteilung der Tiefenlage und der bautechnischen Machbarkeit der Lagerkammer im Wirtgestein Opalinuston

Im Rahmen der Detailprüfung der Vorschläge der Nagra zur Standorteinengung in Etappe 2 SGT hat das ENSI im November 2015 eine Nachforderung im Zusammenhang mit der Beurteilung der Tiefe der Lagerebene (Indikator 1 «Tiefenlage im Hinblick auf bautechnische Machbarkeit (u. B. Gesteinsfestigkeiten und Verformungseigenschaften)») gestellt (ENSI 33/476). Die Nachforderung des ENSI stützt sich auf die Ergebnisse aus Expertenprüfungen (ENSI 33/460; ENSI 33/461). Die von der Nagra ursprünglich eingereichten felsmechanischen Grundlagen, getroffenen Annahmen und gewählten Entwurfsindikatoren zur Beurteilung der Tiefe der Lagerebene in den HAA- und SMA-Standortgebieten waren gemäss den Prüfergebnissen nicht belastbar. In der Folge waren auch die von der Nagra geplanten Optimierungsanforderungen an die maximale Tiefe der Lagerebene für SMA- und HAA-Lager und die Herleitung der Bewertungsskala des Indikators 1 (NAB 14-81; NTB 14-01) weder nachvollziehbar noch belastbar. Das Hauptziel der Nachforderung des ENSI war es, eine ausreichende technisch-wissenschaftliche Basis für die Beurteilung des Indikators 1 und für die Beurteilung des entscheiderelevanten Merkmals «Bautechnische Machbarkeit eines Tiefenlagers unter Berücksichtigung der vorgeschlagenen Standortareale» zu erhalten. Zu den Forderungen in ENSI 33/476 gehören auch bestehende Anforderungen des ENSI an Etappe 2 SGT hinsichtlich der bautechnischen Aspekte gemäss ENSI 33/115 (Forderung 26) und ENSI 33/170 (bautechnische Risikoanalyse).

Die Nagra hat aufgrund der Nachforderung des ENSI zusätzliche Unterlagen, einen Hauptbericht NAB 16-41 und fünf Referenzberichte (NAB 16-42; NAB 16-43; NAB 16-44; NAB 16-45; NAB 16-46) sowie ergänzende Expertenberichte beim ENSI eingereicht. In diesen zusätzlichen Unterlagen behandelt die Nagra die SMA- und HAA-Standortgebiete in der Nordschweiz mit dem Wirtgestein Opalinuston.

Das ENSI und seine Experten haben die im Rahmen der Nachforderung eingereichten Projektierungsgrundlagen und geomechanischen Datengrundlagen geprüft. Die dazugehörigen Prüfergebnisse sind in ENSI 33/531 und ENSI 33/530 ausführlich dokumentiert. Nachfolgend werden relevante Grundlagen für die Beurteilung der Tiefenlage und der bautechnischen Machbarkeit der Lagerkammer in den HAA- und SMA-Standortgebieten der Nordschweiz mit dem Wirtgestein Opalinuston und die Erfüllung der Nachforderung des ENSI beurteilt.

¹ BIOPROTA - International collaborative forum designed to support resolution of key issues in biosphere aspects of assessments of the long-term impact of contaminant releases associated with radioactive waste management, siehe www.bioprota.org

Im Kapitel 2.10 werden diese Grundlagen bzgl. der Wirtgesteine 'Brauner Dogger', Effinger Schichten und Mergel-Formationen des Helvetikums beurteilt. Die qualitative Bewertung des entsprechenden Indikators erfolgt in Kapitel 5.3.

2.9.1 Standortspezifische geologische Modelle

Angaben der Nagra

Die aktuelle Datenlage im Bereich der geologischen Standortgebiete in der Nordschweiz lässt für den Opalinuston im Hinblick auf bautechnische und ingenieurgeologische Fragestellungen die Erstellung von schematischen, standortgebietspezifischen geologischen Modellen zu. Auf Basis der aktuell vorhandenen und für konkrete Planungen insgesamt noch mit grösseren Ungewissheiten behafteten Datensätze zur Ausbildung von Fazies und tektonischer Überprägung wurde zunächst für jedes Standortgebiet ein geologisches Modell im Lagerperimetermassstab («LP-Geomodell») abgeleitet. Die Lage der Modelle innerhalb der Standortgebiete wurde so gewählt, dass die in Etappe 2 SGT bewerteten untertägigen Lagerperimeter vollständig abgedeckt werden. Zudem wurden auf Basis dieses LP-Geomodells und weiterführender konzeptioneller Überlegungen mehrere kleinräumige Geomodelle im Lagerstollen-/Lagerkavernenmassstab («LS/LK-Geomodelle») entwickelt (NAB 16-44).

Standortgebietspezifische Unterschiede zwischen den Geomodellen betreffend Fazies und Mächtigkeit des Wirtgesteins deuten sich teilweise an, die sich auch in leicht variierenden Gefährdungsbildern widerspiegeln. Allerdings ist eine solche Variabilität bei jeweils nur einer gekernten Sondierbohrung pro Standortgebiet derzeit noch nicht belastbar nachweisbar und auch nicht zwingend auf ein gesamtes Standortgebiet übertragbar. Vergleichsweise belastbare standortspezifische Unterschiede ergeben sich hingegen unter Berücksichtigung der unterschiedlichen grossräumigen tektonischen Regimes und unter zusätzlicher Einbeziehung von strukturgeologischen Bohrkern- und Geländeaufnahmen (NAB 16-44).

Beurteilung des ENSI

Aus Sicht des ENSI und seiner Experten wurden die geologischen Informationen der einzelnen Standortgebiete und die dazugehörigen Ungewissheiten von der Nagra stufengerecht in standortspezifische geologische Modelle überführt. Die Ungewissheiten, welche sich aus den noch lückenhaften Informationen über die geologischen Verhältnisse in den bevorzugten Lagerperimetern und Tiefenbereichen ergeben, wurden von der Nagra diskutiert. Das Vorgehen zur Ermittlung der geologischen Modelle (LP- und LS/LK-Geomodelle) ist aus Sicht des ENSI nachvollziehbar dokumentiert und unter Berücksichtigung der Ungewissheiten stufengerecht.

2.9.2 In situ-Gebirgsspannungen

Angaben der Nagra

Für die verschiedenen Tiefen gelten die im NAB 16-45 (Tabelle 4.2-6) aufgeführten in situ-Gebirgsspannungen (NTB 14-02-IV). Nebst Referenzwerten (RSR_{ref}, Reference Regime Stress Ratio), basierend auf den Spannungsmessungen im Opalinuston der Bohrung Benken, werden auch Spannungswerte bei geringen (RSR_{min}, Minimum Regime Stress Ratio) und hohen lateralen, tektonischen Spannungen (RSR_{max}, Maximum Regime Stress Ratio) betrachtet. Die verschiedenen Szenarien haben zum Ziel, das Spektrum der Erwartungswerte zu den horizontalen Spannungsmagnituden in den Standortgebieten der Nordschweiz abzudecken. Die Orientierung der horizontalen Hauptspannungen ist heute mit einer beträchtlichen Ungewissheit verbunden. Mit standortspezifischen erdwissenschaftlichen Untersuchungen Untertag können dereinst zuverlässigere Erkenntnisse der Spannungsorientierung durch Testvortriebsstrecken gewonnen werden, welche es erlauben, die Lagerfelder und die Lagerkammern in Bezug zur Hauptspannungsrichtung optimal auszurichten. Für die Baugrundmodelle wird von der im NAB 16-44, angegebenen Hauptspannungsrichtung und einer Abweichung von ± 15 Grad ausgegangen (NAB 16-45).

Beurteilung des ENSI

Die regionale Verteilung der Spannungsorientierungen in der Nordschweiz wurde durch die Nagra systematisch aufgrund von Bohrlochrandausbrüchen und Hydrofrac-Versuchen zusammengestellt und mit Paläospannungs-Analysen (NAB 12-05; NAB 12-41) und Modellberechnungen verglichen (NAB 13-88). Die regionalen Analysen der Spannungsmagnituden wurden sorgfältig dokumentiert. Die lokalen Spannungsverhältnisse in den Standortgebieten und kleinräumige Spannungsheterogenitäten werden nicht systematisch beschrieben. Dafür decken die verwendeten Spannungs-Szenarien die zu erwartenden Bandbreiten konservativ ab. Das ENSI ist mit dem Vorgehen der Nagra und den abgeleiteten Schlussfolgerungen einverstanden.

2.9.3 Gebirgsmodelle, geotechnische Parameter und Baugrundmodelle

Angaben der Nagra

Die geomechanischen Grundlagen sind im NAB 16-43 ausführlich beschrieben und hergeleitet. Basierend auf bestehenden empirischen und experimentellen Erfahrungen und Messungen sowie einem entwickelten konzeptionellen Modell (*Critical State*-Modell) werden drei Gebirgsmodelle (GMref: Referenzmodell; GMmax: hochfestes Modell; GMmin: niedrigfestes Modell), für die geomechanische Analyse des Gebirgs- und Systemverhaltens vorgeschlagen, welche sowohl die Ungewissheiten als auch die Abhängigkeit von der Tiefenlage und den Einfluss der tektonischen Überprägung berücksichtigen (NAB 16-43). Aufgrund der Überkonsolidierung des Opalinustons resultiert eine Zunahme der Festigkeits- und Steifigkeitsparameter mit der Tiefe. Im NAB 16-43 sind die geomechanischen Parametersätze für die drei Gebirgsmodelle GMmax, GMref und GMmin für drei Tiefenlagen 500, 700 und 900 m u. T. dargestellt. Die Parametersätze in Tiefenlagen dazwischen können aus Anhang C im NAB 16-43 entnommen werden.

Für die felsmechanischen Berechnungen werden konstante isotrope Gesteinsdurchlässigkeiten von 10^{-13} m/s (Referenzwert) und 10^{-12} m/s (maximale mittlere Durchlässigkeit) angenommen. Weitere für die Berechnungen relevante Annahmen der Nagra bezüglich des Porenwasserdrucks (u. a. keine negativen Porendrucke in der plastischen Zone) sind im NAB 16-45 dokumentiert.

Auf Basis des heutigen Kenntnisstands verbleiben Ungewissheiten betreffend der tatsächlichen Baugrundverhältnisse in den Lagerperimetern. Diese Ungewissheiten werden durch die Berücksichtigung von Bandbreiten abgedeckt. Als Grundlage für die qualitativen und quantitativen Analysen und Bewertungen werden die geologischen Informationen zu folgenden drei Baugrundmodelltypen (BGM) zusammengefasst (NAB 16-45):

BGM-1-Typen werden als repräsentativ für die sandige Fazies ohne bzw. mit Störungszone in der direkten Nähe eines angenommenen Hohlraums angenommen (günstiger Fall). Diese Baugrundmodelltypen kommen für die Lagerkammern nicht zur Anwendung, weil im Bereich der Lagerebene (Mitte des Opalinustons) in keinem der betrachteten Standortgebiete eine ausreichend mächtige sandige Fazies erwartet wird (NAB 16-44). Es wurden daher keine Berechnungen mit BGM-1 durchgeführt.

Der BGM-2-Typ wird als repräsentativ für die tonige Fazies ohne Störungzonen in der direkten Nähe des Hohlraums angenommen (erwarteter Fall). Dieser Baugrundmodelltyp wird für alle betrachteten Standortgebiete als die repräsentative Situation im Bereich der Lagerebene (Mitte des Opalinustons) angenommen.

BGM-3-Typen umfassen ungünstige Verhältnisse mit unterschiedlicher Ausrichtung der Hohlräume im Gebirgsspannungsfeld, ohne Störungzonen in der direkten Nähe des Hohlraums (ungünstiger Fall). Mit diesen Baugrundmodelltypen wird der Einfluss der tektonischen Überprägung für den Bereich der Lagerebene (Mitte des Opalinustons) abdeckend berücksichtigt. Diese Baugrundmodelltypen werden zur abdeckenden Beurteilung der bautechnischen Machbarkeit der Bauten auf Lagerebene verwendet.

Es ist zu beachten, dass im Vergleich zur Reduktion der Festigkeiten von BGM-1 zu BGM-2 die Festigkeiten von BGM-2 zu BGM-3 relativ wenig reduziert wurden (NAB 16-45). Die definierten Baugrundmodelltypen BGM-1, BGM-2 und BGM-3 basieren auf den drei vorher genannten geomechanischen Parametersätzen. GMmax wird den Baugrundmodellen BGM-1A und -1B, GMref dem Baugrundmodell BGM-2 und GMmin den Baugrundmodellen BGM-3A und -3B zugeordnet.

Beurteilung des ENSI

Aus Sicht des ENSI entspricht das von der Nagra beschriebene Konzept, wonach die maximale Überdeckung und Temperatur (Kompaktion und diagenetischen Verfestigung), die mineralogische Zusammensetzung und die tektonische Überprägung massgebend die Festigkeiten und Steifigkeit des Opalinustons beeinflussen, dem heutigen Stand der Kenntnisse. Die drei Gebirgsmodelle (GMmax, GMref, GMmin) mit unterschiedlichen geomechanischen Parametersätzen für den Opalinuston, stellen angesichts der geringen experimentellen Datenbasis und der damit verbundenen grossen Ungewissheiten richtigerweise ein breites Spektrum an geomechanischen Parametern dar.

Die Baugrundmodelltypen BGM-1, -2 und -3 basieren auf Gebirgsmodellen (GMmin, GMref, GMmax), modellhaften Spannungszuständen (Magnitude und Orientierung), tektonischen Strukturen und Annahmen zur hydraulischen Leitfähigkeit des Wirtgesteins. Während die Annahmen zu den Spannungszuständen nachvollziehbar und plausibel sind, stellen das ENSI und seine Experten gewisse Annahmen zu den Gebirgsmodellen (geomechanische Parametersätzen) in Frage. Dies betrifft insbesondere die Annahme der Nagra, dass der Parametersatz GMmin (Baugrundmodelltyp BGM-3) den massgebend Datensatz für die Beurteilung der maximalen Tiefenlage aus bautechnischer Sicht in den Standortgebieten darstellen soll.

Die Nagra leitet die Gebirgsmodelle auf Grundlage eines *Critical State*-Modells (NAB 16-43) ab, was eine Abschätzung intrinsischer und tiefenabhängiger Materialeigenschaften über die Porosität und das volumetrische Verhalten des Opalinustons (Resultate aus Ödometerversuchen) ermöglichen soll. Aus Sicht des ENSI und seiner Experten bildet das gewählte Modell wichtige Aspekte des Verhaltens des Opalinustons ab (ENSI 33/461). Für die generelle Gültigkeit und Anwendbarkeit des Stoffansatzes für Opalinuston fehlen jedoch empirische Belege (ENSI 33/531). Begründungen und Erläuterungen hierzu sind in ENSI 33/531 dokumentiert.

Die theoretisch hergeleiteten Materialparameter lassen sich nur eingeschränkt experimentell überprüfen. Im NTB 14-02-IV hat die Nagra die Daten aus der Bohrung Benken (Proben aus ca. 600 m Tiefe) und der Bohrung Schlattingen-1 (Proben aus ca. 900 m Tiefe) als repräsentativ für das Verhalten von Opalinuston im relevanten Tiefenbereich von 600 bis 900 m u. T. beurteilt, während die Daten aus dem Felslabor Mont Terri (in weniger als 300 m Tiefe) für diesen relevanten Tiefenbereich als nicht repräsentativ beurteilt werden. Das ENSI und seine Experten stimmen dieser Einschätzung der Nagra zu.

Gemäss NAB 16-43, Kapitel 4.1, werden Porositäten des Opalinustons, die grösser als 15 % sind, wie für Opalinustonproben aus dem Felslabor Mont Terri (Faltenjura) berichtet wurde, mit den von der Nagra gewählten Gebirgsmodellen nicht abgedeckt. Solche hohe Porositäten werden von der Nagra für die Standortgebiete in der Nordschweiz als nicht zutreffend beurteilt (NAB 16-43). Das ENSI und seine Experten stimmen dieser Einschätzung der Nagra generell zu und halten fest, dass im Sinne der Argumentation der Nagra geomechanische Eigenschaften von Opalinustonproben aus Mont Terri nicht auf die Standortgebiete anwendbar sind (ENSI 33/531).

Die Nagra bestätigt die Bewertung der Experten des ENSI in ENSI 33/461 weitgehend, indem im Rahmen der Nachforderung nur noch die gemäss NAB 13-45 mit Qualität B gekennzeichneten Triaxialversuche von NAB 13-18 berücksichtigt werden. Die vorhandenen vier Ödometerversuche an Proben der Bohrung Schlattingen-1 (NAB 12-50) wurden durch drei weitere Ödometerversuche ebenfalls an Proben der Bohrung Schlattingen-1 (Ferrari et al. 2016; Favero et al. 2016) ergänzt, die zusätzliche Aussagen zu den Steifigkeitsparametern (E-Modul), aber nicht zu den Festigkeitsparametern (Kohäsion, Reibungswinkel) erlauben. Insgesamt verbleibt ein eingeschränkter geomechanischer Datensatz.

Die an Proben der Bohrung Schlattingen-1 durchgeführten konsolidiert-undrainierten Triaxialversuche (NAB 13-18) zeigen im Vergleich mit den theoretisch hergeleiteten Materialparametern, dass die Höchstfestigkeit des untersuchten Opalinustons am ehesten mit GMmax beschrieben werden kann. In Abbildung 4 sind die aus den gemäss ENSI 33/461 als belastbar beurteilten Versuchen abgeleiteten Höchst- und Restfestigkeiten der Matrix sowie die von der Nagra vorgeschlagenen Höchstfestigkeiten (Bruchgeraden) für die Gebirgsmodelle GMmin, GMref und GMmax dargestellt. Dabei wurden die dargestellten Bruchgeraden der Gebirgsmodelle für die Tiefe 600 m u. T. von den Experten des ENSI anhand der Daten der Nagra nachgerechnet. Die Höchstfestigkeiten der Matrix aus den untersuchten Proben der Bohrung Schlattingen-1 liegen stets über GMmax (ausgefüllte

Symbole). Ausserdem liegen die Restfestigkeiten (nicht ausgefüllte Symbole) zwischen GMmax und GMref und somit deutlich über GMmin, entgegen der Annahme der Nagra, dass im Bruchzustand ein Festigkeitsabfall von GMmax auf GMmin auftritt (ENSI 33/531).

In Abbildung 5 sind die aus den erwähnten belastbaren Triaxialversuchen ermittelten und die von der Nagra vorgeschlagenen undrainierten Steifigkeiten (E-Moduln) parallel und normal zur Schichtung für die Gebirgsmodelle GMmin, GMref und GMmax dargestellt. Die Versuchsergebnisse liegen unabhängig von der Art der Auswertung (aus Erstbelastung oder Entlastung/Wiederbelastung) stets zwischen GMmax und GMref (Steifigkeit parallel sowie senkrecht zur Schichtung), jedoch näher zu GMmax als zu GMref. Die weiteren belastbaren Daten der Triaxialversuche mit unter 30° zur Prüfkörperachse geneigter Schichtung (X-Proben) bestätigen die obige Aussage zur Steifigkeit (ENSI 33/531).

Die generelle Annahme des Parametersatzes GMmin (Baugrundmodelltyp BGM-3) für die Tiefenlage und tektonische Situation in den Standortgebieten bleibt daher unbegründet. Allerdings stimmen das ENSI und seine Experten zu, dass derart niedrige effektive Festigkeit und Steifigkeit im Nahbereich von Störzonen möglich sind. Wie in den geologischen Modellen durch die Nagra beschrieben, ist in den Standortgebieten Nördlich Lägern, Jura Ost und Jura-Südfuss aber nur von einer allenfalls lokalen tektonischen Schwächung des Schichtgefüges auszugehen. Die Annahme von GMmin für ein gesamtes Standortgebiet ist demzufolge nicht nachvollziehbar (siehe hierzu auch Kapitel 2.9.5).

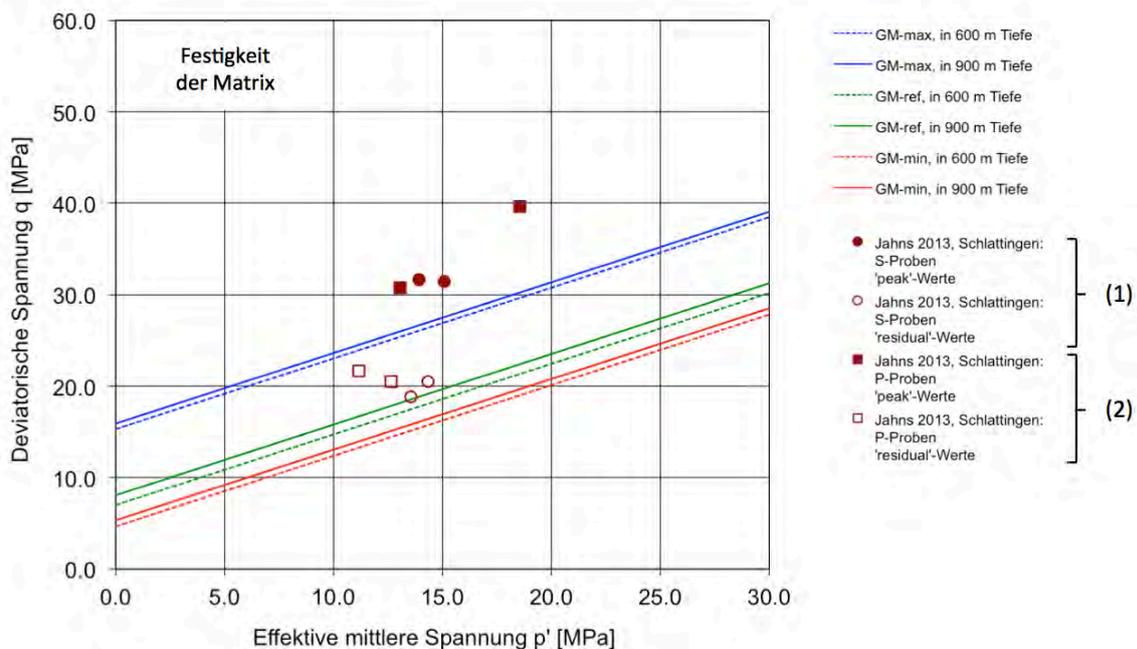


Abbildung 4: Effektive Höchst- und Restfestigkeiten des Opalinustons (Matrix) aus den gemäss ENSI 33/461 als belastbar beurteilten Triaxialversuchen (Bohrung Schlattingen-1, NAB 13-18) im Vergleich mit den von der Nagra im NAB 16-43 vorgeschlagenen tiefenabhängigen effektiven Höchstfestigkeiten (Bruchgeraden) für die Gebirgsmodelle. Bruchgeraden für Tiefe 600 m u. T. gemäss ENSI 33/531. Erläuterungen zur Legende: (1) Festigkeit der Matrix wird zutreffend ermittelt gemäss ENSI 33/461; (2) Festigkeit der Matrix wird tendenziell unterschätzt gemäss ENSI 33/461. Quelle: ENSI 33/531.

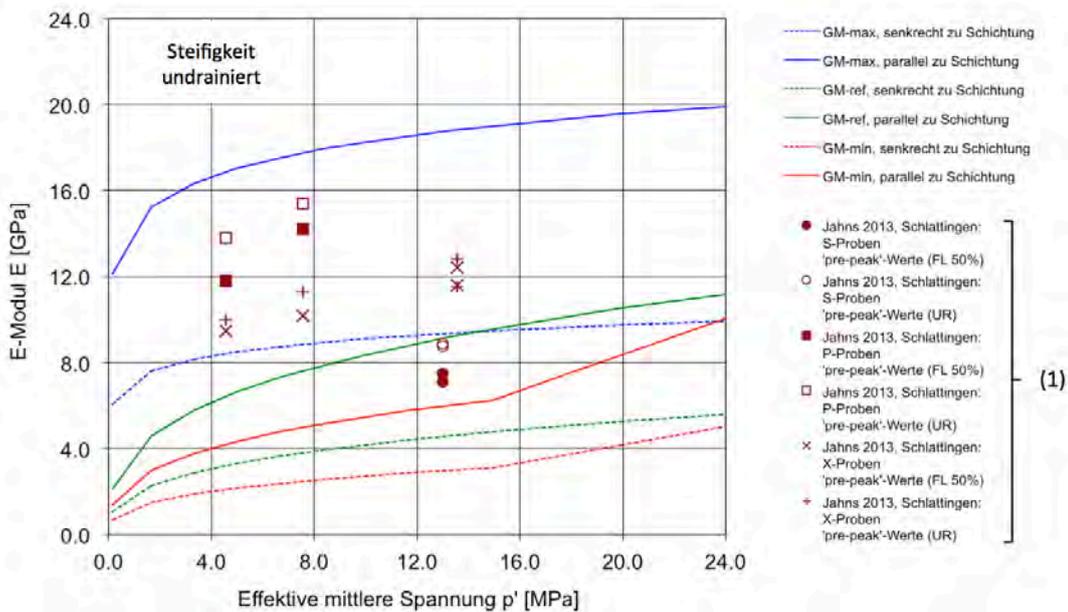


Abbildung 5: Undrainierte Steifigkeiten des Opalinustons aus den gemäss ENSI 33/461 als belastbar beurteilten Triaxialversuchen (Bohrung Schlattingen-1, NAB 13-18) im Vergleich mit den von der Nagra NAB 16-43 vorgeschlagenen tiefenabhängigen undrainierten Steifigkeiten für die Gebirgsmodelle. Erläuterungen zur Legende: (1) Undrainierte Steifigkeit wird gemäss ENSI 33/461 zutreffend ermittelt; (FL 50 %) Ermittlung als Sekantenmodul aus Erstbelastung bei 50 % der maximalen deviatorischen Spannung; (UR) Ermittlung als Tangentenmodul aus Ent-/Wiederbelastung. Quelle: ENSI 33/531.

Die Nagra differenziert für die Gebirgsmodelle (ausser GMmin) hinsichtlich der Festigkeitsparameter jeweils zwischen Höchstwerten und Restwerten der Kohäsion bzw. hinsichtlich der Steifigkeitsparameter zwischen dem E-Modul vor und dem E-Modul nach dem Bruch (NAB 16-45). Der Vergleich der verschiedenen Gebirgsmodelle zeigt, dass die Höchstwerte der Kohäsion («peak value») sowie die E-Moduln vor dem Bruch («pre-peak» E-Moduln) von GMmin zu GMmax stark zunehmen, während die Restwerte der Kohäsion sowie die E-Moduln nach dem Bruch («post-peak» E-Moduln) von der Nagra für alle Gebirgsmodelle gleich gross angenommen und mit dem von GMmin gleichgesetzt werden. Diese Vorgehensweise der Nagra hat zur Folge, dass für den E-Modul im Nachbruchbereich bei GMref ein um 35 % geringerer Wert und bei GMmax sogar ein um 70 % geringerer Wert resultiert. Das ENSI und seine Experten halten so grosse Unterschiede zwischen dem E-Modul vor und dem E-Modul nach dem Bruch für fragwürdig (ENSI 33/531). Die belastbaren Daten aus ausgewählten Triaxialversuchen von NAB 13-18 an Proben aus der Bohrung Schlattingen-1 zeigen ebenfalls viel geringere Unterschiede.

Die Quantifizierung der Tiefenabhängigkeit der geomechanischen Parameter durch die Nagra im NAB 16-43 mittels des *Critical State*-Modells ist mit grossen Ungewissheiten behaftet. Die einfachere, direkte und auch von der Nagra als naheliegender bezeichnete Ableitung der Steifigkeitsparameter («pre-peak» E-Modul) aus der Steigung der Erstbelastungsgerade und der Steigung der Ent- bzw. Wiederbelastungsgerade (ENSI 33/531) im Vergleich zur theoretischen Vorgehensweise der Nagra weist auf eine deutlich ausgeprägtere Zunahme der Steifigkeit im Tiefenbereich zwischen 600 und 900 m u. T. hin. Während die Nagra gemäss NAB 16-43 je nach betrachtetem Gebirgsmodell von einer Zunahme des E-Moduls von 5 % bis 15% ausgeht, würde sich aufgrund der direkten Methode eine Zunahme des E-Moduls von rund 50 % ergeben. Die vorliegenden Laborversuche lassen bezüglich der Steifigkeit keine klaren Schlüsse zu, welches Szenario wahrscheinlicher ist. Es liegen zudem bezüglich der tiefenabhängigen Festigkeit keine Laborversuche vor, um die Aussagen der Nagra zu prüfen.

Es bestehen deshalb aufgrund der geringen Datenbasis grosse Ungewissheiten bezüglich der Quantifizierung der geomechanischen Parameter. Diese Ungewissheiten betreffen nicht nur die Bandbreite der Festigkeits- und

Steifigkeitsparameter, sondern auch das Ausmass der Änderung dieser Materialparameter mit zunehmender Tiefenlage. Deshalb wird vom ENSI und von seinen Experten auch die von der Nagra angenommene Tiefenabhängigkeit der geomechanischen Kennwerte in Frage gestellt (ENSI 33/531).

Das von der Nagra als massgebend eingestufte Gebirgsmodell GMmin ist nach heutigem Stand der Kenntnisse bezüglich der effektiven Festigkeiten und der Steifigkeiten als zu konservativ für den Opalinuston in den Standortgebieten zu bezeichnen. Diese Einschätzung stimmt auch weitgehend mit der Einschätzung der Nagra im NAB 16-43 (Kapitel 4.2) zur effektiven Festigkeit überein: «From the experimental data, GMmax is considered more realistic for in-situ properties for situations represented by Benken and Schlattingen boreholes. For a Weiach and Riniken borehole environment with clay mineral contents around 60 % GMref is considered to be more appropriate».

2.9.4 Geologische Gefährdungsbilder

Angaben der Nagra

Im NAB 16-45 werden die aus den Baugrundmodellen abgeleiteten, massgebenden Gefährdungsbilder beschrieben. Dort sind die relevanten geologischen Gefährdungsbilder und ihre Gruppierung für unterschiedliche geologische Situationen und unterschiedliche Zeitpunkte modellhaft dargestellt. Aufgrund der Auswertung aller Daten im NAB 16-44 werden in den verschiedenen Standortgebieten nur geringe Unterschiede in den Gefährdungsbildern erwartet. Weil weder die geomechanischen Eigenschaften des Opalinustons, noch die Richtung der horizontalen Hauptspannungen in den Standortgebieten signifikante Unterschiede zeigen, wird die Ausprägung der Gefährdungsbilder stark von den Unterschieden in den Störungsmustern sowie der Tiefenlage (Überlagerung und Betrag der Hauptspannungsmagnituden) beeinflusst.

Für die Beurteilung der Sicherheit und Machbarkeit müssen die bauwerksspezifischen Gefährdungsbilder evaluiert und beurteilt werden, welche die möglichen Bauverfahren und Ausbaukonzepte sowie die zugrunde gelegten übergeordneten Nutzungsanforderungen bzw. die spezifizierten Anforderungen an die Tragwerke mitberücksichtigen. Aus den geologischen Gefährdungsbildern lassen sich bei Berücksichtigung dieser Aspekte die im NAB 16-45 dargestellten, für die Beurteilung der Tiefenlage und Gebirgseigenschaften relevanten bauwerksspezifischen Gefährdungsbilder für jeden Profiltyp ableiten.

Massgebende Gefährdungsbilder, u. a. «druckhaftes Gebirge», werden im NAB 16-45, Kapitel 5, bei der Beurteilung des Gebirgs- und Systemverhaltens der Lagerkammer (Stollen und Kaverne) und der Lagerfeldzugangsbauwerke inkl. Versiegelungstrecken unter Berücksichtigung der verschiedenen Baugrundmodelltypen und Bauverfahren beurteilt.

Die massgebenden Gefährdungsbilder fliessen auch in die qualitative Beurteilung der betrachteten Vortriebs- und Sicherungskonzepte und Bauverfahren für den Bau der Lagerstollen und Lagerkavernen ein (NAB 16-45; NAB 16-41).

Beurteilung des ENSI

Die Nagra hat im Rahmen der Nachforderung des ENSI einen umfangreichen Katalog von Gefährdungsbildern für die Lagerebene erarbeitet. Die als relevant erachteten Gefährdungsbilder wurden in die bautechnische Bewertung nach Stand der Technik integriert. Das diesbezügliche Vorgehen ist nachvollziehbar und plausibel. Die vorgeschlagene Unterteilung der Gefährdungsbilder (Geologie, Querschnittstyp, Nutzungszustand etc.) ist sinnvoll und deckt das mögliche Spektrum ab. Die Stufengerechtigkeit ist gegeben.

Neben strukturkontrollierten Gefährdungsbildern (u. a. Niederbrüche) erachtet die Nagra das Gefährdungsbild «druckhafte Verhältnisse» als massgebend. Mit zunehmender Tiefe spielt gemäss der Nagra dieses Gefährdungsbild eine zunehmende Rolle bei der integrierten bautechnischen Beurteilung. Druckhafte Verhältnisse wurden bisher in Tunnelbauwerken im Opalinuston in der Nordschweiz selbst in 800 m u. T. und bei signifikanter tektonischer Überprägung im Faltenjura nicht beschrieben (Steiner und Metzger 1988). Dies steht im Gegensatz zu den felsmechanischen Prognosemodellen der Nagra, die unter Annahme tektonisch bedingter,

stark abgeminderter effektiver Scherfestigkeit und Steifigkeit (GMmin) in 800 m u. T. zum Teil stark druckhafte Verhältnisse vorhersagen. Entsprechend teilen das ENSI und seine Experten die Einschätzung der Nagra bezüglich druckhafter Verhältnisse und dessen Intensität nicht vorbehaltlos. Das ENSI und seine Experten stimmen den als relevant eingestuften strukturkontrollierten Gefährdungsbildern zu. Allerdings hängt die Beurteilung ihrer Intensität stark von den Berechnungsannahmen ab, die von der Nagra als massgebend eingestuft werden. Diese Annahmen werden vom ENSI und seinen Experten zum Teil in Frage gestellt (ENSI 33/530; ENSI 33/531). Das ENSI berücksichtigt diesen Aspekt bei seiner Bewertung in Kapitel 6.1.4.

2.9.5 Geomechanische Berechnungen und Tragwerksanalyse

Angaben der Nagra

Im NAB 16-45 sind alle die dokumentierten Berechnungsfälle aufgelistet. Die Berechnungen sowie die vollständigen und detaillierten Berechnungsergebnisse sind im NAB 16-45, in Anagnostou (2016a), Anagnostou (2016b), Anagnostou (2016c) sowie in Itasca (2016) dokumentiert.

Das Gebirgsverhalten wird anhand von Gebirgskennlinien für die verschiedenen Profile und Baugrundmodelltypen in Abhängigkeit der Tiefe untersucht. Es werden die Deformationen am Ausbruchsrand (Konvergenzen), die Ausdehnung der plastischen Zone (Radius der plastischen Zone) sowie weitere Zustandsgrössen (Volumendehnung, Verteilung der Deformationen, etc.) betrachtet. Dazu wurden die Ergebnisse aus Itasca (2016) verwendet.

Das Tragverhalten der Ausbruchsicherung bzw. des Ausbaus sowie davon abgeleitete Bemessungsgrössen und Ergebnisse der Vordimensionierung werden untersucht. Dazu gehören auch Erkenntnisse zum Verhalten des Gesamtragsystems unter Berücksichtigung der möglichen Massnahmen und ihrer Wirksamkeit (z. B. Anwendung Widerstandsprinzip oder Ausweichprinzip). Dazu wurden vor allem die Ergebnisse aus NAB 16-45 und Anagnostou (2016b) verwendet.

Die geomechanischen Berechnungen wurden für die Nutzungszustände Vortrieb (NZ-1), Betrieb (NZ-2), Verschluss (NZ-3), Rückholung nach Verfüllung bis zum Verschluss des Gesamtlagers (NZ-4) und Aufsättigung (NZ-5) gemäss NAB 16-45 durchgeführt. Diese Nutzungszustände werden als abdeckend für die Berechnungen eingestuft. Das Tragwerkskonzept ist im NAB 16-45 beschrieben und analysiert. Aus den übergeordneten Nutzungsanforderungen wurden die Anforderungen an das Tragwerk abgeleitet. Die Resultate und Schlussfolgerungen aus den geomechanischen Berechnungen bzgl. des Gebirgsverhaltens und des Systemverhaltens, die aus den Berechnungen abgeleiteten Bemessungsgrössen (Vordimensionierung) für verschiedene Ausbruch- und Sicherungsmethoden sowie die festgelegten Ausbruchsicherungstypen sind im NAB 16-45 und NAB 16-46 dokumentiert. Dort werden die Berechnungsergebnisse diskutiert. Die Berechnungen zeigen, dass trotz tiefenabhängiger Verbesserung der Gebirgseigenschaften das Gebirgsverhalten mit der Tiefe deutlich ungünstiger wird. Dies gilt auch, wenn für die grössere Tiefe ein günstigeres Baugrundmodell (BGM) als in geringerer Tiefe unterstellt wird.

Beurteilung des ENSI

Die von der Nagra angewendeten Berechnungsverfahren und Berechnungsmethoden für die Untersuchung des Gebirgsverhaltens und des Systemverhaltens sind aus Sicht des ENSI und seiner Experten geeignet und stufengerecht. Die durchgeführten Betrachtungen und Berechnungen sind nachvollziehbar dokumentiert. Die von der Nagra rechnerisch analysierten Nutzungszustände sind grundsätzlich vollständig. Die Versiegelungsstrecken, insbesondere die Zwischensiegel entlang der HAA-Lagerstollen, werden dabei wenig detailliert behandelt. Die abgeleiteten Anforderungen an das Tragwerk sowie die vorgesehenen Massnahmen zur Gewährleistung der Nutzungsanforderungen sind ausführlich behandelt. Die Erarbeitung der Sicherungstypen im NAB 16-46 erfolgt teilweise bereits auf Stufe Vorprojekt (ENSI 33/530).

Die felsmechanischen Berechnungen werden anhand vereinfachter Stoffansätze, basierend auf einem isotropen linear-elastischen Stoffansatz mit Mohr-Coulomb-Bruchbedingungen mit spröd-plastischem oder ideal-plastischem Nachbruchverhalten, durchgeführt. Die Festigkeit wird in den Modellen sowohl isotrop als auch

transversal isotrop abgebildet. Die Anwendung dieser Stoffansätze erscheint dem ENSI und seinen Experten grundsätzlich nachvollziehbar, plausibel und der Stufe des Projektes angepasst.

Die von der Nagra vorgeschlagene Definition und Zuordnung der Gebirgsmodelle (GMmax repräsentativ für sandige Fazies, GMref repräsentativ für tonige Fazies, GMmin repräsentativ für tektonische Überprägung) ist aufgrund der fehlenden experimentellen Datenbasis zum jetzigen Zeitpunkt in quantitativer Hinsicht nicht begründbar. Die Beurteilungen der Nagra im NAB 16-45 und NAB 16-41 bezüglich des Gebirgs- und des Systemverhaltens basieren auf felsmechanischen Berechnungen mit den Gebirgsmodellen GMmin und GMref. Die Annahme der Nagra, dass das Gebirgsmodell GMmax irrelevant ist (NAB 16-45) ist nach Einschätzung des ENSI und seiner Experten aufgrund der vorliegenden Daten nicht nachvollziehbar.

Die meisten dokumentierten felsmechanischen Berechnungen zur Beurteilung des Einflusses der Tiefenlage auf das druckhafte Gebirgsverhalten und das Systemverhalten (Tragwerksanalyse) wurden unter der Annahme des Gebirgsmodells GMmin durchgeführt (NAB 16-45). Bei diesen Berechnungen hat die Nagra verschiedene konservative Annahmen für die Gebirgskennwerte getroffen (isotrope Festigkeit gemäss Eigenschaften entlang der Schichtung, isotrope Steifigkeit gemäss Eigenschaften senkrecht zur Schichtung), die sehr ungünstig sind. Die Annahme des Gebirgsmodells GMmin als «abdeckend für die Prüfung der Machbarkeit» sowie weitere von der Nagra getroffene konservative Annahmen zur Vereinfachung des Berechnungsmodells (also eine Anhäufung konservativer Annahmen) sind aus Sicht des ENSI und seiner Experten sinnvoll für die Prüfung der Machbarkeit eines Standortgebiets, jedoch nicht um eindeutige Nachteile eines Standortgebiets gegenüber anderen Standortgebieten nachzuweisen (ENSI 33/531).

Die wenigen von der Nagra dokumentierten felsmechanischen Berechnungen unter Annahme des Gebirgsmodells GMref (Baugrundmodell BGM-2) zur Beurteilung des Einflusses der Tiefenlage auf das druckhafte Gebirgsverhalten (NAB 16-45; Itasca 2016) enthalten verschiedene zusätzliche konservative Annahmen (Festlegung des Übergangs von der Höchst- zur Restfestigkeit, Festlegung bzw. Anwendung des E-Moduls im Nachbruchbereich für das gesamte Gebirge), die auch sehr ungünstig sind. Aufgrund dieser Vorgehensweise gehen die Unterschiede zwischen den Gebirgsmodellen GMref und GMmin verloren, wodurch die damit erzielten Berechnungsergebnisse praktisch übereinstimmen. Somit sind das verwendete Berechnungsmodell bzw. die vereinfachenden Annahmen ungeeignet, um den Einfluss der unterschiedlichen Materialparameter auf das druckhafte Gebirgsverhalten zu erfassen (ENSI 33/531).

Die Nagra eliminiert mit der Einstufung des Gebirgsmodells GMmax als irrelevant einen grossen Teil der durch die drei Gebirgsmodelle (GMmax, GMref, GMmin) gegebenen Bandbreite der geomechanischen Parameter. Damit wird den Ungewissheiten bezüglich des Materialverhaltens nicht mit einer ausreichend grossen Bandbreite der geomechanischen Parameter Rechnung getragen (ENSI 33/461). Für das Gebirgsmodell GMmax liegen in den eingereichten Berichten keine Berechnungen vor, obwohl dieser Parametersatz die wenigen zuverlässigen, für den relevanten Tiefenbereich von 600 m bis 900 m massgebenden Triaxial- und Ödometerversuche am besten wiedergibt.

Das ENSI kommt zum Schluss, dass die Nagra den Einfluss der Bandbreite der geomechanischen Parameter stark unterschätzt bzw. im Vergleich dazu den Einfluss der Tiefenlage stark überschätzt. Die von den Experten des ENSI durchgeführte Sensitivitätsstudie berücksichtigt alle Gebirgsmodelle, eine weniger ausgeprägte Abnahme des E-Moduls im Nachbruchbereich (gegenüber dem Verhalten vor Erreichen des Bruchzustands) und eine Zuordnung des E-Moduls im Nachbruchbereich einzig auf die plastische Zone. Die Studie kommt zum Schluss, dass rechnerisch der Einfluss der möglichen Materialeigenschaften (GMmin bis GMmax) bedeutender ist als der Einfluss der Tiefenlage (ENSI 33/531).

Die von der Nagra getroffenen Annahmen führen aus Sicht des ENSI und seiner Experten insgesamt zur Überschätzung der Gebirgsverformungen im Umfeld der Lagerkammern. Diese Überschätzung der Gebirgsverformungen wirkt sich unmittelbar auf die Dimensionierung des Ausbaus der Lagerkammern aus und beeinflusst weitere damit zusammenhängende Beurteilungen der Nagra im NAB 16-45 und NAB 16-41.

2.9.6 Schlussfolgerungen

Das ENSI begrüsst die Vorgehensweise der Nagra bei der Überarbeitung der geomechanischen Grundlagen und Unterlagen im Rahmen der Nachforderung des ENSI (ENSI 33/476). Die Beurteilung der Nagra bzgl. der bautechnischen Machbarkeit basiert auf wissenschaftlich-technischen Unterlagen, welche Nutzungsanforderungen, standortspezifische geologische Modelle, Baugrundmodelle, geomechanische Datensätze, Gefährdungsbilder, Bewertungen von Baumethoden sowie geomechanische Modellberechnungen zum Gebirgsverhalten und Tragwerksverhalten beinhalten. Der von der Nagra umfassend beschrittene Weg zur Beurteilung der maximalen Tiefenlage im Hinblick auf die bautechnische Machbarkeit wird vom ENSI und seinen Experten als stufengerecht und nachvollziehbar beurteilt.

Die in ENSI 33/476 gestellten Forderungen werden von der Nagra explizit berücksichtigt. Die Nagra ist auf den überwiegenden Teil der Hauptkritikpunkte der Experten des ENSI explizit eingegangen. Die bautechnischen Auswirkungen auf die Langzeitsicherheit infolge erhöhter Durchlässigkeit des Opalinustons in der Auflockerungszone (AUZ) werden in den Unterlagen der Nagra zur Nachforderung (NAB 16-41) mit Modellberechnungen (Dosisberechnungen) abdeckend beschrieben. Die Nagra geht jedoch auf die Auswirkungen von alternativen Verfüllkonzepten mit zementbasierten Materialien auf Bau (Tiefenlage), Betrieb und Langzeitsicherheit nicht ein (Kapitel 2.2).

Die Nagra hat die Forderung 26 des ENSI gemäss ENSI 33/115 auch bzgl. der bautechnischen Risikoanalyse (ENSI 33/170) in Etappe 2 SGT stufengerecht erfüllt. Für Etappe 3 SGT fordert das ENSI jedoch bautechnische Risikoanalysen der Zugangsbauwerke und aller sicherheitsrelevanten Bauwerke des Tiefenlagers auf Lagerebene während Bau und Betrieb sowie das Aufzeigen möglicher Einflüsse auf die Langzeitsicherheit nach Verschluss des Lagers.

Generell bestätigt das Vorgehen der Nagra, unter Einbezug überwiegend konservativer geomechanischer Grundlagen und vereinfachter Berechnungsannahmen die bautechnische Machbarkeit an allen diskutierten Standortgebieten. Das ENSI und seine Experten beurteilen die dazu verwendeten technisch-wissenschaftlichen Grundlagen im Sinn rein bautechnischer Machbarkeitsüberlegungen als ausreichend. Für die quantitative Beurteilung der Tiefenlage und für den Nachweis eindeutiger Nachteile eines Standortgebiets aus bautechnischer Sicht ist die geologisch-geotechnische Grundlage jedoch nicht belastbar.

Die spärliche Datengrundlage zu den standortspezifischen geomechanischen und geologischen Verhältnissen sowie die Superposition von vorwiegend konservativen Annahmen (abdeckende effektive Festigkeit und Steifigkeit gemäss dem Parametersatz GMmin, vereinfachende Berechnungsannahmen) erlauben keine abschliessende und belastbare quantitative Beurteilung der maximalen Tiefenlage im Hinblick auf den Nachweis eindeutiger Nachteile aus bautechnischer Sicht. Die für die Argumentation von der Nagra verwendeten geomechanischen Kennwerte und vereinfachten Berechnungsannahmen (effektive Festigkeiten der Bettung, E-Modul normal zur Schichtung) werden vom ENSI und seinen Experten als nicht belastbar bzw. zu konservativ beurteilt. Dies betrifft insbesondere die Annahme der Nagra, dass GMmin für gesamte Standortgebiete massgebend ist, den nicht stichhaltigen Ausschluss von GMmax für die Beurteilung der Tiefenlage, die verbleibenden grossen Unsicherheiten bei den tiefenabhängigen effektiven Festigkeiten und Steifigkeiten, sowie die vereinfachenden Annahmen zu den geomechanischen Kennwerten in numerischen Berechnungen mit den Parametersätzen GMmin und GMref. Folglich ist das Ergebnis der Argumentation der Nagra zur Beschränkung der BE/HAA-Lagertiefen nicht ausreichend robust (ENSI 33/531).

2.10 Grundlagen für die Beurteilung der Tiefenlage und der bautechnischen Machbarkeit der SMA-Lagerkammern im 'Brauner Dogger', den Effinger Schichten und den Mergel-Formationen des Helvetikums

In diesem Kapitel beurteilt das ENSI die von der Nagra in Etappe 2 SGT eingereichten Grundlagen für die Beurteilung der Tiefenlage und der bautechnischen Machbarkeit der SMA-Lagerkammern in den Standortgebieten der Nordschweiz, unter Berücksichtigung der Wirtgesteine 'Brauner Dogger' (Standortgebiete Zürich Nordost und Nördlich Lägern) und Effinger Schichten (Standortgebiet Jura-Südfuss), sowie im Standortgebiet Wellenberg mit dem Wirtgestein Mergel-Formationen des Helvetikums. Die entsprechenden Grundlagen im Fall des Wirtgesteins Opalinuston werden im Kapitel 2.9 beurteilt, die qualitative Bewertung des entsprechenden Indikators erfolgt in Kapitel 5.3.

2.10.1 'Brauner Dogger'

Angaben der Nagra

Die Tongesteinsabfolge 'Brauner Dogger' wurde in Etappe 1 SGT in den geologischen Standortgebieten Zürich Nordost und Nördlich Lägern als Wirtgestein für das SMA-Lager vorgeschlagen (NTB 14-01). Mit dem Begriff 'Brauner Dogger' wird hier eine Abfolge von tonreichen Gesteinseinheiten zusammengefasst, welche stratigraphisch zwischen dem Opalinuston und den Effinger Schichten liegt und ungefähr östlich der Aare im östlichen Tafeljura (Bereich nördlich der Lägern bis Schaffhausen) vorkommt (siehe Kapitel 3.1). Gemäss aktuellen Modellvorstellungen würden die Lagerkammern in der tonreichsten Abfolge TA-1 platziert (NTB 14-01).

In Etappe 2 SGT wurden Kernproben des 'Braunen Doggers' aus der Bohrung Schlattingen-1 hauptsächlich in eindimensionalen Kompressionsversuchen untersucht (NAB 12-50). Kompressionsindex und Quelleigenschaften der Proben waren dabei vergleichbar mit den Resultaten aus Proben des Opalinustons (NAB 14-81). Wie im Opalinuston wurde für Proben aus dem 'Braunen Dogger' auch eine spannungsabhängige Steifigkeit beobachtet (NAB 14-81). Grundsätzlich bestätigen diese Ergebnisse, dass die tonmineralreicheren Intervalle des 'Braunen Doggers' (insbesondere die tonigen Abfolgen) felsmechanisch mit dem Opalinuston zu vergleichen sind. Für die sandig-kalkigeren Lagen («harte Bänke») ist von höheren Festigkeiten auszugehen (NTB 14-02-IV).

In der Tongesteinsabfolge 'Brauner Dogger' sind im betrachteten Verbreitungsraum keine Untertagebauten bekannt. Aufgrund der Resultate felsmechanischer Untersuchungen an Proben des 'Braunen Doggers' aus der Bohrung Schlattingen-1 und aufgrund von lithologischen Analogien und der gegenüber dem Opalinuston ähnlichen maximalen Versenkungstiefe ergeben sich für die tonreichste Abfolge des 'Braunen Doggers' Festigkeiten und Steifigkeiten, die mit den Kennwerten des Opalinustons vergleichbar sind. Die vorhandenen Einschaltungen sandig-kalkiger Partien lassen zwar insgesamt höhere Gesteinsfestigkeiten als für die tonig-mergeligen Schichten erwarten, vermindern aber die Homogenität des Gebirges. Die Untertagebauten (inkl. Lagerkammern) müssen mit einem angemessenen Ausbau gesichert werden. Die bautechnische Machbarkeit ist generell gewährleistet. Beim Bau der Lagerkammern sind Erschwernisse, welche anspruchsvolle Bauverfahren erforderlich machen, nicht auszuschliessen (NTB 14-01).

Beurteilung des ENSI

Die Nagra hat im Rahmen von Etappe 2 SGT keine felsmechanischen Betrachtungen und Berechnungen zum 'Braunen Dogger' für die bautechnische Beurteilung der Tiefenlage eingereicht. Das ENSI ist jedoch mit der Aussage der Nagra einverstanden, dass die tonreichste Abfolge TA-1 des 'Braunen Doggers' lithologisch dem Opalinuston ähnlich ist und daher vergleichbare felsmechanische Eigenschaften aufweist.

Das ENSI ist mit der qualitativen Einschätzung der Nagra bzgl. der bautechnischen Machbarkeit der SMA-Lagerkammern im Wirtgestein 'Brauner Dogger' einverstanden. Das ENSI sieht in Analogie zum Opalinuston (Kapitel 2.9) die Machbarkeit der SMA-Lagerkammern in den Standortgebieten Zürich Nordost und Nördlich Lägern bis in eine Tiefe von 800 m u. T. (Mindestanforderung an Indikator 1 aus Etappe 1 SGT) grundsätzlich als gegeben.

In Etappe 3 SGT sind für den 'Braunen Dogger' die erforderlichen Projektierungsgrundlagen für die Beurteilung des Gebirgsverhaltens und des Systemverhaltens (Wechselwirkung zwischen Gebirge und Ausbau) im Bereich der Zugangsbauwerke der Projektstufe entsprechend zu überarbeiten und zu erweitern. Dabei ist insbesondere die von der Nagra bzgl. der geomechanischen Eigenschaften verwendete Analogie zum Opalinuston mit ausreichenden Daten zu erhärten. Zudem ist der Einfluss der «harten Bänke» (Heterogenität) auf das Gebirgsverhalten weiter zu untersuchen.

2.10.2 Effinger Schichten

Angaben der Nagra

Die Effinger Schichten wurden im Rahmen von Etappe 1 SGT nur im geologischen Standortgebiet Jura-Südfuss als Wirtgestein vorgeschlagen. Dort weisen sie die erforderliche Mächtigkeit in geeigneter Tiefenlage sowie eine ausreichende laterale Ausdehnung auf. Die mächtigste Kalkmergelabfolge im Standortgebiet Jura-Südfuss ist die lithofazielle Einheit KMA-5 (NTB 14-01); in dieser Einheit würden die Lagerkammern platziert (NTB 14-01).

Bei den Effinger Schichten (Effingen-Member der Wildegg-Formation, Oxfordien) handelt es sich um eine bis knapp 250 m mächtige Abfolge von marinen Kalkmergeln, in die einzelne Kalkbankabfolgen eingeschaltet sind (NAB 13-16). Basierend auf geomechanischen Laborversuchen an Kernproben der EWS-Bohrung Oftringen (NAB 08-25) wurden im NTB 14-02-IV, Festigkeitsdaten zusammengefasst. Für Etappe 2 SGT wurde mit Kernproben der Bohrung Gösigen KB5a ein weiteres geomechanisches Laborprogramm durchgeführt (NAB 11-08). Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass die betrachteten Mergel der Effinger Schichten ein anisotropes mechanisches Verhalten zeigen. Die Wertebereiche der vorkommenden Mergelvarietäten überlappen sich sowohl bei den elastischen Parametern als auch bei den Festigkeiten. Tendenziell ergeben sich erwartungsgemäss für die Tonmergel die geringsten und für die Kalkmergel die höchsten Festigkeiten und E-Moduln (NTB 14-02-IV). Wegen der Kalkbankabfolgen ist die (vertikale) Homogenität der Effinger Schichten im Meterbereich bedeutend ungünstiger als diejenige des Opalinustons. Bei den Kalkbankabfolgen kann eine Verkarstung nicht ausgeschlossen werden (NTB 14-01).

Erfahrungen aus dem Tunnelbau, vor allem im Faltenjura über die vergangenen hundert Jahre, haben gezeigt, dass Strassen- und Eisenbahntunnel in den Effinger Schichten mit Überlagerungen von bis zu 600 m gebaut werden können. Gemäss der wenigen vorhandenen Literaturdaten und der Untersuchungen an Proben aus der EWS-Bohrung Oftringen weisen die Effinger Schichten deutlich höhere Steifigkeiten und Festigkeiten als der Opalinuston auf (NTB 14-02-IV). Aufgrund der petrophysikalischen Daten wird nur eine geringe Anisotropie in den felsmechanischen Eigenschaften erwartet. Im Vergleich zum Opalinuston ergibt dies einen kleineren Einfluss der Schichtung. Insgesamt sind die geotechnischen Bedingungen für den Bau von Lagerkammern in den Effinger Schichten günstiger als im Opalinuston. Durch die tektonische Überprägung im geologischen Standortgebiet Jura-Südfuss (kleinräumige Zerklüftung) sind allenfalls gewisse bautechnische Erschwernisse zu erwarten (NTB 14-01).

Beurteilung des ENSI

Die Nagra hat im Rahmen von Etappe 2 SGT keine felsmechanischen Betrachtungen und Berechnungen zu den Effinger Schichten für die bautechnische Beurteilung der Tiefenlage eingereicht. Das ENSI kann deshalb diesbezüglich nur eine qualitative Beurteilung vornehmen.

Aufgrund der Erfahrungen beim Bau von Strassen- und Eisenbahntunnelbauwerken in den Effinger Schichten mit Überlagerungen von bis zu 600 m und der im Vergleich zum Opalinuston zu erwartenden höheren Steifigkeiten und Festigkeiten der Effinger Schichten (Laboruntersuchungen an Proben aus den Bohrungen Oftringen und Gösigen KB05a, NTB 14-02-IV) ist das ENSI der Ansicht, dass die Erstellung von SMA-Lagerkavernen in diesem Wirtgestein im Standortgebiet Jura-Südfuss bis zu einer Tiefe von 800 m u. T. (Mindestanforderung an Indikator 1 aus Etappe 1 SGT) trotz der zu erwartenden geotechnischen Erschwernisse grundsätzlich bautechnisch machbar ist.

In Etappe 3 SGT sind für die Effinger Schichten die erforderlichen Projektierungsgrundlagen für die Beurteilung des Gebirgsverhaltens und des Systemverhaltens (Wechselwirkung zwischen Gebirge und Ausbau) im Bereich der Zugangsbauwerke der Projektstufe entsprechend zu überarbeiten und zu erweitern.

2.10.3 Mergel-Formationen des Helvetikums (Standortgebiet Wellenberg)

Angaben der Nagra

Die Mergel-Formationen des Helvetikums wurden im Rahmen von Etappe 1 SGT nur im Standortgebiet Wellenberg als Wirtgestein vorgeschlagen. Dort weisen sie die erforderliche Mächtigkeit in geeigneter Tiefenlage sowie eine ausreichende laterale Ausdehnung auf. Es ist vorgesehen, die Lagerkammern auf mehreren Stockwerken in geeigneter Tiefenlage innerhalb des Wirtgesteinskörpers zu platzieren (NTB 14-01). In Etappe 2 SGT wird das Standortgebiet Wellenberg wegen der in allen Standortgebieten vertieften Untersuchung der Erosionsprozesse auch diesbezüglich detaillierter betrachtet. Lagerebenen deutlich tiefer als die Talebene wurden deshalb in die Analyse einbezogen. Die Frage der bautechnischen Machbarkeit in grösserer Tiefe als 800 m u. T. wurde deshalb nochmals vertieft angegangen (NAB 17-01, Frage 79).

Eine übersichtliche Darstellung der petrophysikalischen und felsmechanischen Daten der Mergel-Formationen des Helvetikums im Standortgebiet Wellenberg ist dem Bericht zur «Geosynthese Wellenberg 1996» (NTB 96-01) zu entnehmen. Die Daten werden im NTB 14-02-IV, Anhang A, Tabelle A-1 und A-2 zusammengefasst.

Die betrachteten Mergel-Formationen des Helvetikums im Standortgebiet Wellenberg zeigen im Massstab der Probenkörper eine ausgeprägte Anisotropie auf. Die Datenstreuung lässt auf eine erhebliche Heterogenität der Mergel schliessen. Die Bandbreiten der Steifigkeits- und Festigkeitsparameter der Mergel überlappen sich stark und es besteht aus felsmechanischer Sicht keine klare Trennung zwischen Ton-, Kalk- und Sandmergeln. Tendenziell ergeben sich erwartungsgemäss für die Tonmergel die geringsten und für die Sand- und Kalkmergel die höchsten Festigkeiten und E-Moduln (NTB 14-02-IV).

Das Spannungsfeld im Standortgebiet Wellenberg ist aufgrund vieler Hydrofrac-Messkampagnen in verschiedenen Bohrungen gut belegt (NTB 96-01). Die Spannungsrichtung ist konsistent mit regionalen Herdflächenlösungen. Messungen der Spannungsmagnituden sowie numerische Modellberechnungen (Nagra 1996) zeigen, dass die Topographie lokal einen starken Einfluss auf das Spannungsfeld hat und dass die tektonischen Spannungen relativ hoch sind (NTB 14-02-IV).

Bei der Evaluation der gebirgsmechanischen Eigenschaften sind in den Mergel-Formationen des Helvetikums die vorhandenen Diskontinuitäten und Strukturen zu berücksichtigen. Die deutlich höheren Festigkeiten und Steifigkeiten der Kalkmergel und Tonmergel der Palfris-Formation und der Vitznau-Mergel führen im Vergleich zu Opalinuston je nach Tiefenlage der Lagerkammern zu deutlich geringerem Aufwand für die bautechnische Realisierung. Die geotechnischen Verhältnisse sind insgesamt etwa gleich wie in den Effinger Schichten (NTB 14-01).

Die bautechnische Machbarkeit für das SMA-Lager in den betrachteten Mergel-Formationen des Helvetikums ist im Rahmen des Projekts Wellenberg eingehend untersucht worden (NTB 96-01). Erfahrungen aus dem Tunnelbau (z. B. Seelisbergtunnel) haben gezeigt, dass Strassen- und Eisenbahntunnel in den Mergel-Formationen des Helvetikums mit Überlagerungen von bis zu 800 m und beträchtlichen Ausbruchquerschnitten gebaut werden können (NTB 14-01).

Die Tiefenlage wird in Bezug auf die geotechnischen Bedingungen in den Mergel-Formationen des Helvetikums im NAB 14-81 beurteilt. Aufgrund aktualisierter Lagerperimeter in Tiefenlagen bis 1000 m wurden auf der Basis der gleichen geomechanischen Datensätze wie im NAB 04-11 aktualisierte numerische Berechnungen für Tiefenlagen von 800, 1000 und 1200 m u. T. durchgeführt. Das Berechnungsmodell basiert auf dem gleichen Modell zur Untersuchung des Gebirgsverhaltens im Opalinuston gemäss NAB 14-81. Die aktualisierten numerischen Berechnungen wurden anhand des Referenzprofils K09 und mit Kennwerten des Gebirgsmodells GM1 (intaktes Gebirge) durchgeführt, jeweils mit Orientierung der Bauwerksachse parallel und senkrecht zur maximalen Horizontalspannung im Gebirge.

Die Ergebnisse der durchgeführten Berechnungen zur Untersuchung des undrainierten (kurzfristigen) und drainierten (langfristigen) Gebirgsverhaltens, mit und ohne Berücksichtigung des Ausbaus der Lagerkaverne, sind im NAB 14-81 dokumentiert. Die maximalen Deformationen aus allen untersuchten Fällen variieren in 800 m u. T. zwischen 15 und 23 mm und in 1200 m u. T. zwischen 26 und 52 mm. Daraus ergeben sich normierte vertikale Konvergenzen um ca. 0.2 % in 800 m u. T. bis 0.35 % in 1200 m u. T. sowie normierte vertikale Ausdehnungen der plastifizierten Zone von ca. 1.3 (800 m u. T.) bis ca. 1.6 (1200 m u. T.). Damit liegen die Werte deutlich im günstigen Bereich gemäss den Entwurfsindikatoren im NAB 14-81.

Basierend auf den durchgeführten Berechnungen und den Erfahrungen aus dem Seelisbergtunnel können den modellhaften Kavernentypen für das SMA-Lager im Standortgebiet Wellenberg Tiefenbereiche zugeordnet werden, in welchen mit günstigen Verhältnissen im Hinblick auf die bautechnische Machbarkeit unter Berücksichtigung der Anforderungen an die Langzeitsicherheit gerechnet werden kann (NAB 14-81). Dem Kavernenprofil K16 wird eine maximale Tiefe von 800 m u. T., dem Kavernenprofil K12 der Tiefenbereich 800 m bis 900 m u. T., dem Kavernenprofil K09 oder kleineren Profilen der Tiefenbereich 900 m bis 1000 m u. T. zugeordnet.

Die Erstellung und der Betrieb der SMA-Lagerkammern können angesichts der im Vergleich mit dem Opalinuston höheren Gesteinsfestigkeit der Mergel-Formationen des Helvetikums auch in grösseren Tiefen als 800 m u. T. zuverlässig und sicher gewährleistet werden (NTB 14-01). Die Erfahrungen beim Bau des Seelisbergtunnels und des Lötschberg-Basistunnels durch die Mergel-Formationen des Helvetikums zeigen, dass die aufgetretenen bautechnischen Schwierigkeiten mit den gewählten Baumethoden und Ausbruchsicherungsmassnahmen gut beherrscht werden konnten (NAB 14-81; NAB 17-01, Frage 79).

Beurteilung des ENSI

Die von der Nagra im NAB 14-81 (Anhang E) dokumentierten numerischen Berechnungen für die Beurteilung des kurzzeitigen (undrainierten) und langzeitigen (drainierten) Gebirgsverhaltens mit zunehmender Tiefe wurden vereinfachend unter der Annahme eines intakten Gebirges (GM1) durchgeführt. Relevante Berechnungsannahmen, wie z. B. bzgl. der Vorverformungen vor Installation des Ausbaus, sind nicht bekannt. Es ist auch unklar, wie der Ausbau des Kavernenquerschnitts K09, insbesondere die Steifigkeit des Ausbaus, in den Berechnungen berücksichtigt wurde. Zusätzliche Betrachtungen zur Berücksichtigung von vorhandenen lokalen geologischen Diskontinuitäten und Strukturen im Gebirge sowie eine Tragwerksanalyse zur Beurteilung des Systemverhaltens (Gebirge-Ausbau) fehlen.

Das verwendete Berechnungsmodell basiert auf dem gleichen Modell zur Untersuchung des Gebirgsverhaltens im Opalinuston gemäss NAB 14-81. Mit diesem Modell können eine Anisotropie der in situ-Spannungen, eine Festigkeitsanisotropie, die Entfestigung und hydromechanische Kopplungen explizit berücksichtigt werden. Hingegen wird von der Nagra bei den Berechnungen ein isotropes Steifigkeitsverhalten zugrunde gelegt, d. h. der E-Modul des Gebirges ist konstant und von der betrachteten Tiefe und vom verwendeten Gebirgsmodell unabhängig. Damit wird die zu erwartende anisotrope Steifigkeit der Mergel-Formationen nicht berücksichtigt.

Für die Betrachtung des langfristigen (drainierten) Gebirgsverhaltens sind Berechnungen mit drainierten (effektiven) Festigkeits- und Steifigkeitsparametern erforderlich. Die hierfür im NAB 14-81 dokumentierten Berechnungen wurden zwar mit drainierten Scherfestigkeitsparametern, aber mit einem undrainierten konstanten E-Modul (13 GPa) durchgeführt. Dieses entspricht dem E-Modul parallel zur Schieferung (nicht Schichtung) gemäss NAB 04-11. Diese Annahme ist sehr konservativ, sie berücksichtigt nicht die senkrecht zur Schieferung ermittelten E-Moduln (33 GPa) und ist damit nicht nachvollziehbar. Ferner ist aus Sicht des ENSI die Wahl eines konstanten E-Moduls für den betrachteten Tiefenbereich 800 m bis 1200 m u. T. nicht angemessen. Eine mögliche Zunahme des E-Moduls mit der Tiefe kann die Berechnungsergebnisse substantiell beeinflussen, insbesondere die Grössenordnung der Gebirgsverformungen und der Lasten auf dem Kavernenausbau, und zu falschen Schlussfolgerungen führen.

Die von der Nagra für die Beurteilung der ermittelten normierten vertikalen Konvergenzen und der normierten vertikalen Ausdehnung der plastischen Zone angewendeten Entwurfsindikatoren (Konvergenzkriterium) gemäss NAB 14-81 werden vom ENSI und seinen Experten als «nicht geeignet» beurteilt (ENSI 33/460).

Aufgrund der Erfahrungen beim Bau des Seelisbergtunnels und des Lötschberg-Basistunnels in den Mergel-Formationen des Helvetikums ist das ENSI der Ansicht, dass die Erstellung der SMA-Lagerkavernen in den Mergel-Formationen des Helvetikums auch in grösseren Tiefen als 800 m u. T. (Mindestanforderung an Indikator 1 aus Etappe 1 SGT) grundsätzlich bautechnisch machbar ist.

2.11 Bautechnische Risikoanalyse

Für den bautechnischen Vergleich der SMA- und HAA-Standortgebiete und der jeweiligen Zugangsbauwerke fordert das ENSI unter anderem, dass bautechnische Risikoanalysen durchgeführt und die Resultate in den Sicherheitsanalysen berücksichtigt werden (ENSI 33/115, Forderung 26).

Die Anforderungen des ENSI an die bautechnischen Risikoanalysen und deren Anwendung sind in ENSI 33/170 dokumentiert. Darin fordert das ENSI qualitative bautechnische Risikoanalysen pro Standortgebiet resp. pro untertägigen Lagerperimeter und deren jeweilige Zugangsbauwerke unter Einbezug der Variabilität der Gebirgseigenschaften und unter Berücksichtigung der zugehörigen Standortareale für die Oberflächenanlagen. Anhand der aus den Baugrundmodellen abgeleiteten geologischen Gefährdungsszenarien, wie z. B. Niederbrüche, wasserführende Gebirgszonen, Karst, Wassereinbrüche, etc., sollen für Bau und Betrieb der Zugangsbauwerke und des Tiefenlagers Gefährdungsbilder und Eintretenshäufigkeiten sowie Massnahmen zu deren Verhinderung, Früherkennung bzw. Beherrschung aufgezeigt werden. Die Analysen basieren in der Regel auf standortspezifischen Gefährdungsbildanalysen und den geplanten bautechnischen Massnahmen für die Zugangsbauwerke und für alle sicherheitsrelevanten Bauwerke des Tiefenlagers während Bau und Betrieb. Mögliche Auswirkungen auf die Langzeitsicherheit nach Verschluss des Lagers sollen ebenfalls aufgezeigt werden. Die Ergebnisse der bautechnischen Risikoanalysen müssen in die Bewertung und in den sicherheitstechnischen Vergleich der verschiedenen Standortgebiete einfließen.

In Ergänzung zur bautechnischen Risikoanalyse hat die Nagra gemäss ENSI 33/170 stufengerecht anhand einer systematischen, generischen Betrachtung auch den sicheren Normalbetrieb der Zugangsbauwerke (wie z. B. Förderung von Lasten und Personen) und die Beherrschbarkeit der Auswirkungen von Störfällen aufzuzeigen. Diese ergänzenden Sicherheitsbetrachtungen für die Zugangsbauwerke während der Betriebsphase werden im Kapitel 2.12 behandelt.

Angaben der Nagra

Die Anforderungen des ENSI (ENSI 33/170) sind im NAB 14-50 «Bautechnische Risikoanalyse zur Realisierung der Zugangsbauwerke» umgesetzt. Zur Erfüllung der Anforderungen des ENSI gibt es weiter den Bericht NAB 14-51 «Ergänzende Sicherheitsbetrachtungen für die Untertageanlagen der geologischen Tiefenlager in der Betriebsphase», welcher unter Berücksichtigung der im Kapitel 9 des Berichts NAB 14-50 aufgezeigten Risiken vertieft auf den Betrieb eines geologischen Tiefenlagers eingeht.

Der Detaillierungsgrad der Beurteilung richtet sich nach der Stufe des Projekts, welches sich im Stadium einer Vorstudie gemäss SIA 112 befindet. Die bautechnische Risikoanalyse wird im Zuge der weiteren Planung bis hin zur Realisierung mit zunehmenden Erkenntnissen verfeinert und präzisiert. Dieses Vorgehen ist dem aktuellen Kenntnisstand der Geologie sowie dem Detaillierungsgrad der Planung angepasst.

In der bautechnischen Risikoanalyse wird die nukleare Betriebssicherheit eines geologischen Tiefenlagers nicht behandelt. Die Langzeitsicherheit wird nur am Rande behandelt. Im NAB 14-50 sind Hinweise zu Bauwerken auf Lagerebene mit Relevanz für die Langzeitsicherheit gegeben, die die Phase Bau betreffen (NAB 14-50, Kapitel 5.2.3). Sie finden aber nicht Eingang in die im NAB 14-50 vorgenommenen, standortspezifischen Risikobewertungen.

Die oberflächennahen Lockergesteinsabschnitte und oberflächennahen, verwitterten Felsbereiche der Zugangsbauwerke werden zwar beurteilt, finden jedoch keinen Eingang in die vorliegende standortspezifische Risikobewertung (NAB 14-50). Die geotechnische Beschreibung dieser Abschnitte ist im NAB 14-100 dokumentiert. Die bautechnische Machbarkeit der Lockergesteinsstrecken ist gegeben; dies zeigt die grosse Erfahrung

in der Schweiz mit Tunnelbauten im Lockergestein auch unter erschwerten Bedingungen, wie z. B. in stark überbauten Gebieten.

Die Risikoanalyse und -bewertung berücksichtigt keine Risiken bezüglich Kosten, Terminverschiebungen und Akzeptanzfragen.

Die bautechnische Risikoanalyse für die Zugänge nach Untertag im NAB 14-50 basiert auf einem stufenweisen Vorgehen bei der Identifikation von Gefährdungen, die während des Baus und Betriebs auftreten können. Während der Betriebsphase wird dabei nur das Verhalten des Rohbaus berücksichtigt. Die Risikorelevanz der Gefährdungen wird unter Berücksichtigung von Massnahmen überprüft und die als potenziell relevant eingestufteten Gefährdungen werden in den weiteren Schritten analysiert.

Dieses schrittweise Vorgehen hat nach Umsetzung von Standard- und Zusatzmassnahmen sechs verbleibende, potenziell relevante Gefährdungen für die Zugangsbauwerke für die Phasen Bau und Betrieb ergeben, die im Zusammenhang mit Wasser stehen (initialer oder stationärer Wasserzufluss aus Karst, Schlammereinbruch aus Karsthohlräumen, initialer oder stationärer Wasserzufluss aus Klüften/Störungen, Betonaggressivität des Bergwassers). Anhand dieser sechs Gefährdungen erfolgt die standortspezifische Beurteilung und Bewertung der Risiken aller Zugangskonfigurationen gemäss Planungsstudien 2013/2014 in den sechs Standortgebieten (NAB 13-61; NAB 13-64; NAB 13-66; NAB 13-67; NAB 13-68; NAB 13-81; NAB 14-03; NAB 14-04; NAB 14-05; NAB 14-06; NAB 14-07; NAB 14-08; NAB 14-27; NAB 14-28; NAB 14-29).

Mit Ausnahme einer Zugangskonfiguration bei Jura-Südfuss mit zwei Rampen (JS-1, Konfiguration 1) während der Bauphase können alle risikorelevanten Gefährdungen mit Standard- und Zusatzmassnahmen zuverlässig beherrscht werden und die technische Machbarkeit der Zugangsbauwerke ist gegeben.

Die Risikoprofile der Zugangskonfigurationen für die Phasen Bau und Betrieb, jeweils nach Umsetzung von Massnahmen, zeigen keine signifikanten Unterschiede zwischen den Standortgebieten. Die Risikoprofile innerhalb der verschiedenen Standortgebiete zeigen für die Betriebsphase bei beiden Zugangskonfigurationen Schacht/Rampe oder nur Schächte ebenfalls keine signifikanten Unterschiede.

Beurteilung des ENSI

Das ENSI und seine Experten haben die im NAB 14-50 dokumentierte bautechnische Risikoanalyse überprüft (ENSI 33/457). Die Prüfergebnisse wurden vom ENSI bei der Beurteilung der Bewertung der Nagra bzgl. des Indikators 48 «Geotechnische und hydrogeologische Verhältnisse in überlagernden Gesteinsformationen», Kriterium 4.2 «Untertägige Erschliessung und Wasserhaltung», berücksichtigt. Sie sind damit bei der Bewertung der in Etappe 2 SGT betrachteten geologischen Standortgebiete/Lagerperimeter und in den sicherheitstechnischen Vergleich eingeflossen.

Nachfolgend wird die Beurteilung des ENSI zu relevanten Aspekten der bautechnischen Risikoanalyse im NAB 14-50 zusammengefasst. Die ausführliche Beurteilung des ENSI und seiner Experten ist in ENSI 33/457 dokumentiert.

Vorgehensweise der Nagra

Die von der Nagra gewählte Methodik für die bautechnische Risikoanalyse entspricht grundsätzlich dem Stand von Wissenschaft und Technik. Der mit dem Vorgehen gewählte Detaillierungsgrad der Gefährdungsanalyse (Identifikation und Relevanzprüfung) und die Bearbeitungstiefe der Risikobewertung sind für Etappe 2 SGT stufengerecht.

Bezüglich des Umfangs erfüllt die bautechnische Risikoanalyse die in ENSI 33/170 definierten zentralen Anforderungen nur teilweise. Die Nagra betrachtet in ihrer bautechnischen Risikoanalyse im NAB 14-50 lediglich die Zugangsbauwerke. Die sicherheitsrelevanten Bauwerke auf der Lagerebene wurden dabei nicht betrachtet und sind somit nicht vollständig im Sinne der Anforderungen des ENSI abgehandelt. Das ENSI beurteilt dieses Vorgehen jedoch für Etappe 2 SGT als stufengerecht. Für Etappe 3 SGT fordert das ENSI für Bau und Betrieb

des Tiefenlagers bautechnische Risikoanalysen der Zugangsbauwerke und aller sicherheitsrelevanten Bauwerke auf Lagerebene.

Im NAB 14-50 werden die oberflächennahen Lockergesteinsabschnitte (z. B. oberflächennahe Tunnel und Schächte) und Felsbereiche generisch als «nicht risikorelevant», «vernachlässigbar» oder «nicht standortentscheidend» beurteilt und finden keinen Eingang in die standortspezifische Risikobewertung. Für die aktuelle Projektphase kann diese generische Betrachtung als hinreichend angesehen werden. In Etappe 3 SGT sind die oberflächennahen Lockergesteinsabschnitte jedoch auch zu betrachten und die entsprechenden Risiken standortspezifisch zu bewerten.

Die Baugrundmodelle der Standortgebiete (NAB 14-72), welche der Gefährdungsanalyse der Nagra zugrunde liegen, umfassen in Anlehnung an SIA 197 und SIA 199 eine geologische Prognose mit einer detaillierten Beschreibung aller für Bau und Betrieb relevanten strukturgeologischen, hydrogeologischen und geotechnischen Eigenschaften für die Abschnitte der Zugangsbauwerke unterhalb der Lockergesteinsstrecke bis auf die Lagerebene. Aus Sicht des ENSI ist die Bandbreite der geologischen Eigenschaften darin gemäss dem aktuellen Stand des Wissens zur Geologie in den Standortgebieten aufgezeigt.

Die möglichen Einflüsse der betrachteten Gefährdungen auf die Langzeitsicherheit des Lagers werden im NAB 14-50 unvollständig behandelt und müssen in Etappe 3 SGT vertieft untersucht werden. In diesem Bericht werden Hinweise zu Bauwerken auf Lagerebene mit Relevanz für die Langzeitsicherheit gegeben, welche die Phase Bau betreffen. Sie finden aber keinen Eingang in die in diesem Bericht vorgenommenen, standortspezifischen Risikobewertungen (NAB 14-50, Kapitel 1.4).

Gefährdungen und Gefährdungsrelevanz

Ein Grossteil der für die bautechnischen Risikoanalysen in Etappe 2 SGT relevanten Aspekte wurde im NAB 14-50 erkannt und stufengerecht abgehandelt. Die Wasser- und Schlammengen sind von der Nagra lediglich abgeschätzt worden. Diese sind jedoch aus Sicht des ENSI (ENSI 33/472) nicht mit den vorhandenen hydrogeologischen und hydrochemischen Daten abgestimmt. Eine Diskussion der auftretenden Ungewissheiten findet nur teilweise statt.

Das ENSI beurteilt die Evaluation aller betrachteten Gefährdungen nach Schadensbildern grösstenteils als plausibel. Die Schadensbilder sind für Etappe 2 SGT stufengerecht vollständig. Der Beurteilung der (Einzel-)Gefährdungsrelevanz kann auf Basis der in Etappe 2 SGT vorliegenden Erkenntnislage zugestimmt werden.

Die aus der schrittweisen Einengung verbleibenden sechs Gefährdungen, die im Hinblick auf die geologische Situation nicht zuverlässig mit Standardmassnahmen beherrschbar sind und unter Umständen Zusatzmassnahmen bedürfen, sind stufengerecht vollständig. Aufgrund ihrer Analyse kommt die Nagra zum Schluss, dass diese Gefährdungen trotz Standard- und Zusatzmassnahmen immer noch kritische und risikorelevante Auswirkungen auf Zugangsbauwerke haben können. Diese Risiken werden daher im NAB 14-50 vertiefter untersucht. Das ENSI stimmt der Beurteilung der Nagra zu.

Massnahmen zur Risikoverminderung und Risikobeherrschung

Die von der Nagra vorgesehenen Standard- und Zusatzmassnahmen zur Beherrschung der im Zuge der Relevanzprüfung ausgeschlossenen Risiken für den sicheren Bau und Betrieb respektive für die Tragsicherheit und die Gebrauchstauglichkeit der Zugangsbauwerke entsprechen dem Stand von Wissenschaft und Technik. Die Massnahmen sind hinsichtlich ihrer Auslegung, Eignung und Wirksamkeit stufengerecht analysiert und beschrieben. Sie werden vom ENSI auf Basis von vergleichbaren allgemeinen Projektanforderungen und vorhandenen Erfahrungen als im Tunnel- und Bergbau üblich und erfolversprechend beurteilt.

Die von der Nagra vorgesehenen standortspezifischen Massnahmen zur Beherrschung der Hauptgefährdungen aus dem Auffahren der Zugangsbauwerke in verkarstetem oder potenziell verkarstungsgefährdeten und klüftigen Gebirgsabschnitten sind für Etappe 2 SGT stufengerecht und nachvollziehbar gewählt und beschrieben. Die vorgesehenen Massnahmen basieren auf dem vorhandenen Kenntnisstand zur Geologie und den im

NAB 14-72 auf Basis der geologischen Längsschnitte geschätzten Belastungen. Die vorgesehenen Verfahren zur Vorauserkundung und Abdichtung von Gebirgszonen mit wasserführenden Kluft- und Karststrukturen entsprechen grundsätzlich dem aktuellen Stand der Technik, wurden aber nach Einschätzung des ENSI noch nicht unter vergleichbaren komplexen Randbedingungen (wasser- oder schlammgefüllte Karststrukturen mit sehr hohen Wasserdrücken) realisiert.

Der Erfolg von vorauseilenden und nachträglichen Abdichtungs- und Verfestigungsinjektionen ist in einem unter hohen bis sehr hohen Wasserdrücken stehenden verkarsteten Gebirge auf Basis des heutigen Wissensstands und des Stands der Technik nicht ohne Einschränkung gewährleistet. Zitierbare Erfahrungswerte zur Injektion und Abdichtung von sediment- oder schlammgefüllten Karsthohlräumen unter vergleichbaren hydrologischen Randbedingungen sind dem ENSI und seinen Experten sowie der Nagra nicht bekannt (NAB 17-01, Frage 31).

Die Wirksamkeit der Massnahme «Änderung der Linienführung» hängt stark von der Eintretenswahrscheinlichkeit und der Ausprägung von Karststrukturen im betreffenden Gebirgsabschnitt ab. Grundsätzlich kann bei einer geänderten Linienführung nicht ausgeschlossen werden, dass mit dieser erneut Gebirgsbereiche angefahren werden, bei denen die geplanten Massnahmen zur Risikominderung oder -beherrschung nicht erfolgreich sind.

Die im Rahmen der Etappe 2 SGT vorgesehenen Hauptmassnahmen (Vorauserkundung und Injektionen) zur Beherrschung der Hauptrisiken aus Karst werden zugestimmt, aber die sichere bautechnische Umsetzung und die Wirksamkeit der Massnahmen sind in Etappe 3 SGT vertieft zu untersuchen und zu belegen.

Plausibilität der Risikobeurteilung und der Risikobewertung

Nach Einschätzung des ENSI und seiner Experten ist die standortspezifische Risikobewertung aller Zugangskonfigurationen unter Berücksichtigung der Sensitivität der Berechnungsergebnisse, des aktuellen Kenntnisstandes zur Geologie, der vorgesehenen Bauverfahren und der getroffenen Massnahmen zur Beherrschung der bautechnischen Risiken für Etappe 2 SGT stufengerecht und ausreichend plausibel.

Für die Bewertung der Eintretenswahrscheinlichkeiten der Gefährdungen mit Berücksichtigung der Massnahmen zur Risikominderung im Bauzustand und in der Betriebsphase führt die Nagra Reduktionsfaktoren ein, mit denen sie die Wirksamkeit der Massnahmen für jede Gefährdung und jede Belastungsstufe abschätzt. Eine detaillierte Herleitung dieser Reduktionsfaktoren ist jedoch im NAB 14-50 und in den ergänzenden Erläuterungen der Nagra nicht aufgezeigt. Die von der Nagra gewählte Vorgehensweise zur Bewertung der Wirksamkeit von den geplanten Massnahmen zur Risikoverminderung ist stufengerecht und plausibel. Die Bewertungen der Wirksamkeit dieser Massnahmen selbst sind jedoch nur bedingt nachvollziehbar. Die Nagra hat in Etappe 3 SGT die Zusammenhänge bei der Festlegung der Reduktionsfaktoren und die zu berücksichtigenden Kriterien nachvollziehbar aufzuzeigen.

Die Nagra stuft die Risiken aus Karst nach eingehender Bewertung aller bautechnischen Risiken und möglichen Massnahmen als besonders wichtig ein. Das ENSI und seine Experten teilen diese Einschätzung.

Die Nagra hat die Reduktionsfaktoren für die Phase Bau primär durch die Einschätzung der Wirksamkeit der Vorauserkundung bestimmt und die Wirksamkeit der Massnahmen in der Bauphase unabhängig von der effektiven Tiefenlage der relevanten Homogenbereiche der Zugangsbauwerke bewertet (NAB 17-01, Frage 31). Das ENSI und seine Experten beurteilen die tiefenabhängige Einwirkung des Wasserdrucks, insbesondere in verkarsteten Gebirgsformationen, als massgebend für die Wirksamkeit und den Erfolg der vorauseilenden Abdichtungsinjektionen beim Tunnelvortrieb bzw. Schachtaushub. Diesem Sachverhalt wird bei der Abschätzung der Reduktionsfaktoren für die Gefährdungen aus Wasser und Schlamm in verkarsteten Gebirgsbereichen in der Bauphase nicht ausreichend Rechnung getragen. Bei der Wirksamkeit der Massnahmen hat die Nagra allfällige standortspezifische Unterschiede bei den Karstphänomenen gemäss NAB 17-01 (Frage 31) nicht berücksichtigt.

Eine Bewertung des Massnahmenerfolgs in der Bauphase primär über die Wirksamkeit der Vorauserkundung ist aus Sicht des ENSI zu hinterfragen.

Die in den geologischen Längensprofilen (NAB 14-72) für die bautechnische Risikoanalyse grundlegend seitens der Nagra gemachte Bewertung der Gefährdungen in 4 Stufen (extrem unwahrscheinlich bis wahrscheinlich) und die in der Risikobewertung für 5 Belastungsstufen getrennt abgeschätzte Wirksamkeit der Massnahmen signalisiert eine in dieser Stufe noch nicht vorhandene respektive noch nicht mögliche Genauigkeit. Dies gilt insbesondere für die Bewertung der Wirkung der Vorauserkundungen und der Abdichtungsinjektionen in verkarsteten Gebirgsformationen.

Die von der Nagra bei der Risikobewertung berücksichtigten Kenntnisse zu potenziellen Karstformationen sind im NAB 14-50 nicht erläutert. Gemäss Angaben der Nagra nach Rückfrage des ENSI (NAB 17-01, Frage 31) ist die Ausprägung der Karstformationen in der Einschätzung der Eintretenswahrscheinlichkeit ohne Massnahmen in den geologischen Längensprofilen im NAB 14-72 berücksichtigt.

Vergleich der betrachteten Standortgebiete

Gemäss Schlussfolgerung der Nagra zeigen die Risikoprofile der Zugangskonfigurationen für die Phasen Bau und Betrieb jeweils nach Umsetzung von Massnahmen zur Beherrschung der bautechnischen Risiken auf Basis der heutigen Erkenntnisse keine signifikanten Unterschiede zwischen den Standortgebieten. Ferner zeigen die Risikoprofile innerhalb der verschiedenen Standortgebiete für die Betriebsphase bei beiden Zugangskonfigurationen Schacht/Rampe oder nur Schächte keine signifikanten Unterschiede (NAB 14-50).

Das ENSI stimmt dieser Schlussfolgerung der Nagra zu und ist ausserdem der Ansicht, dass die aktuelle Wissensbasis nicht ausreichend ist, um eine Eingrenzung der Standortgebiete basierend auf der vorliegenden bautechnischen Risikoanalyse vorzunehmen. Ebenfalls können auf Basis des aktuellen Wissens keine Präferenzen bezüglich Zugangskonfigurationen (Schacht/Rampe oder nur Schächte) ausreichend begründet werden.

Das ENSI ist mit der Aussage der Nagra einverstanden, dass einzig im Standortgebiet Jura-Südfuss die bautechnische Machbarkeit des Hauptzugangs mit zwei Rampen gemäss Zugangskonfiguration K1 in der Phase Bau (NAB 14-50) auf Basis des aktuellen Kenntnisstandes als nicht zuverlässig beherrschbar bewertet wird. Die betreffende Zugangskonfiguration des Standortgebiets ist daher auf Basis des heutigen Kenntnisstandes zur Geologie/Hydrogeologie unter Vorbehalt zurückzustellen. Eine erneute Überprüfung der Risiken zu einem späteren Zeitpunkt müsste vorgenommen werden, falls dieses Standortgebiet weiter verfolgt wird.

Empfehlungen des ENSI für Etappe 3 SGT

In Etappe 3 SGT sind zusätzliche und vertiefte Untersuchungen bzgl. der bautechnischen Risiken der Zugangsbauwerke vorzunehmen, insbesondere hinsichtlich der Evaluation der Gefährdungen und Gefährdungsrelevanz, der Massnahmen zur Risikoverminderung bzw. Risikobeherrschung und der Risikobewertung (Reduktionsfaktoren). Die sicherheitsrelevanten Bauwerke auf Lagerebene sind in der vertieften bautechnischen Risikoanalyse zu berücksichtigen und insbesondere hinsichtlich der Langzeitsicherheit zu untersuchen und zu bewerten. Diesbezügliche Empfehlungen der Experten des ENSI für Etappe 3 SGT sind in ENSI 33/457 nach beurteilten Themen detailliert aufgeführt. Insbesondere die dort beschriebenen Aspekte sind vertieft zu untersuchen.

2.12 Ergänzende Sicherheitsbetrachtungen der Zugangsbauwerke während der Betriebsphase

Das ENSI hat seine Anforderungen an die ergänzenden Sicherheitsbetrachtungen für die Zugangsbauwerke während der Betriebsphase im Zusammenhang mit Etappe 2 SGT in ENSI 33/170 dargelegt. Gemäss diesen Anforderungen hat die Nagra stufengerecht anhand einer systematischen, generischen Betrachtung den sicheren Normalbetrieb der Zugangsbauwerke und die Beherrschbarkeit der Auswirkungen von Störfällen mittels einer strukturierten Vorgehensweise aufzuzeigen.

Gemäss der Verordnung des UVEK über die Gefährdungsannahmen und die Bewertung des Schutzes gegen Störfälle in Kernanlagen (UVEK 2009) hat der Gesuchsteller für die spätere Bau- und Betriebsbewilligung für ein geologisches Tiefenlager eine umfassende Störfallanalyse durchzuführen. Für Etappe 2 SGT orientieren sich

die qualitativen Sicherheitsbetrachtungen für die Betriebsphase der Zugangsbauwerke an den in der UVEK-Verordnung aufgeführten Gefährdungsbildern sowie an den Vorgaben der Richtlinie ENSI-G03, soweit diese im Stadium einer Vorstudie in Etappe 2 SGT anwendbar sind.

Angaben der Nagra

Unter Berücksichtigung der gewählten geologischen Standortgebiete und der zugehörigen Standortareale wurden im NAB 14-51 die sicherheitsgerichtete Auslegung der untertägigen Anlagen und die Betriebsabläufe dargelegt sowie die Sicherheit qualitativ in einem der jetzigen Projektstufe entsprechenden Detaillierungsgrad aufgezeigt.

Die Nagra hat diejenigen Massnahmen, die den Schutz von Menschen und Umwelt, eigenen und fremden Sachwerten sowie wichtigen Rechtsgütern gewährleisten, identifiziert. Die Umsetzung und das Ausmass der sicherheitsgerichteten Auslegung stützt sich auf und orientiert sich an den vorgegebenen Zielen, welche im Kernenergiegesetz, im Strahlenschutzgesetz und in den dazu erlassenen spezifischen sowie weiteren gesetzlichen und behördlichen Verordnungen und Richtlinien verankert sind. Die ergänzenden Sicherheitsbetrachtungen beschränken sich auf die Betriebsphase und behandeln die folgenden Themenbereiche:

- nukleare Betriebssicherheit und Strahlenschutz,
- Personensicherheit, Arbeitssicherheit und Gesundheitsschutz während der Betriebsphase,
- Auswirkungen der Betriebsphase auf die Langzeitsicherheit des geologischen Tiefenlagers,
- Auswirkungen der Betriebsphase auf die Umwelt.

Die Standortgebiete unterscheiden sich in ihren Eigenschaften im Hinblick auf die Intensität und die Eintrittshäufigkeit von auslösenden Ereignissen geringfügig. Aufgrund der Wahl geeigneter Standortareale und der Anpassung der Anlagenauslegung (Strukturen, Systeme und Komponenten) an die vorhandenen Verhältnisse ist für jedes Standortgebiet bzw. Standortareal ein sicherer Betrieb der Untertageanlagen möglich. Damit können Einwirkungen von innen und aussen sicher beherrscht werden.

In den ergänzenden Sicherheitsbetrachtungen und den darin enthaltenen Störfallanalysen wurden die Untertageanlagen in Bezug auf die Betriebssicherheit und die Auswirkungen der Betriebsphase auf die Langzeitsicherheit und auf die Umwelt bewertet und eine Optimierung der sicherheitstechnischen Massnahmen erläutert. Für alle Schadenstypen kann ein hohes Sicherheitsniveau während der Einlagerung der radioaktiven Abfälle gewährleistet werden. Bei allen anzunehmenden Störfällen ist aufgrund der Auslegungsmassnahmen mit keiner sicherheitsrelevanten Freisetzung von Radioaktivität in die Umwelt zu rechnen.

Kritikalität und Wärmeabfuhr

Zum Thema Kritikalität und Abfuhr der Nachzerfallswärme hält die Nagra fest, dass die in UVEK 2009 für Kernanlagen geforderten Schutzziele «Kontrolle der Reaktivität» und «Kühlung der Kernmaterialien und der radioaktiven Abfälle» für die Diskussion der Betriebssicherheit der Untertageanlage nicht von Bedeutung sind: Die nukleare Reaktivität ist zuverlässig begrenzt und Kritikalität kann in jedem Fall ausgeschlossen werden. Ferner ist die Wärmeleistung der Abfälle zum Zeitpunkt der Einlagerung nach der Zwischenlagerung stark abgeklungen (NAB 14-51).

Vergleich Schacht und Rampe für den Zugang nach Untertag

Die Nagra analysiert im NAB 14-51 die als relevant erkannten Störfälle Flugzeugabsturz mit Kerosinbrand, Fördermittelunfall mit Folgebrand und Wassereintrich aus Karstsystem oder Störungszone unter besonderer Beachtung der Auswirkungen für die Rampe oder den Schacht als Hauptzugangsbauwerk zu den Lagerbereichen. Sie zieht hinsichtlich des Vergleichs von Schacht und Rampe den Schluss, dass für einen sicheren Betrieb der Zugangsbauwerke einerseits die Beherrschung des Wassereintrichs aus der Geologie (Karstsystem und Störungszone) und andererseits die Störfallfestigkeit der Fördermittel relevant sind.

Die Analyse zeigt, dass für das Hauptzugangsbauwerk mit der Hauptfunktion der Förderung der Endlagerbehälter und der Materialien für Verfüllung und Versiegelung sowohl ein Schacht als auch ein Zugangstunnel (Fördermittloptionen Zahnradbahn oder Gleislosförderung) sicherheitstechnisch geeignet sind.

Wasserführende Karstsysteme und Störungszonen können durch ein geeignetes Explorationsprogramm beim Zugangstunnel mit genügender Zuverlässigkeit identifiziert und die notwendigen baulichen Massnahmen getroffen werden – im Extremfall durch die Anpassung der Linienführung. Deshalb ergibt sich aus Sicht der Betriebssicherheit bzgl. Wassereinbruch kein Grund, den Schacht oder den Tunnel für den Zugang nach Untertag zu bevorzugen.

Beurteilung des ENSI

Im NAB 14-51 hat die Nagra entsprechend den in ENSI 33/170 festgelegten Anforderungen den sicheren Normalbetrieb der Zugangsbauwerke (beispielsweise Förderungen von Lasten und Personen) und die Beherrschbarkeit der Auswirkungen von Störfällen aufgezeigt sowie bestehende standortspezifische Risiken für die Zugangsbauwerke ausgewiesen. Insbesondere wurde aufgezeigt, dass durch geeignete Massnahmen die Schutzziele der nuklearen Sicherheit inklusive dem Strahlenschutz, d. h. die Unterkritikalität, die Kühlung, der Einschluss radioaktiver Stoffe und die Begrenzung der Strahlenexposition, erreicht werden können. Das ENSI und seine Experten haben die Unterlagen insbesondere hinsichtlich möglicher Auswirkungen auf die Standorteinengung geprüft und das Prüfergebnis in ENSI 33/458 dokumentiert.

Das ENSI und seine Experten beurteilen die im NAB 14-51 dokumentierten Sicherheitsbetrachtungen für die Zugangsbauwerke im Hinblick auf die geforderte Standorteinengung gemäss Etappe 2 SGT als stufengerecht. Sie sind inhaltlich nachvollziehbar und erfüllen die Anforderungen gemäss ENSI 33/170. Sie werden in dem Sinne als vollständig beurteilt, als dass die für die Einengung der Standortgebiete massgebenden Gefährdungen untersucht wurden. Die angewendete Methodik entspricht einem zeitgemässen, sicherheitsgerichteten Vorgehen.

Die in Etappe 2 SGT vorgesehene Einengung auf die weiter zu untersuchenden geologischen Standortgebiete wird nicht massgeblich durch die hier beurteilten Sicherheitsbetrachtungen für die Zugangsbauwerke beeinflusst, obwohl als massgebende Gefährdung der «Wasser-/Schlammeinbruch» während des Baus und Betriebs des geologischen Tiefenlagers erkannt wurde.

Kritikalität und Wärmeabfuhr

Gemäss dem im NAB 14-51 dargelegten Sicherheitskonzept gewährleisten geeignete Annahmebedingungen der einzulagernden Abfälle (insbesondere abgebrannte Brennelemente) deren Unterkritikalität. Das ENSI erachtet diese Massnahme als geeignet, sofern bei der Auslegung der Endlagerbehälter auch der Umstand einer eventuell unvorhergesehenen, vorübergehenden Aufbewahrung mehrerer Endlagerbehälter auf kleinstem Raum und ggf. ein Wassereinbruch in diesen Lagerbereich (Überflutung) berücksichtigt werden. Alternativ dazu kann auch die Aufbewahrung mehrerer Endlagerbehälter im Zugangsbauwerk vor der Einlagerung in die Lagertunnel durch technische und/oder organisatorische Massnahmen verhindert werden. Das ENSI ist zudem der Ansicht, dass eine ausreichende Abfuhr der Nachzerfallwärme während des Normalbetriebs durch geeignete Massnahmen sichergestellt werden kann.

Vergleich Schacht – Rampe für den Zugang nach Untertag

Das ENSI und seine Experten stimmen der Schlussfolgerung der Nagra zu, dass der sichere Zugang zum Lagerbereich sowohl über einen Schacht als auch über eine Rampe gewährleistet werden kann (ENSI 33/458 und Kapitel 2.11).

Die Gefahr eines Wassereinbruchs kann mit zunehmender Länge des Zugangsbauwerks steigen. Insbesondere die Länge der Strecke in den wasserführenden Gesteinsformationen kann diese Gefährdung beeinflussen.

Somit kann bei einem senkrechten Schacht ein Wassereintritt mit geringerer Wahrscheinlichkeit als beim Rampenzugang erwartet werden, vorausgesetzt, dass in jedem Fall die optimale Lage des Zugangs an der Oberfläche und in der Tiefe gewählt wird.

Demgegenüber bietet der Zugang über die Rampe den Vorteil, dass die Linienführung flexibler ist. Sie kann beim Vortrieb angepasst werden, sobald die Gefährdung durch einen potenziellen Wassereintritt erkannt wird. Eindringendes Wasser wird im Schacht direkter und schneller zum einschlusswirksamen Wirtgestein geführt. Bei der Rampe sind die Aussichten grösser, das Wasser oberhalb des Wirtgesteins abfangen zu können.

Karstwasser kann sich während des Betriebs auch hinter den Wänden des Schachts oder der Rampe durch Erosion neue Wege schaffen. Die Gefährdung durch «hinterläufige» Wasserführung bis ins Wirtgestein wird beim Schacht aufgrund der kürzeren Wege als höher als bei der Rampe eingeschätzt.

Die Wirkung des Absturzes bzw. Aufpralls eines Transportgeräts für Lagerbehälter (Förderkorb, Gegengewicht, Transportwagen) steigt mit zunehmendem Neigungswinkel der Zugangsstrecke. Sie ist also beim senkrechten Schacht grösser als beim Schrägschacht und bei der Rampe am kleinsten.

Schlussfolgerung und Empfehlung

Im Ergebnis stimmt das ENSI den Schlussfolgerungen der Nagra weitgehend zu. Aus Sicht des ENSI sind jedoch die Gefährdungen durch Karstsysteme und Störungszonen auf die Zugangsbauwerke in Hinblick auf die Betriebs- und Langzeitsicherheit mit den neu gewonnenen Erkenntnissen in Etappe 3 SGT vertieft zu untersuchen. Bezüglich der Zugangsvariante «Schacht» ist in Etappe 3 SGT zu zeigen, dass ein allfälliger Absturz eines Endlagerbehälters aus einer auslegungsüberschreitenden Fallhöhe beherrschbar ist.

In Etappe 3 SGT ist der Detaillierungsgrad der Störfallanalyse zu verfeinern und dem voranschreitenden Wissensstand anzupassen. Für eine risikotechnische Bewertung sind im Rahmen der weiteren Schritte der Lagerrealisierung die entsprechenden Risiken nicht nur qualitativ, sondern auch quantitativ zu beurteilen. Dazu sind die Eintretenswahrscheinlichkeiten und die erwarteten Schadensausmasse der identifizierten Gefährdungen zu quantifizieren.

3 Charakterisierung und Konzeptualisierung der Wirt- und Rahmengesteine

Ausgehend von den in Etappe 1 SGT von der Nagra vorgeschlagenen und vom Bundesrat akzeptierten vier bevorzugten Wirtgesteinen Opalinuston, Tongesteinsabfolge 'Brauner Dogger', Effinger Schichten und Mergel-Formationen des Helvetikums für SMA und Opalinuston für HAA sind in Etappe 2 SGT für alle Standortgebiete provisorische Sicherheitsanalysen und ein sicherheitstechnischer Vergleich durchzuführen. Die Anforderungen an die provisorischen Sicherheitsanalysen sind in Anhang III des Sachplans (BFE 2011b) festgehalten und in ENSI 33/075 weiter präzisiert. Die provisorischen Sicherheitsanalysen haben dabei die Barrierenwirkung des Wirtgesteins einschliesslich der Rahmengesteine unter Berücksichtigung der vorhandenen Variabilitäten und Ungewissheiten aufzuzeigen. Dies erfordert eine umfassende Charakterisierung der Beschaffenheit und Eigenschaften der Wirt- und Rahmengesteine, welche in entsprechende Modellkonzepte für die Dosisberechnungen überführt werden und für die qualitative Bewertung der sicherheitstechnischen Kriterien wichtig sind.

Die Wirtgesteine Opalinuston, 'Brauner Dogger' und Effinger Schichten haben in mehreren Standortgebieten auch die Funktion von Rahmengesteinen eines anderen Wirtgesteins, weshalb die Charakterisierung dieser Gesteine gleichzeitig auch eine Charakterisierung der entsprechenden Rahmengesteine darstellt. Mit dem Begriff 'Brauner Dogger' fasst die Nagra die tonreichen Gesteinseinheiten zwischen dem Top Opalinuston und der Basis Malm zusammen, welche im geologischen Atlas der Schweiz mit brauner Farbe dargestellt sind und ungefähr östlich der Aare von der Lägern bis ins Gebiet von Schaffhausen vorkommen (Faziesraum «Ost», Beckenfazies, geologische Standortgebiete Nördlich Lägern, Zürich Nordost und Südranden). Gegen Westen in den Standortgebieten Jura Ost und Jura-Südfuss ist die Tongesteinsabfolge des 'Braunen Doggers' nicht ausgebildet und über dem Opalinuston folgen als entsprechende Äquivalente die sandigere und karbonatreichere Passwang-Formation, die mergelig-kalkigen Unteren Acuminata-Schichten und die Kalke der Hauptrogenstein-Formation (Faziesraum «West», Plattformfazies). Der östliche Teil des Standortgebiets Jura Ost liegt dabei im Übergangsbereich der beiden Fazies, wo die Hauptrogenstein-Formation in die Klingnau-Formation übergeht (Bohrungen Riniken und Nassberg). Das Standortgebiet Jura-Südfuss liegt hingegen ganz im Bereich der Karbonatplattform (Faziesraum «West»). Wegen des reduzierten Tonmineralgehaltes haben diese kalkreicheren Gesteinsabfolgen potenziell mässig bis stark erhöhte Werte der hydraulischen Durchlässigkeiten und kommen deshalb als Wirtgesteine nicht und als Rahmengesteine nur beschränkt in Frage.

Abhängig von der hydrogeologischen Einstufung höher durchlässiger kalkiger Einschaltungen im Lias, wie z. B. des Arietenkalks, können die unteren Rahmengesteine des Opalinustons (Lias) ebenfalls zur Barrierenwirkung des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs beitragen. Im Folgenden beschränken sich die Beschreibungen zum Lias nur auf jenen Teil oberhalb des Arietenkalks (= Toniger Lias).

3.1 Charakterisierung der Wirt- und Rahmengesteine

Für die Beurteilung der Barrierenwirkung der Wirt- und Rahmengesteine sind vor allem folgende Gesteinseigenschaften massgebend:

- lithofazielle Ausbildung und räumliche Ausdehnung,
- Mineralogie und Geochemie (u. a. Tonmineralgehalt und Porenwasserzusammensetzung),
- hydraulische Eigenschaften (u. a. Porosität und hydraulische Durchlässigkeit).

Im Folgenden werden diese Eigenschaften, wie sie von der Nagra im NTB 14-02-II und NTB 14-02-VI für die Wirt- und Rahmengesteine Opalinuston, 'Brauner Dogger', Effinger Schichten, Toniger Lias und Mergel-Formationen des Helvetikums dargelegt wurden, beurteilt.

3.1.1 Opalinuston

Lithofazielle Ausbildung und räumliche Ausdehnung

Angaben der Nagra

Der Opalinuston besteht weitgehend aus dunkelgrauen, monoton wirkenden Peliten mit darin eingeschalteten Silt- und Arenit-Lagen wie auch Kalk-Konkretionen und entstand in einem Flachmeer während der Jurazeit vor rund 174 Millionen Jahren (NTB 14-01). Der Ablagerungsraum war vergleichsweise wenig strukturiert, das Relief bildete sich synsedimentär durch differentielle Subsidenz (Allia 1996). Auf den Schwellen kam es gelegentlich zu Aufarbeitung, Depotzentren finden sich in räumlicher Nähe zu prä-existierenden Strukturen im Grundgebirge, vor allem dort, wo sich Randverwerfungen paläozoischer Becken mit anderen Verwerfungen schneiden. Der Vertikalversatz im Grundgebirge dürfte sich aufgrund der plastisch deformierbaren Evaporite des Muschelkalks in flexurartigen Verbiegungen des mitteljurassischen Meeresbodens geäussert haben (Wetzel und Allia 2003). Feinkörnige Feststoffe (Ton, Silt, Sand) bildeten als eingeschwemmte Erosionsprodukte des umliegenden Festlands über grosse Flächen des Meeresgrundes eine einheitliche, in ihrer Zusammensetzung weitgehend homogene Schlammschicht. Diese Schlammschicht verfestigte sich im Lauf der Erdgeschichte durch Auflast der später abgelagerten bis 1700 m mächtigen Sedimente allmählich zu einer Tonsteinschicht. Diese Entstehungsbedingungen führten zu den prägenden Eigenschaften des Opalinustons. Dazu zählen insbesondere die über grössere Distanz hinweg bestehende geringe Variabilität der sedimentologischen Ausbildung, der hohe Gehalt an Tonmineralen sowie die vergleichsweise geringen Schwankungen der Schichtmächtigkeit (105-110 m in den geologischen Standortgebieten Südranden, Zürich Nordost, Nördlich Lägern, Jura Ost sowie 90 m im Standortgebiet Jura-Südfuss).

Der Opalinuston weist aufgrund der planaren Einregelung der Tonminerale eine Feinschichtung auf. Diese Schichtung wird durch Einschaltungen von Silt- und Feinsand-reicheren Lagen überlagert, welche teilweise charakteristische Sedimentstrukturen, wie erosive Basis, Schrägschichtung, Rippeln und Gradierung, aufweisen (NTB 14-02-II). Solche Lagen werden als Sturmlagen interpretiert, welche Sturmereignisse mit höherem Eintrag von kontinentalem Detritus dokumentieren. Daneben treten bisweilen v. a. im oberen Teil des Opalinustons kalkreichere Lagen auf, welche sich lateral über mehrere Meter erstrecken. Diese wurden als Hiatus-Schichten bzw. Hartgründe interpretiert, welche auf Phasen von diskontinuierlicher Sedimentation, auf Erosion und diagenetische Prozesse hinweisen. Diagenetische Neubildungen in Form von Sideritknauern treten in gewissen Untereinheiten häufiger auf und sind entlang der Schichtung ausgedehnter als senkrecht dazu. Die laterale Kontinuität der einzelnen siltig-sandigen Fasern wie auch der Sideritknauern liegt meist im Zentimeter- bis Dezimeterbereich.

Beurteilung des ENSI

Das ENSI beurteilt die vorgelegten Untersuchungsergebnisse der Nagra zur lithofaziellen Ausbildung und räumlichen Verbreitung des Opalinustons als umfassend und nachvollziehbar. Die Untersuchungen sind detailliert, von hoher Qualität und haben zu einem umfangreichen Kenntnisstand geführt.

Das ENSI beurteilt die von der Nagra anhand der Bohrungs- und Aufschlussdaten abgeschätzten Mächtigkeits-Referenzwerte von 105 bis 110 m für den Opalinuston in den Standortgebieten Südranden, Zürich Nordost, Jura Ost und Nördlich Lägern und den Referenzwert von 90 m für das Standortgebiet Jura-Südfuss als nachvollziehbar (NAB 14-101). Die für die provisorischen Sicherheitsanalysen abgeschätzten unteren und oberen Eckwerte für die Mächtigkeit des Opalinustons decken nach Ansicht des ENSI die Ungewissheiten genügend ab.

Mineralogie und Geochemie

Angaben der Nagra

Der Opalinuston besteht vorwiegend aus feinkörnigen Tonmineralen, Quarz, Karbonaten und diagenetischen Neubildungen (z. B. Pyrit). Der hohe Gehalt an Tonmineralen (40 – 80 Gew.-%, Abbildung 6) verleiht dem Opalinuston sehr gute Radionuklid-Rückhalteeigenschaften. Die geringe Durchlässigkeit ist Voraussetzung für eine fortbestehende geochemische Stabilität innerhalb der Gesteinsformation. Während seiner zweiphasigen Versenkungsgeschichte hat der Opalinuston der zentralen und östlichen Nordschweiz maximale Temperaturen im Bereich von 75 bis 90 °C erfahren (NTB 08-04).

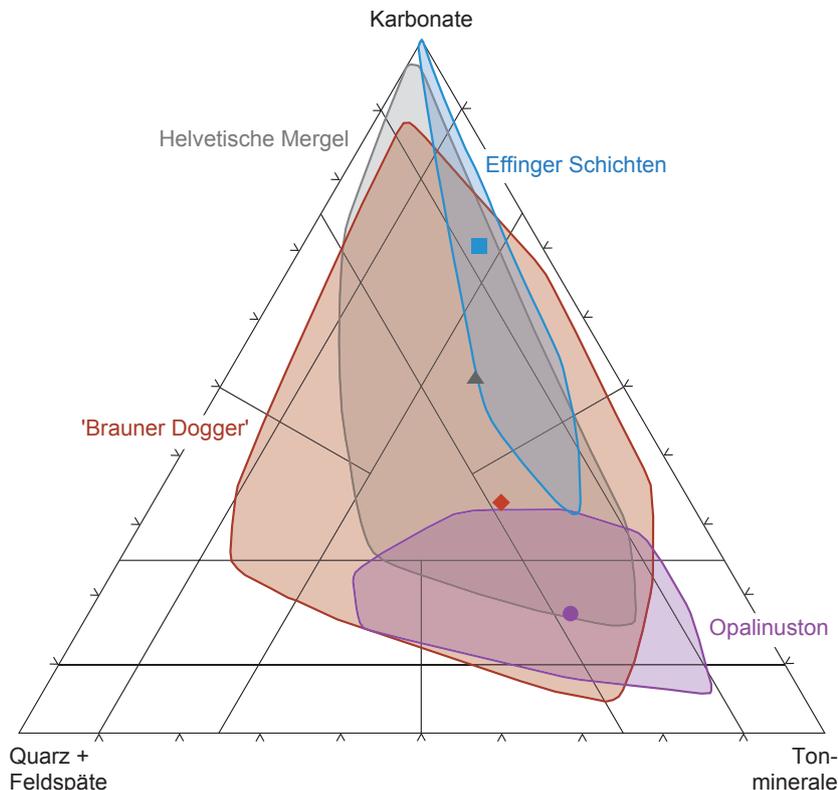


Abbildung 6: Übersicht über die mineralogische Variabilität der von der Nagra vorgeschlagenen Wirtgesteine Opalinuston (violett), 'Brauner Dogger' (braun), Effinger Schichten (blau) und Mergel-Formationen des Helvetikums (grau, Fig. 2.2-7 aus NTB 14-02-VI).

Beurteilung des ENSI

Das ENSI hat die Angaben mit weiteren Datenzusammenstellungen verglichen und die daraus gezogenen Schlüsse geprüft. Die Nagra hat anhand der Auswertung kontinuierlicher geophysikalischer Bohrlochprofile einen umfassenden Datensatz zur Ermittlung der Tonmineralgehalte erstellt (NAB 14-59). Die Daten zeigen, dass der Tonmineralgehalt des Opalinustons nur selten unter 50 Gew.-% fällt, im Mittel bei knapp 60 Gew.-% liegt und der Anteil an quellbaren Tonmineralen 30 Gew.-% beträgt (der Anteil quellbarer Tonminerale wurde seitens ENSI aus den angegebenen Anteilen Smektit, Corrensit und den Wechsellagerungsmineralen abgeschätzt und entspricht bzgl. Quellbarkeit einem Maximalwert). Gegenüber den röntgenographisch an Bohrkernproben gemessenen Tonmineralgehalten mitteln die geophysikalischen Bohrlochmessungen den Tonmineralgehalt kontinuierlich über ein grösseres Bohrlochintervall (mehrere Dezimeter). Die Gegenüberstellung beider Messverfahren ergibt ein konsistentes Bild der Tonmineralgehalte. Zwischen toniger und sandreicherer Fazies schwanken die Tonmineralgehalte leicht und es zeigen sich im oberen Abfolgedrittel des Opalinustons zum Teil kürzere Intervalle mit reduzierten Tonmineralgehalten. Zur Evaluation geeigneter Lagerbereiche in Etappe 3 SGT erwartet das ENSI, dass die Nagra fazielle Variationen und Vorkommen tonärmerer Intervalle im Rahmen der geplanten Tiefbohrungen erfasst und diese Daten bei der Lagerplatzierung einfließen lässt.

Porenwasser

Angaben der Nagra

Die für Etappe 2 SGT definierte Porenwasserzusammensetzung für den Opalinuston (NTB 14-02-VI) weicht wenig von der Zusammensetzung für den Entsorgungsnachweis im NTB 02-03 ab. Für Etappe 2 SGT wurden Daten der Bohrung Benken verwendet und am Datensatz diverse Verbesserungen angebracht. Zwei Varianten mit unterschiedlichem CO₂-Partialdruck von 10^{-1.8} und 10^{-2.8} bar decken den möglichen pH-Bereich ab (pH 7 bis 7.5). Die Redox-Bedingungen sind mit vorgegebenem Sulfatgehalt robust definiert.

Die maximalen Chloridgehalte des an Opalinustonproben aus der Bohrung Benken gewonnenen Porenwassers entsprechen jenem des Referenzporenwassers (6 g/kg) und entsprechen etwa der Hälfte der maximalen Gehalte im Felslabor Mont Terri bzw. sind viel geringer als die maximal beobachteten Salinitäten des Porenwassers im Opalinuston des Mont Russelin. Neue Daten der Bohrung Schlattingen-1 (NAB 12-54) zeigen ähnlich moderate Salinitäten wie in Benken. Es wird erwartet, dass die Salinitäten im Opalinuston (und im 'Braunen Dogger') der Standortgebiete jene des Referenzporenwassers nicht wesentlich übersteigen. Eine hochsaline Variante trägt der Ungewissheit Rechnung, dass die Salinitätsentwicklung in den Grundwasserleitern im Hangenden und Liegenden nicht genau bekannt ist (NTB 14-02-VI).

Beurteilung des ENSI

Die Herleitung und Beschreibung der Porenwasserzusammensetzung des Opalinustons ist im NTB 14-02-VI und NAB 09-14 nachvollziehbar beschrieben. Mit den zusätzlichen Varianten bzgl. des CO₂-Partialdrucks und der hochsalinen Variante aus dem Mont Russelin deckt die Nagra die Bandbreiten des Porenwassers genügend ab. Das ENSI ist mit der Zusammensetzung des Referenzporenwassers und den dazu angegebenen Bandbreiten einverstanden.

Hydraulische Eigenschaften

Angaben der Nagra

Aufgrund der feinen Porenstruktur und des hohen Tonmineralgehalts weist der Opalinuston eine sehr geringe hydraulische Durchlässigkeit und ein ausgeprägtes Selbstabdichtungsvermögen auf (K-Wert parallel zur Schichtung K_{\parallel} im Bereich von ca. 10⁻¹² bis 10⁻¹³ m/s oder weniger, senkrecht zur Schichtung K_{\perp} ca. um einen Faktor 5 niedriger, NTB 14-01).

Der Opalinuston kann bezüglich seiner Transporteigenschaften grossräumig als äquivalent-poröses Medium aufgefasst werden (NTB 14-01). Er besitzt keine grösseren Poren im Bereich von μm bis mm und keine offenen Klüfte. Für Tiefenlagen bis zu 400 m leitet die Nagra gestützt auf Daten aus dem Felslabor Mont Terri einen Referenzwert von $K_{\perp} = 1 \cdot 10^{-13}$ m/s und einen oberen Eckwert von $K_{\perp} = 3 \cdot 10^{-13}$ m/s ab, für Tiefenlagen grösser als 400 m von $K_{\perp} = 2 \cdot 10^{-14}$ m/s bzw. $K_{\perp} = 1 \cdot 10^{-13}$ m/s (NTB 14-02-VI).

Für die Festlegung des Referenzwerts der physikalischen Porosität wird basierend auf dem Median der Messstellenmittelwerte ein Referenzwert von 11 Vol.-% gewählt. Der untere Eckwert wird auf 6 Vol.-% festgelegt, der obere Eckwert für den Opalinuston in tiefer Lagerung auf 13 Vol.-%. Ein oberer Eckwert von 17 Vol.-% für den Opalinuston in untiefer Lagerung (Standortgebiet Südranden) ist sehr konservativ, deckt er doch auch den Wertebereich des Mont Terri nahezu vollständig ab (NAB 12-39). Der Referenzwert der Anionen-zugänglichen Porosität wird bei 50 % der physikalischen Porosität festgelegt, was 5.5 Vol.-% entspricht. Aus diesem Wert und dem unteren Eckwert der physikalischen Porosität errechnet sich ein unterer Eckwert der Anionen-zugänglichen Porosität von 3 Vol.-%. 50 % des oberen Eckwerts der physikalischen Porosität für Opalinuston in tiefer Lagerung entspricht 6.5 Vol.-%, in untiefer Lagerung 8.5 Vol.-%. Um auch den Wertebereich des Mont Terri abzudecken, wird der obere Eckwert der Anionen-zugänglichen Porosität für Opalinuston in untiefer Lagerung bei 11 Vol.-% festgelegt (NAB 12-39). Der anionenzugängliche Teil der Porosität in den Wirtgesteinen kann u. a. aus Diffusionsexperimenten abgeleitet werden. In der Nordschweiz schwanken die anionenzugänglichen Porositätsanteile im Bereich von 0.28 bis 0.73, mit einem Mittelwert von ca. 0.5. Eine Abhängigkeit vom Ton-

mineralgehalt lässt sich aufgrund der heutigen Datenlage nicht klar belegen. Für den Opalinuston des Felslabors Mont Terri haben Pearson et al. (2003) durch den Vergleich von Cl⁻-Gehalten aus wässrigen Auszügen mit denjenigen aus ausgepressten und in situ beprobten Wässern einen mittleren Wert von 0.54 abgeleitet. Der aus Diffusionsexperimenten abgeleitete Wert liegt im Bereich von 0.44 bis 0.73. Für die Sequenz 'Brauner Dogger' – Opalinuston – Lias in der Bohrung Schlattingen-1 wurde im NAB 12-54 aufgrund von Auspressexperimenten und wässrigen Auszügen ein anionenzugänglicher Porositätsanteil von 0.44 – 0.65 (Mittelwert bei 0.55) berechnet. Eine Korrelation mit dem Tonmineralgehalt konnte auch hier nicht festgestellt werden (NTB 14-02-VI). Generell ist auf eine sinnvolle Kombination der Eckwerte von physikalischer und Anionen-zugänglicher Porosität zu achten (NAB 12-39).

Beurteilung des ENSI

Die geringe hydraulische Durchlässigkeit und das hohe Selbstabdichtungsvermögen des Opalinustons sind durch zahlreiche Untersuchungen belegt (NEA 2010). Seit Etappe 1 SGT wurde die gute Datenbasis weiter vergrößert: Die unter neuen Gesichtspunkten zur Probenkonservierung und zur Versuchsdurchführung analysierten Kernproben aus der Bohrung Schlattingen-1 und eine Synthese hydraulischer Daten aus dem Felslabor Mont Terri (Nussbaum und Bossart 2004, AF Consult 2012, ENSI 33/489) bestätigten die gute hydraulische Barrierenwirkung, selbst wenn tektonische Elemente (Klüfte, Störungen) vorhanden sind.

Alle Untersuchungen natürlicher Vorkommen des Opalinustons stützen die Annahme, ihn als äquivalent-poröses Medium behandeln zu können, in welchem Trennflächen nicht wesentlich zum Stofftransport beitragen. Lediglich in der stark gestörten Auflockerungszone im Nahbereich von Hohlräumen sind transportwirksame, offene Trennflächen nicht auszuschliessen (Kapitel 6.1.2, Indikator 29). Die dachziegelartige Anordnung der Tonminerale führt zu einer günstigen Porenstruktur (hohe Tortuosität) im Hinblick auf eine geringe hydraulische Durchlässigkeit, zu grossen Transportweglängen und zu starken Wechselwirkungen zwischen Radionukliden und Tonmineralen. Das ENSI ist mit den von der Nagra gewählten Referenz- und oberen Eckwerten der hydraulischen Durchlässigkeit einverstanden. Die Nagra hat damit die Forderung 5 aus ENSI 33/115 für das Wirtgestein Opalinuston erfüllt.

Die Herleitung der Referenzwerte und der Eckwerte für die physikalische Porosität ist von der Nagra nachvollziehbar dargelegt worden. Die vorgeschlagenen Werte zur physikalischen Porosität sind plausibel. Für die Ermittlung der effektiven Diffusionskoeffizienten und in den Dosisberechnungen verwendet die Nagra die gleichen Referenzwerte und Eckwerte (NTB 14-03). Für die Anionen-zugängliche Porosität sind die Referenz- und unteren Eckwerte nachvollziehbar und plausibel. Für Opalinuston in untiefer Lagerung (Standortgebiet Südranden) wird ein oberer Eckwert von 11 Vol.-% für die Rechenfälle «ungünstige Diffusionskoeffizienten in der Geosphäre» verwendet. Dieser Wert ist plausibel. Für die anderen Standortgebiete der Nordschweiz verwendet die Nagra einen oberen Eckwert von 6.5 Vol.-% (NTB 14-03, obwohl sie im NAB 12-39 einen Wert von 8.5 Vol.-% empfiehlt und im NTB 12-03 eine grössere Bandbreite für den Anteil der Anionen-zugänglichen Porosität zeigt). Basierend auf diesen Daten beurteilt das ENSI den Wert von 6.5 Vol.-% als nicht abdeckend. Stattdessen geht das ENSI sicherheitsgerichtet von einem Anteil der Anionen-zugänglichen Porosität von 70 % aus, was bei einem oberen Eckwert der physikalischen Porosität von 13 Vol.-% einem Wert von 9.1 Vol.-% entspricht.

3.1.2 'Brauner Dogger'

Lithofazielle Ausbildung und räumliche Ausdehnung

Angaben der Nagra

Die Tongesteinsabfolge des 'Braunen Doggers' im Faziesraum «Ost» wurde in der Jurazeit in einem flachen Meer abgelagert und besteht einerseits aus mächtigeren Tonsteinen und Mergeln, und andererseits aus Einschaltungen von Eisenoolithen, Karbonatbänken, Hartgründen und Sandsteinen, die in Aufschlüssen verwitterungsresistentere «harte Bänke» bilden. Generell gilt, dass die Dogger-Schichtreihe regressive Zyklen widerspiegelt, die auf zyklische Meeresspiegelschwankungen zurückgeführt werden (Burkhalter 1996). Die eisenoolithischen Horizonte werden dabei zur Abgrenzung der Sequenzen verwendet und stellen Phasen der Mangersedimentation dar. Die Ausbildung der Sequenzen variiert lateral und zeitlich sehr stark, teilweise sind sie unvollständig oder gar nicht ausgebildet (Schichtlücken). Profile können deshalb in der Regel nicht exakt miteinander korreliert werden. Dies deutet auf einen faziell variablen und sich verändernden Ablagerungsraum mit Becken und Schwellen hin (Wetzel und Allia 2003). Diese lokal variablen Faziesräume und Sedimentationsraten führten zu verschiedenen Schichtabfolgen, so dass die Profile des 'Braunen Doggers' der Bohrungen Weiach, Benken und Schlattingen-1 weder lithologisch noch hinsichtlich ihrer Mächtigkeit exakt miteinander korreliert werden können (NAB 12-51).

Die im 'Braunen Dogger' immer wieder auftretenden dm-mächtigen, harten sandigen, biodetritischen Kalksteinbänke werden generell als Ereignislagen interpretiert, d. h. während Stürmen wurde sandiges und biodetritisches Material mobilisiert und in untiefen Senken abgelagert. Die laterale Ausdehnung dieser biodetritischen Kalkbänke kann aus den Bohrungen Weiach, Benken und Schlattingen-1 nicht hergeleitet werden, da eine Korrelation nicht möglich ist. Die Gesamtmächtigkeit dieser Kalkbänke beträgt in der Bohrung Benken 8.1 m bzw. in der Bohrung Weiach 3.7 m, was 9.3 % bzw. 4.9 % der Mächtigkeit des 'Braunen Doggers' ausmacht. Aufgrund der genetischen Interpretation und aus dem Vergleich mit ähnlichen Ablagerungsräumen könnten diese dm-mächtigen «harten Bänke» eine laterale Ausdehnung von bis zu ca. 20 km aufweisen und werden für eine allfällige Wasserführung deshalb als besonders wichtig beurteilt.

Die bis zu rund 4 m mächtigen eisenoolithischen Körper des 'Braunen Doggers' bilden weitere «harte Bänke» und zeigen eine sehr variable Ausbildung in ihrer Lithologie, lateralen Ausdehnung und Mächtigkeit (NAB 12-51; NAB 12-39; NAB 14-59). Einige der Horizonte, wie z. B. der Subfurcaten-Oolith am Top der Humpriesioolith-Formation, lässt sich von den Bohrungen Weiach und Benken bis in den Rand verfolgen. Andere eisenoolithische Horizonte haben hingegen eine sehr beschränkte laterale Ausdehnung. Die Gesamtmächtigkeit der Eisenoolithe beträgt in der Bohrung Benken 11.4 m bzw. in der Bohrung Weiach 7.5 m, was 13.0 % bzw. 9.8 % der Mächtigkeit des 'Braunen Doggers' ausmacht.

Reflexionsseismische Analysen des 'Braunen Doggers' (NAB 14-58) zeigen im östlichen Teil des Standortgebiets Nördlich Lägern eine etwa N-S streichende «Schwellenzone» mit einer linsenartigen, transparenten Faziesseinheit, welche möglicherweise eine Schüttung von größerem Material (Sandwälle, Sanddünen oder -barren) abbildet.

Die Mächtigkeit des 'Braunen Doggers' variiert im Raum der beiden Standortgebiete Nördlich Lägern und Zürich Nordost von 76 m (Bohrung Weiach) bis 87 m (Bohrung Benken).

Beurteilung des ENSI

Mit den in Etappe 2 SGT durchgeführten ergänzenden Untersuchungen und Studien wurde der Kenntnisstand zur lithologischen Ausbildung und Genese des 'Braunen Doggers' massgeblich erweitert. Das ENSI sieht damit die Forderungen 1 und 13 aus ENSI 33/115 für den 'Braunen Dogger' als erfüllt an.

Das ENSI hat die umfangreichen Untersuchungsergebnisse der Nagra zum 'Braunen Dogger' (NTB 14-02-II; NAB 12-39; NAB 12-51; NAB 12-57; NAB 14-58; NAB 14-59) in Zusammenarbeit mit zwei externen Experten überprüft (ENSI 33/462). Die Untersuchungen der Nagra werden als sorgfältig und umfassend beurteilt. Speziell die palynostratigraphischen Analysen haben die stratigraphische Korrelation auf eine solide Basis gestellt und das Verständnis der Ablagerungsgeschichte des 'Braunen Doggers' wesentlich verbessert. Die Rekonstruktion

der Sedimentationsgeschichte zeigt, dass das Gebiet des 'Braunen Doggers' während der Ablagerung in mehrere Faziesbereiche gegliedert war. Diese werden auf Unterschiede in der Subsidenz der Teilgebiete zurückgeführt (Wetzel und Allia 2003). Die Ablagerungssequenzen wurden durch relative Meeresspiegelschwankungen verursacht, wobei die eisenoolithischen Gesteine das Dach der Zyklen bilden und längere Zeitintervalle mit Sedimentationsunterbrüchen und Kondensation (Föllmi 2016) anzeigen.

Die Untersuchungsergebnisse der Bohrungen Weiach, Benken und Schlattingen-1 zum Auftreten, zur Verbreitung und zur Verbundenheit der «harten Bänke» zeigen eine sehr unterschiedliche Anzahl sandiger biotritischer Kalkbänke im 'Braunen Dogger' in den drei Bohrungen (9, 30 bzw. 20 Kalkbänke). Eine laterale Korrelation über die Distanzen zwischen den Bohrungen (9 bis 17 km) ist nicht möglich. Auch am Eichberg und am Schleifenbächle bei Achdorf (Deutschland) zeigen die Sandsteinbänke eine beschränkte laterale Kontinuität bei nur rund 1 km voneinander entfernten Profilen der Wedelsandstein-Formation (NAB 12-51).

Die eisenoolithischen Horizonte sind im Gegensatz zu den sandigen biotritischen Kalkbänken in ihrer lithologischen Ausbildung und Mächtigkeit sehr uneinheitlich (NAB 12-39; NAB 14-59). Die laterale Dimension der Eisenoolithe ist aufgrund der vorhandenen Aufschlüsse und Bohrdaten schwer zu fassen. Die Mächtigkeit der eisenoolithischen Horizonte variiert von einigen dm bis über 4 m.

In den geologischen Konzeptprofilen werden die biotritischen Sandkalkbänke und die eisenoolithischen Horizonte unter dem Begriff «harte Bänke» bzw. Sandkalkabfolgen zusammengefasst (NTB 14-02-VI). Die Genese und Dimension der beiden Sedimentgesteine ist jedoch verschieden: Sandig-biotritische Bänke sind Sedimentkörper, die durch Akkumulation von strömungstransportiertem Sediment entstanden sind. Eisenoolithische Horizonte entstanden primär durch Omission (Unterbruch der Sedimentation), verbunden mit Alteration und Aufarbeitung des Substrats (Bildung von Hartgründen). Es ist deshalb von einer unterschiedlichen räumlichen Ausdehnung und Geometrie der sandig-biotritischen Sandkalkbänke und der eisenoolithischen Horizonte auszugehen. Das ENSI teilt die Zusammenfassung der beiden Gesteinslithologien nicht (Abschnitt Mineralogie und Geochemie). Bei einer Weiterführung der Arbeiten sind diese beiden Gesteinstypen getrennt zu behandeln.

Anhand der Resultate einer seismischen Studie (NAB 14-58) konnte der 'Braune Dogger' nicht weiter durch zusätzliche seismische Hilfshorizonte unterteilt werden, aber gewisse seismische Reflexionseigenschaften wurden als seismische Faziesseinheiten erkannt. Über weite Bereiche des Standortgebiets Nördlich Lägern ist auch für das ENSI eine Zweiteilung des 'Braunen Doggers' in einen oberen, wenig reflektiven Teil (Parkinsoni-Würtembergica-Schichten) und einen unteren, stärker reflektiven Teil (Humphriesoolith-, Wedelsandstein- und Murchisonae-Oolith-Formationen) zu beobachten. Im Osten des Standortgebiets Nördlich Lägern lässt sich eine etwa N-S streichende, seismisch transparente Schwellenzone abgrenzen, weitere linsenartige transparente Intervalle zeigen sich auch innerhalb der stark reflektiven seismischen Faziesseinheit. Diese könnten Sandwälle, -dünen oder -barren darstellen. Eine Verifikation wäre in Etappe 3 SGT mit Bohrungen möglich.

Die von der Nagra hergeleiteten Referenzwerte für die Mächtigkeit des Wirtgesteins 'Brauner Dogger' und deren untere und obere Eckwerte beurteilt das ENSI als nachvollziehbar und plausibel. Das ENSI sieht damit die Forderung 21 aus ENSI 33/115 als erfüllt an. Für Etappe 3 SGT wird seitens ENSI davon ausgegangen, dass die Nagra die hydraulische Bedeutung der nicht-tonreichen Einschaltungen weiter abklärt.

Mineralogie und Geochemie

Angaben der Nagra

Die mineralogischen Analysen des 'Braunen Doggers' zeigen in Abbildung 6 eine beträchtliche Variation. Größtenteils weist der 'Braune Dogger' hohe Tonmineralgehalte auf, die tonreichsten Einheiten sind mit mittleren Tonmineralgehalten von über 40 Gew.-% vergleichbar mit dem Opalinuston. Der Referenzwert beträgt 46 Gew.-%, der untere Eckwert ist 20 Gew.-% (NTB 14-02-VI). Der hohe Gehalt an Tonmineralen verleiht den tonreichsten Abfolgen des 'Braunen Doggers' sehr gute Rückhalteeigenschaften. Die kalkigen und sandigen Bereiche haben hingegen mittlere Tonmineralgehalten von 11 Gew.-%, mit einem unteren Eckwert von 5 Gew.-%, NTB 14-02-VI). Im Mittel weisen die Eisenoolithe einen Tonmineralgehalt von 35 Gew.-% auf.

Beurteilung des ENSI

Das ENSI hat die Angaben im NTB 14-02-VI mit den Datenzusammenstellungen im NAB 11-20 und NAB 12-39 verglichen und die auf dieser Basis gewonnenen Aussagen der Nagra geprüft. Der 'Braune Dogger' zeigt im Vergleich zum Opalinuston eine deutliche Verringerung des Tonmineralgehalts (Mittelwert knapp über 40 Gew.-%, mit 25 Gew.-% quellbarer Anteile). Aufgrund der erhöhten lithologischen Heterogenität besteht eine deutlich grössere Variabilität in der mineralogischen Zusammensetzung. So variiert der Tonmineralgehalt in den kalkig-sandigen Bereichen von 5 bis 15 Gew.-%, und in den eisenoolithischen Horizonten von 6 bis 60 Gew.-%. Wegen der unterschiedlichen Tonmineralgehalte dieser beiden Lithologien ist eine Zusammenfassung unter dem Sammelbegriff «harte Bänke» aus Sicht des ENSI nicht gerechtfertigt.

Der tonreichste Abschnitt TA-1 des 'Braunen Doggers' hat am ehesten Tonmineralgehalte wie der Opalinuston (meist über 50 Gew.-%). Auch in dieser Abfolge lassen sich jedoch Bereiche mit signifikant geringeren Gehalten (25 bis 40 Gew.-%) definieren.

Porenwasser

Angaben der Nagra

Mit der Bohrung Schlattingen-1 (NAB 12-54) konnte die beschränkte Datenbasis aus den Tiefbohrungen Benken und Weiach (NAB 09-14) erweitert werden. Die Mineralogie des 'Braunen Doggers' ist jener des Opalinustons sehr ähnlich, deshalb sind auch die das Porenwasser bestimmenden Wechselwirkungen mit den Mineralbestandteilen vergleichbar. Daher wurde analog zum Opalinuston das gleiche Referenzporenwasser für den 'Braunen Dogger' verwendet (NAB 09-14).

Beurteilung des ENSI

Die Herleitung und Beschreibung der Porenwasserzusammensetzung des 'Braunen Doggers' ist im NTB 14-02-VI und NAB 09-14 nachvollziehbar beschrieben. Das ENSI ist damit einverstanden, dass für den 'Braunen Dogger' das gleiche Referenzporenwasser und die gleichen Porenwasservarianten wie für den Opalinuston verwendet werden. Durch die seitens ENSI festgestellten leichten Differenzen in der Mineralogie der tonigen Abschnitte des 'Braunen Doggers' werden aufgrund der chemischen Pufferung keine zusätzlichen Unterschiede in der Porenwasserzusammensetzung und deren Varianten erwartet.

Hydraulische Eigenschaften

Angaben der Nagra

Innerhalb des 'Braunen Doggers' lassen sich konzeptuell drei lithofazielle Einheiten hinsichtlich ihrer Barrierenwirkung unterscheiden (NTB 14-02-VI):

Mächtige *Tonsteine und Mergel* besitzen eine relativ grosse Ausdehnung (tonige Abfolge mit > 40 Gew.-% Tonmineralgehalt, TA-1). Aufgrund des hohen Tonmineralgehalts, der feinen Porenstruktur und des Selbstabdichtungsvermögens weist die TA-1 als äquivalent-poröses Medium (NTB 14-02-VI) eine sehr geringe hydraulische Durchlässigkeit auf (NTB 14-01). Aus dem Vergleich mit dem Opalinuston leitet die Nagra einen Referenzwert von $K_{\perp} = 1 \cdot 10^{-13}$ m/s und einen oberen Eckwert von $K_{\perp} = 5 \cdot 10^{-13}$ m/s ab (NTB 14-02-VI).

Darin eingeschaltet sind *sandig-tonige Abfolgen* (STA) mit Tonmineralgehalten im Bereich 20 – 40 Gew.-%, welche in Bohrungen sehr geringe Durchlässigkeiten aufweisen (NTB 14-02-VI). Für die STA wird der Freisetzungspfad «Störung» als wahrscheinlich betrachtet (NTB 14-02-VI). Der Referenzwert für die effektive hydraulische Durchlässigkeit beträgt $K_{r,eff} = 2 \cdot 10^{-12}$ m/s, wobei sowohl die Gesteinsmatrix ($K_{\perp} = 1 \cdot 10^{-12}$ m/s) als auch Störungen ($K_{r,eff} = 1 \cdot 10^{-12}$ m/s) zum advektiven Stofftransport beitragen (NTB 14-01). Der oberen Eckwert von $K_{r,eff} = 1 \cdot 10^{-11}$ m/s wird von erhöhter Wasserführung in Störungen dominiert.

Kalkige und sandige Bereiche (*Sandkalkabfolgen* mit Gehalten < 20 Gew.-%, SKA, NTB 14-02-VI) weisen einen durchschnittlichen Tonmineralgehalt von etwas mehr als 10 Gew.-% auf (NTB 14-01). Die Eisenoolithe,

Karbonatbänke, Hartgründe und Sandsteine sind z. T. nur lokal ausgebildet, z. T. aber auch fast im ganzen Verbreitungsgebiet zu finden (NTB 14-01). Für Sandkalkabfolgen wird der Freisetzungspfad «Störung» als wahrscheinlich (NTB 14-02-VI) und der Freisetzungspfad «geklüftetes Medium» als eine konzeptuelle Ungewissheit betrachtet, die aufgrund der heutigen Datenlage nicht ausschliessbar ist. Entsprechend geht die Nagra für die effektive hydraulische Durchlässigkeit von einem Referenzwert von $K_{r,eff} = 1 \cdot 10^{-9}$ m/s für ein von Klüften und Störungen durchsetztes Gestein und von einem oberen Eckwert von $K_{r,eff} = 1 \cdot 10^{-7}$ m/s aus (NTB 14-02-VI; NTB 14-01).

Für die tonreichen Abfolgen und die Sandkalkabfolgen des 'Braunen Doggers' (TA, STA, SKA) wird im NAB 12-39 ein Referenzwert der physikalischen Porosität von 10 Vol.-% und ein unterer Eckwert von 5 Vol.-% vorgeschlagen. Im NTB 14-02-VI wird erläutert, dass aufgrund neuer Daten aus der Bohrung Schlattingen-1 der Referenzwert der tonreichen Abfolgen (TA, STA), im Vergleich zur Angabe im früher publizierten NAB 12-39, von 10 auf 12 Vol.-% erhöht wurde. Die höchste physikalische Porosität wurde in einer Probe aus der Bohrung Benken mit 14.3 Vol.-% angetroffen. In Anbetracht des kleinen Datensatzes und im Einklang mit NTB 10-01 wird der obere Eckwert bei 15 Vol.-% festgelegt (NAB 12-39). Bezüglich der Anionen-zugänglichen Porosität für die TA, STA und SKA liegen Resultate von Diffusionsexperimenten des PSI mit einem Anteil von 47 resp. 64 % vor. Der Referenzwert wird, im Einklang mit den Annahmen für die Modellierung der Porenwasserchemie, bei einem Anteil von 50 % festgelegt. Dies entspricht 5 Vol.-%. Basierend auf diesem Anteil und dem unteren Eckwert der physikalischen Porosität ergibt sich ein (abgerundeter) unterer Eckwert von 2 Vol.-%. Der obere Eckwert wird bei 10 Vol.-% festgelegt: Damit wird die hypothetische Kombination oberer Eckwert der physikalischen Porosität (15 Vol.-%) und ein Anteil der Anionen-zugänglichen Porosität von 67 % abgedeckt (NAB 12-39).

Beurteilung des ENSI

In den Sandkalkabfolgen (SKA) muss auch nach Ansicht des ENSI mit hydraulischen Durchlässigkeiten $K_{r,eff}$ von $1 \cdot 10^{-9}$ m/s (Referenzwert) bis zu $1 \cdot 10^{-7}$ m/s (oberer Eckwert) gerechnet werden (Kapitel 3.2). Auch durch zusätzliche Untersuchungen in Etappe 3 SGT liesse sich der obere Eckwert nicht zuverlässig so weit reduzieren, dass mit Bestimmtheit von einer Barrierenwirkung ausgegangen werden kann. Damit können im massgebenden Fall für die Einengung (mFE) für die qualitative Bewertung nur die TA-1 und prinzipiell auch die STA zum einschlusswirksamen Gebirgsbereich gezählt werden. Weil für die Platzierung der Lagerkavernen nur die TA-1 in Frage kommt und diese unmittelbar von SKA über- bzw. unterlagert wird, ist jedoch für die Beurteilung der Barrierenwirkung des 'Braunen Doggers' als Wirtgestein die TA-1 entscheidend. Das ENSI akzeptiert den für die TA-1 von der Nagra gewählten Referenz- und oberen Eckwert sowie die Betrachtung als äquivalent-poröses Medium. Die oberen Eckwerte der STA sind für die Betrachtungen in Etappe 2 SGT weder für die Dosisberechnungen noch für die qualitative Bewertung relevant und werden daher nicht beurteilt. Für den 'Braunen Dogger' sind aus Sicht des ENSI damit die Forderungen 5 und 27 aus ENSI 33/115 erfüllt.

Die Herleitung der Referenzwerte und der oberen und unteren Eckwerte für die physikalische Porosität und die Anionen-zugängliche Porosität im NAB 12-39 ist von der Nagra nachvollziehbar dargelegt und die vorgeschlagenen Werte zur physikalischen Porosität und Anionen-zugänglichen Porosität sind für die tonreichen Abfolgen des 'Braunen Doggers' weitgehend plausibel. Damit erachtet das ENSI die in ENSI 33/115 geforderten Abklärungen hinsichtlich der Porosität und deren Bandbreite für den 'Braunen Dogger' (Forderungen 2, 32 und 33) als erfüllt. Für die SKA des 'Braunen Doggers' gibt es nur wenige Messungen, die vorhandenen Porositätswerte sind mit denen der TA-1 vergleichbar. Das Vorgehen und die Werte der Nagra sind nachvollziehbar und plausibel.

3.1.3 Effinger Schichten

Lithofazielle Ausbildung und räumliche Ausdehnung

Angaben der Nagra

Die Effinger Schichten wurden in einem flachen Meer östlich der Jura-Karbonatplattform am Nordrand der Tethys abgelagert. Sie entstanden während des mittleren bis späten Oxfordiens. Mächtigkeitsrekonstruktionen und Strömungsindikatoren weisen auf ein regionales Depotzentrum im Raum Brugg - Aarau - Olten hin, wo die Effinger Schichten eine Mächtigkeit von über 200 m erreichen. Gegen Osten nimmt die Mächtigkeit der Effinger Schichten stark ab (14 m in der Bohrung Benken). Die Effinger Schichten bestehen hauptsächlich aus monotonen dunkelgrauen, z. T. sandigen Kalkmergeln mit eingeschalteten hellgrauen, z. T. sandigen, tonigen Kalken und vereinzelt reinen Kalken (Karbonatgehalt > 90 %). Entsprechend stark variieren die mineralogische Zusammensetzung und der Gehalt an Tonmineralen. Die Effinger Schichten lassen sich in Kalkmergelabfolgen (KMA) und Kalkbankabfolgen (KBA) unterteilen. Dabei bestehen die KBA in der Regel zu einem grossen Teil aus Kalkbänken, welche durch Kalkmergel-Zwischenlagen voneinander getrennt werden. Entsprechend finden sich auch in den KMA Kalkbänke. Die in der Region des Jakobsbergs auffälligste KBA wird als Gerstenhübel-Schichten bezeichnet.

Als kontrollierende Faktoren der Genese der kalkmergeligen Wechsellagerungen (KBA und KMA) der Effinger Schichten werden neben der Tektonik Meeresspiegelschwankungen und klimatische Oszillationen in Betracht gezogen, die zu einem periodisch variierenden, siliziklastischen und karbonatischen Sedimenteintrag ins Ablagerungsbecken führte. Im Aufschlussbereich wurden in den Effinger Schichten Diskordanzen beobachtet, welche auf Resedimentationsprozesse (submarine Rutschungen, Sturmlagen, Rinnenbildung) zurückgeführt werden. Nach Wetzel et al. (2003) muss es im Ablagerungsraum der Effinger Schichten während des Oxfordiens zeitweise zu stark erhöhter differentieller Subsidenz gekommen sein, was zu einer morphologischen Gliederung des Raumes in Senken und relativen Hochzonen führte. Die Wechsellagerung von KMA und KBA lässt sich in Bohrungen anhand der Tonmineralgehalt-Logs erkennen, welche basierend auf einer Kombination verschiedener geophysikalischer Bohrloch-Logs berechnet wurden (NAB 14-59). Korrelationen der Tonmineralgehalt-Logs zeigen, dass sich gewisse KBA mit deutlich reduzierten Tonmineralgehalten über 25 km weit verfolgen lassen (NAB 13-16). So lassen sich u. a. die Gerstenhübel-Schichten als ein bis über 20 m mächtiges Intervall in den Bohrungen Aarau, Küttigen-2, Biberstein, Schafisheim bis Riniken ausscheiden. In dieser Region bilden sie innerhalb der Effinger Schichten die mächtigste KBA mit abschnittsweise den tiefsten Tonmineralgehalten (0 bis 5 Gew.-%). Mit über 40 m Mächtigkeit bildet demgegenüber die KMA-5 die mächtigste Kalkmergelabfolge, die sich von der Bohrung Oftringen über die Bohrungen Gösgen SB2 und SB4 bis zur Bohrung Aarau verfolgen lässt.

Die Effinger Schichten wurden rund um das Standortgebiet Jura-Südfuss auch seismostratigraphisch untersucht (NAB 14-57). Ein Vergleich der Bohrdaten mit den seismischen Daten zeigt, dass die seismische Auflösung generell nicht ausreicht, um einzelne Kalkbankabfolgen (KBA) und Kalkmergelabfolgen (KMA) abzubilden. Die beobachtete kontinuierliche seismische Fazies wird aber als Ausdruck einer lateral ausgedehnten Wechsellagerung von KBA und KMA interpretiert. Ausserdem konnte der Top der Gerstenhübel-Schichten mit Hilfe der Bohrdaten seismisch erfasst und der entsprechende seismische Horizont in erster Näherung regional kartiert werden.

Die Mächtigkeit der Effinger Schichten variiert von 244 m (Bohrung Gösgen SB-4) bis 181 m (Bohrung Riniken) und nimmt dann gegen Osten stark ab (Weiach: 87 m und Benken: 14 m).

Beurteilung des ENSI

In Etappe 2 SGT hat die Nagra den Kenntnisstand über die Sedimentologie, Tonmineralogie, Lithostratigraphie, Faziesverteilung und Genese der Effinger Schichten anhand von ergänzenden Felduntersuchungen, Profilaufnahmen von Bohrungen und Aufschlüssen, geophysikalischen Bohrlochmessungen, Labormessungen an Bohrkernen sowie seismischen Untersuchungen massgeblich erweitert (NAB 13-16; NAB 13-50; NAB 13-70; NAB 14-57; NAB 14-59). Das ENSI sieht damit die Forderungen 4, 13 und 20 aus ENSI 33/115 als erfüllt an.

Die detaillierten lithologischen und sequenzstratigraphischen Auswertungen sowie mikrofaziellen Analysen erlauben zusammen mit Resultaten früherer Arbeiten (u. a. Gygi et al. 1998; Allenbach 2001; Allenbach 2002; Wetzel et al. 2003; Strasser et al. 2012) eine umfassende sedimentär-fazielle Interpretation der Genese der Effinger Schichten. Das ENSI hat die Ergebnisse nachvollzogen und beurteilt die durchgeführten Arbeiten als sorgfältig und umfassend. Das ENSI sieht damit Forderung 3 aus ENSI 33/115 als erfüllt an.

Die von der Nagra vorgestellte Korrelation über die Tonmineralgehalte aus den geophysikalischen Logs (NTB 14-02-II) lässt eine laterale Fortsetzung der KBA über einige km vermuten. Das ENSI sieht jedoch die vorgeschlagenen lateralen Korrelationen nicht als einzige mögliche Lösungen an, wodurch auch über kürzere Distanzen grössere Ungewissheiten vorhanden sind. Auch die seismische Faziesanalyse (NAB 14-57) konnte die einzelnen KBA und KMA nicht abbilden. Einzig die Gerstenhübel-Schichten konnten vereinfachend als seismische Faziesseinheit anhand der hohen Reflexionsamplituden eingegrenzt werden.

Das ENSI beurteilt den für die Mächtigkeit des Wirtgesteins Effinger Schichten im Standortgebiet Jura-Südfuss abgeleiteten Referenzwert von 225 m und den Referenzwert für die KMA-5 von 44 m sowie deren unteren und oberen Eckwert als nachvollziehbar und plausibel.

Mineralogie und Geochemie

Angaben der Nagra

Die mineralogischen Analysen der Effinger Schichten fallen in Abbildung 6 in die Felder der Kalkmergel, tonigen Kalke und Kalke. Die Effinger Schichten bestehen weitgehend aus Kalkmergeln mit eingelagerten Kalkbänken, wobei die Kalkbänke der Gerstenhübel-Schichten teilweise Tonmineralgehalte bis gegen 0 Gew.-% aufweisen. Die Kalkmergelabfolgen haben mittlere Tonmineralgehalte (Referenzwert) von 27 Gew.-% (unterer Eckwert = 20 Gew.-%), die Kalkbankabfolgen mittlere Tonmineralgehalte von 12 Gew.-% (unterer Eckwert = 0 Gew.-%).

Beurteilung des ENSI

Die mineralogische Zusammensetzung der Effinger Schichten wurde durch das ENSI mit anderen Datenzusammenstellungen verglichen und die daraus von der Nagra getroffenen Aussagen geprüft. Mit einem mittleren Tongehalt von 27 Gew.-% (13 Gew.-% quellbare Tonminerale) fallen die Effinger Schichten auch gegenüber dem 'Braunen Dogger' signifikant ab. Längere Abschnitte mit hohen Tonmineralgehalten wie im Opalinuston und im 'Braunen Dogger' fehlen. Auf diversen stratigraphischen Niveaus in den Effinger Schichten liegen KBA vor, in denen Kalkmergel mengenmässig deutlich zurücktreten. Insbesondere die Gerstenhübel-Schichten können auch reine Kalke enthalten. Das ENSI ist daher mit dem unteren und oberen Eckwert der Nagra bzgl. Tonmineralgehalt einverstanden.

Porenwasser

Angaben der Nagra

Das Referenzporenwasser für die Effinger Schichten entspricht der «low-salinity»-Variante des Referenzporenwassers im NAB 09-13. Wässrige Auszüge bringen Sulfat aus einer Festphase in Lösung, was bei Rückrechnung auf Porenwasserkonzentration zu einer rechnerischen Übersättigung bezüglich Cölestin und Gips führt (NTB 12-07). Die bevorzugte Interpretation ist, dass die Sulfatgehalte durch die Präsenz von Cölestin limitiert sind, auch wenn Cölestin bislang nur selten nachgewiesen werden konnte. Den Ungewissheiten wurde mit der Definition von drei Varianten für die Effinger Schichten Rechnung getragen (NTB 14-02-VI): (1) tief-Chlorid-Variante, (2) hoch-Sulfat-Variante, und (3) hoch- P_{CO_2} /tief-pH-Variante.

Beurteilung des ENSI

Die Datengrundlage bezüglich Porenwasserzusammensetzung für die Effinger Schichten war zur Zeit der Definition der Referenzporenwässer in Etappe 1 SGT spärlich und die Interpretation der vorhandenen Daten mit Ungewissheiten behaftet, insbesondere bezüglich der Sulfatgehalte und der Bandbreite der Anionen-zugänglichen Porosität (siehe unten, sowie NAB 09-13; NTB 12-07). Die Ungewissheiten führten zur Definition einer hochsalinen Variante mit etwa 40 g/kg Chlorid (etwa doppelte Meerwassersalinität) und maximal löslichem Sulfat. Diese anomal hohe Salinität konnte die Nagra aufgrund neuer Daten in Etappe 2 SGT entkräften. Neue Daten und die Diskussion zu den Sulfatgehalten sind im Synthesebericht zu den Effinger Schichten im Detail und nachvollziehbar diskutiert (NTB 12-07). Mit den zusätzlichen Porenwasservarianten deckt die Nagra die Bandbreiten des Porenwassers ab. Das ENSI ist mit dem verwendeten Referenzporenwasser und den dazu angegebenen Bandbreiten einverstanden.

Hydraulische Eigenschaften

Angaben der Nagra

Innerhalb der Effinger Schichten lassen sich hinsichtlich ihrer Barrierenwirkung konzeptuell zwei lithofazielle Einheiten unterscheiden (NTB 14-02-VI):

Die *Kalkmergelabfolgen* (KMA) weisen eine geringe hydraulische Durchlässigkeit auf. Dies wird durch unabhängige Evidenzen zum Langzeitisolationsvermögen bestätigt. Es kann jedoch nicht ausgeschlossen werden, dass die grossräumige Durchlässigkeit durch steilstehende Diskontinuitäten etwas erhöht wird (NTB 14-01; NTB 14-02-VI), voraussichtlich spielen sie aber eine untergeordnete Rolle. Die KMA sind voraussichtlich ein poröses Medium mit Diskontinuitäten, wobei mit wenig ausgeprägtem lokalisiertem Wasserfluss und günstigen Bedingungen für Matrixdiffusion gerechnet wird (NTB 14-01). Als Referenzwert wird für die Gesteinsmatrix eine hydraulische Durchlässigkeit senkrecht zur Schichtung von $K_{\perp} = 1 \cdot 10^{-12}$ m/s angenommen. Der obere Eckwert von $K_{\perp, \text{eff}} = 1 \cdot 10^{-11}$ m/s wird von erhöhter Wasserführung in Störungen dominiert.

Die hydraulischen Eigenschaften der *Kalkbankabfolgen* (KBA) können durch tektonische Überprägung signifikant beeinflusst sein (NTB 14-01). Ein Netzwerk durchlässiger Strukturen innerhalb der Kalkbänke ist wenig wahrscheinlich, kann aber nicht völlig ausgeschlossen werden (NTB 14-02-VI). Dementsprechend geht die Nagra für die effektive hydraulische Durchlässigkeit von einem Referenzwert von $K_{\perp, \text{eff}} = 1 \cdot 10^{-9}$ m/s für ein von Klüften und Störungen durchsetztes Gestein und von einem oberen Eckwert von $K_{\perp, \text{eff}} = 1 \cdot 10^{-7}$ m/s aus (NTB 14-02-VI; NTB 14-01).

Der Referenzwert der physikalischen Porosität für die Kalkmergelabfolgen KMA orientiert sich an den beiden Bohrungen Oftringen und Gösgen KB5a (NAB 11-20) in der Region Jura-Südfuss und wird bei 9 Vol.-% festgelegt. Der untere Eckwert wird in Anbetracht des kleinen Datensatzes bei 6 Vol.-% und der obere Eckwert bei 12 Vol.-% festgelegt (NTB 14-03; NAB 12-39). Als Referenzwert der physikalischen Porosität für die Kalkbankabfolgen KBA wird der Medianwert der fünf tonärmsten Proben der KBA der Bohrungen Oftringen und Gösgen KB5a in Höhe von 4.5 Vol.-% verwendet. Der tiefste Wert beträgt 3.0 Vol.-% und wird als unterer Eckwert festgelegt. Der obere Eckwert wird bei 9 Vol.-% festgelegt (NAB 12-39). Bezüglich der Anionen-zugänglichen Porosität wird ein Anionen-zugänglicher relativer Anteil von 50 % als am plausibelsten beurteilt, in den tonärmsten (karbonatreichen) Proben allenfalls ein relativer Anteil gegen 100 %. Basierend auf den physikalischen Porositäten ergibt dies die folgenden Referenz- und Eckwerte: Referenzwert für die KMA ist 5 Vol.-%, unterer Eckwert 3 Vol.-%, oberer Eckwert 6 Vol.-%. Durch diese Eckwerte wird beispielsweise die Kombination des Referenzwerts der physikalischen Porosität mit relativen Anteilen der anionen-zugänglichen Porosität von 33 bis 67 % abgedeckt. Referenzwert für die KBA ist 3 Vol.-%, unterer Eckwert 2 Vol.-%, oberer Eckwert 5 Vol.-%. Durch diese Eckwerte wird beispielsweise die Kombination des Referenzwerts der physikalischen Porosität (4.5 Vol.-%) mit Anteilen der Anionen-zugänglichen Porosität von 40 bis 100 % abgedeckt (NAB 12-39).

Beurteilung des ENSI

Im mFE sind nur die KMA Teil des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs. Für dessen Beurteilung ist die mächtigste tonreiche Abfolge (KMA-5) entscheidend, welche unmittelbar von Kalkbankabfolgen überlagert (KBA-5) bzw. unterlagert (KBA-4 = Gerstenhübel-Schichten) wird. Das ENSI akzeptiert die dafür von der Nagra gewählten Referenz- und oberen Eckwerte für die hydraulische Durchlässigkeit der Gesteinsmatrix K_{\perp} sowie die Betrachtung als äquivalent-poröses Medium. In Klüften und Störungen ist aufgrund der tektonischen Überprägung (ENSI 33/539) eine erhöhte Wasserführung auch aus Sicht des ENSI nicht auszuschliessen.

In den KBA muss auch nach Ansicht des ENSI mit hydraulischen Durchlässigkeiten K_{\perp} von $1 \cdot 10^{-9}$ m/s (Referenzwert) bis zu $1 \cdot 10^{-7}$ m/s (oberer Eckwert) gerechnet werden (Kapitel 3.2). Auch durch zusätzliche Untersuchungen in Etappe 3 SGT liesse sich der obere Eckwert nicht zuverlässig so weit reduzieren, dass für die KBA mit Bestimmtheit von einer Barrierenwirkung ausgegangen werden kann. Für die KBA ist das ENSI mit den von der Nagra vorgeschlagenen Referenz- und oberen Eckwerten einverstanden. Für die Effinger Schichten sind aus Sicht des ENSI damit die Forderungen 5 und 27 aus ENSI 33/115 erfüllt.

Für die KMA und die KBA sind die Referenzwerte und die Eckwerte der physikalischen Porosität von der Nagra nachvollziehbar hergeleitet und dargelegt. Damit erachtet das ENSI die in ENSI 33/115 geforderten Abklärungen hinsichtlich der Porosität und ihrer Bandbreite für die Effinger Schichten (Forderungen 29, 32 und 33) als erfüllt. Ebenso sind der Referenzwert und der untere Eckwert der Anionen-zugänglichen Porosität für das ENSI plausibel. Aufgrund des geringeren Tonmineralgehalts ist in den KMA ein grösserer relativer Anteil der Anionen-zugänglichen Porosität als im Opalinuston zu erwarten. Für den oberen Eckwert der Anionen-zugänglichen Porosität verwendet das ENSI in Analogie zum Opalinuston und 'Braunen Dogger' einen relativen Anteil von 70 %, um die genannten Bandbreiten abzudecken, woraus ein Wert von 8.4 Vol.-% resultiert. Für die KBA gibt die Nagra einen möglichen relativen Anteil der Anionen-zugänglichen Porosität von 40 - 100 % an. In Analogie zum Opalinuston und 'Braunen Dogger' verwendet das ENSI für den oberen Eckwert einen relativen Anteil von 70 %, um die genannten Bandbreiten zu berücksichtigen, woraus ein Wert von 6.3 Vol.-% resultiert.

3.1.4 Toniger Lias

Lithofazielle Ausbildung und räumliche Ausdehnung

Angaben der Nagra

Die bisher als Lias bezeichnete Schichtfolge in der Nordschweiz wurde von Reisdorf et al. (2011) stratigraphisch überarbeitet und neu als Staffelegg-Formation bezeichnet. Dabei wurden elf neue Member und neun Bänke definiert. Aus praktischen Gründen (u. a. um innerhalb des SGT-Verfahrens eine einheitliche Terminologie zu verwenden) wird weiterhin die alte Terminologie verwendet.

Im Tafeljura und östlich davon bis nach Schaffhausen besteht der Lias aus sandig-siltigen Tonsteinen, Tonmergeln, Kalkmergeln und einzelnen zwischengelagerten, wenige Meter mächtigen Kalken und geringmächtigen eisenoolithischen oder stark phosphoritischen Horizonten (NAB 14-95). Der tonige Lias oberhalb des Arietenkalks lässt sich von den Bohrungen Benken, Osterfingen, Weiach bis nach Riniken verfolgen. Er bildet hier den grössten Anteil an der Mächtigkeit des Lias. Gegen Südwesten innerhalb des Aargauer und Solothurner Faltenjuras und südlich davon ist ein Fazieswechsel zu beobachten und die lithostratigraphische Ausbildung des Tonigen Lias ist generell sandig-kalkiger.

Der darunter anstehende, meist nur wenige Meter mächtige Arietenkalk ist lithologisch variabel ausgebildet, besteht hauptsächlich aus grauen, kondensierten teilweise fossilreichen arenitischen Kalksteinen. Im Tonmineralgehalt-Log ist er durch die tiefsten Tonmineralgehalte innerhalb des Lias charakterisiert und lässt sich mit wenigen Ausnahmen in der gesamten Nordschweiz finden.

Die Mächtigkeit der tonreichen Abfolge (oberhalb des Beggingen-Member, NAB 14-95) variiert in der Nordschweiz zwischen 15 m (Bohrung Schafisheim) und 40 m (Tongrube Frick).

Beurteilung des ENSI

Mit den im NAB 14-95 dokumentierten Untersuchungsergebnissen zur Sedimentologie und lithofaziellen Ausprägung des Lias in der Nordschweiz hat die Nagra eine umfassende Darstellung erarbeitet, mit welcher der Lias als unteres Rahmengestein erstmals in dieser Bearbeitungstiefe für die Nordschweiz charakterisiert wurde. Das Untersuchungsgebiet deckt alle fünf geologischen Standortgebiete der Nordschweiz ab. Kalkreiche und sandigere Lithologien können analog zum 'Braunen Dogger' als «harte Bänke» mit einem Potenzial zu höherer Durchlässigkeit bei tektonischer Überprägung (Kluftwasserleiter) angesprochen werden. Eine solche Abfolge ist der Arietenkalk.

Gemäss den Profilkorrelationen (NAB 14-95) können im Lias der geologischen Standortgebiete zwei Faziestypen unterschieden werden: Im Westen (Jura-Südfuss) tritt eine «kalkig-sandige Fazies» auf, im Aargauer Faltenjura verzahnt sich diese mit der über weite Teile des Untersuchungsgebietes vorherrschenden «tonigen Fazies», in der tonreiche Einheiten dominieren (Jura Ost, Nördlich Lägern, Zürich Nordost und Südranden).

Das ENSI beurteilt die aus Bohrungen und Aufschlüssen abgeleiteten Mächtigkeiten des Tonigen Lias für die verschiedenen geologischen Standortgebiete als nachvollziehbar und plausibel.

Mineralogie und Geochemie

Angaben der Nagra

Der Tonige Lias zeigt mittlere Tonmineralgehalte von 40 Gew.-%. Der Tonmineralgehalt lässt auf ein bedeutendes Selbstabdichtungsvermögen schliessen, der untere Eckwert beträgt 20 Gew.-%. Einzig im Standortgebiet Jura-Südfuss ist der Lias unter dem Opalinuston vergleichsweise sandig-kalkig ausgebildet und wird deshalb als Kalkiger Lias bezeichnet (NTB 14-02-II).

Beurteilung des ENSI

Die Angaben zur mineralogischen Zusammensetzung des Tonigen Lias im NTB 14-02-VI wurden durch das ENSI mit Angaben im NAB 12-40 verglichen und die Aussagen der Nagra geprüft. Opalinuston und Toniger Lias enthalten grundsätzlich die gleichen Minerale, aber der Tonige Lias weist eine höhere vertikale Variabilität der Mineralgehalte und einen deutlich höheren Karbonatanteil vor allem im oberen Teil der Abfolge auf. In allen Standortgebieten zeigt sich bzgl. Tonmineralgehalt eine klare Zweiteilung des Tonigen Lias in einen oberen tonärmeren und einen unteren, signifikant tonreicheren Teil. Im Standortgebiet Jura-Südfuss ist zusätzlich der obere Teil des Lias kalkig ausgebildet und wird von der Nagra zu Recht als «Kalkiger Lias» bezeichnet. Die Tonmineralgehalte des gesamten Tonigen Lias werden von der Nagra korrekt dargestellt und enthalten knapp 25 Gew.-% quellbare Phasen (NAB 12-40). Stark erniedrigte Werte (< 20 Gew.-%) werden in den oberen kalkreicheren Lagen beobachtet. Hohe Tonmineralgehalte von über 50 Gew.-% (vergleichbar mit Opalinuston) werden nur im unteren Teil des Tonigen Lias (Obtususton-Schichten) erreicht. Der Tonige Lias ist damit bezüglich Tonmineralgehalt am ehesten mit den STA- (oberer Teil) bzw. TA-Abschnitten (unterer Teil) im 'Braunen Dogger' vergleichbar, denen ein mässig gutes bis sehr gutes Selbstabdichtungsvermögen attestiert wird. Dies wirkt sich auf die Konzeptualisierung aus. Das ENSI ist mit den Nagra-seitig für den Tonigen Lias vorgeschlagenen Referenz- und Eckwerten einverstanden.

Porenwasser

Angaben der Nagra

Alle von der Nagra angegebenen Porenwasserzusammensetzungen aus dem Lias kommen entweder aus oberflächennaher Situation, aus dem Faltenjura oder aus Schichten unterhalb des Lias (NAB 13-63). Für den Tonigen Lias liegen keine Daten zur Porenwasserzusammensetzung vor. Deshalb verwendet die Nagra die Porenwasserzusammensetzung des Opalinustons.

Beurteilung des ENSI

Daten zur Bestätigung einer Gleichheit oder Ähnlichkeit der Porenwasserzusammensetzung zwischen Opalinuston und Tonigem Lias liegen nicht vor. Es ist aufgrund der lateral weiträumig wenig unterschiedlichen Lithologie des Tonigen Lias (NAB 14-95) nicht mit einem Einfluss der Zusammensetzung auf den Standortgebietsvergleich zu rechnen. Die Verwendung des Referenzporenwassers aus dem Opalinuston ist darum für Etappe 2 SGT gerechtfertigt. Das ENSI erwartet aber für Etappe 3 SGT, dass die Nagra Porenwasserbestimmungen innerhalb der Abfolge des Tonigen Lias durchführt und daraus ein formationspezifisches Porenwasser definiert.

Hydraulische Eigenschaften

Angaben der Nagra

In Anbetracht der etwas niedrigeren Tonmineralgehalte wird für den Tonigen Lias ein leicht erhöhter, dem Opalinuston «untief» entsprechender Datensatz für den Referenzwert der hydraulischen Durchlässigkeit von $K_{\perp} = 1 \cdot 10^{-13}$ m/s verwendet. Ein oberer Eckwert wird nicht definiert, weil im Falle tonreicher lithofazieller Einheiten als Rahmengesteine die Dosisberechnungen nicht davon betroffen sind (NTB 14-02-VI).

Aus den Messwerten der physikalischen Porosität des Tonigen Lias wurde ein Referenzwert von 10 Vol.-% festgelegt, die Eckwerte bei 4 und 14 Vol.-%. Es gibt keine Daten zur Anionen-zugänglichen Porosität des Tonigen Lias. Aufgrund des Tonmineralgehalts wird der relative Anteil in Analogie zum Opalinuston auf 50 % geschätzt (NAB 12-40).

Beurteilung des ENSI

Wie oben ausgeführt (Mineralogie), lässt sich die Abfolge des Lias anhand des Tonmineralgehalts konzeptuell in einen oberen tonärmeren und einen unteren tonreichen Tonigen Lias unterteilen. Im oberen Teil beträgt der durchschnittliche Tonmineralgehalt etwas über 20 Gew.-% und entspricht damit einer STA des 'Braunen Doggers'. Das ENSI geht daher für den oberen Teil von einem Referenzwert von $K_{\perp} = 1 \cdot 10^{-12}$ m/s aus. Aufgrund der innerhalb des oberen Teils stark variierenden Tonmineralgehalte bei gleichzeitig gegenüber einer STA des 'Braunen Doggers' erhöhten Karbonatgehalten und der damit verbundenen Neigung zu spröder Deformation mit Bildung von wasserwegsamem Klüften und Störungen berücksichtigt das ENSI einen oberen Eckwert von $K_{\perp} = 1 \cdot 10^{-7}$ m/s, entsprechend einer SKA des 'Braunen Doggers'.

Der untere tonreiche Teil ist mineralogisch und strukturell mit den TA des 'Braunen Doggers' vergleichbar. Das ENSI geht daher für den unteren Teil von einem Referenzwert von $K_{\perp} = 1 \cdot 10^{-13}$ m/s und von einem oberen Eckwert von $K_{\perp} = 5 \cdot 10^{-13}$ m/s für die hydraulische Durchlässigkeit aus. Im massgebenden Fall für die Einengung kommen diese Werte allerdings nicht zum Tragen, da in allen Nordschweizer Standortgebieten direkt unterhalb des Opalinustons ein Freisetzungspunkt in Richtung Biosphäre angenommen wird. Damit ist auch in Bezug auf die unteren Rahmengesteine die Forderung 5 aus ENSI 33/115 umgesetzt worden.

Hinsichtlich der Porositäten ist die Unterteilung des Tonigen Lias in einen oberen tonärmeren und einen unteren tonreichen Tonigen Lias aufgrund der spärlichen Daten derzeit nicht möglich. Die Herleitung der Referenzwerte und oberen Eckwerte für die physikalische Porosität wurde von der Nagra für den Tonigen Lias nachvollziehbar dargelegt und die vorgeschlagenen Werte sind plausibel. Der für die Anionen-zugängliche Porosität angenommene relative Anteil von 50 % ist für das ENSI für den Referenz- und den unteren Eckwert nachvollziehbar. Für den oberen Eckwert geht das ENSI jedoch wie beim Opalinuston von einem höheren relativen Anteil von 70 % aus, was einer Anionen-zugänglichen Porosität von 10 Vol.-% entspricht. In Etappe 3 SGT erwartet das ENSI, dass die Nagra zur Porosität des Tonigen Lias formations- und standortgebietspezifische Daten vorlegt.

3.1.5 Mergel-Formationen des Helvetikums

Lithofazielle Ausbildung und räumliche Ausdehnung

Angaben der Nagra

Die Mergel-Formationen des Helvetikums im geologischen Standortgebiet Wellenberg bestehen volumemässig grösstenteils aus der frühkretazischen Abfolge der Palfris-Formation (Berriasien) und der Vitznau-Mergel (Valanginien) der Drusberg-Decke. Zum Wirtgestein gehören auch die tertiären mergeligen Einheiten der Axen-Decke, nämlich die Stad-Formation (Globigerinenmergel) und ein Teil der Hohgant-Formation (Schimberg-Schiefer). Ausserdem werden die interhelvetischen Mélanges (tektonisierte Tonmergel) entlang der Überschiebungsbahnen zum Wirtgestein gezählt.

Diese Einheiten bilden eine der bedeutendsten Anhäufungen nicht-metamorpher tonreicher Gesteine im Helvetikum. Die Palfris-Formation und die Vitznau-Mergel bestehen vorwiegend aus dunklen, siltigen bis feinsandigen Kalk- und Tonmergeln. Teilweise alternieren sie mit Kalkbänken, welche gelegentlich in mehrere Meter mächtigen KBA konzentriert sind. Die Vitznau-Mergel weisen gegenüber der Palfris-Formation einen etwas erhöhten Anteil an Kalkbänken auf. Aufgrund der starken tektonischen Überprägung sind die Kalkbänke meist boudiniert und zerschert, so dass ihre ursprüngliche Kontinuität nicht mehr vorhanden ist. Als Folge dieser Deformation enthalten die Kalkbänke häufig drusige, teilweise mit Calcit verfüllte Zerrklüfte. Es bestehen Hinweise, dass die KBA stellenweise über grössere Distanzen zusammenhängend sein könnten.

Seit dem Geosynthesebericht Wellenberg von 1997 (NTB 96-01) und den darin verarbeiteten Daten (NTB 93-28) führten neu gewonnene Erkenntnisse bezüglich Tektonik des Helvetikums (Pfiffner et al. 2010; Pfiffner 2011) sowie am Synthesebericht NTB 96-01 geäusserte Kritikpunkte (Weh 2002; Mosar 2010) zu einer Überarbeitung der geologischen Profile des Wellenberges (NAB 12-04 Rev.1; NAB 14-26) und zu einem aktualisierten geologischen 3D-Modell (NAB 14-33). Die Grenzen des Wirtgesteins haben sich dabei in den neuen Profilen gegenüber älteren Darstellungen etwas verschoben. Ein Vergleich der alten Profilschnitte mit den neuen zeigt trotz unterschiedlicher Begrenzungsflächen von Drusberg- zu Axen-Decke vergleichbar grosse Querschnittflächen für das Wirtgesteinsvorkommen im Standortgebiet Wellenberg. Die Ausdehnung der Mergel-Formationen des Helvetikums im Standortgebiet Wellenberg beträgt damit ca. 2 km in N-S Richtung, mehr als 3 km in W-E Richtung und bis zu 1700 m in der Vertikalen (Maximalwert unter dem Eggeligrat).

Beurteilung des ENSI

Der im Zusammenhang mit dem Rahmenbewilligungsgesuch für ein SMA-Lager in den 1990er Jahren erarbeitete Datensatz wurde vom ENSI bereits im Rahmen der Begutachtung des Rahmenbewilligungsgesuches überprüft und die Ergebnisse im Gutachten HSK 30/9 und in weiteren Berichten (u. a. Expertenberichte von Huber und Huber 1998; Milnes 1999) festgehalten. Diese Prüfergebnisse sind aus Sicht des ENSI weiterhin gültig.

Das ENSI beurteilt die im NTB 14-01 und NTB 14-02-II zusammengefassten Angaben zur lithofaziellen Ausbildung und räumlichen Verbreitung der Mergel-Formationen des Helvetikums im Standortgebiet Wellenberg als umfassend und nachvollziehbar. Die Mergel der unteren Kreide der Drusberg-Decke (Palfris- und Vitznau-Formation) dienten während der alpinen Gebirgsbildung als bevorzugte Abscherhorizonte der Drusberg-Decke, was zu einer intensiven internen Verfaltung, Boudinierung, Zerschierung und zur Anhäufung der Tonmergelabfolgen an der Stirn der Axen-Decke führte. Lokal wurden auch Fremdgesteinskörper (Malmkalke) mit teilweise bedeutender Ausdehnung (Spitzstein ca. 1.5 km, Maisander ca. 2 km) mitgerissen und in die Tonmergelabfolgen eingeschuppt. Im Wirtgesteinskörper des Standortgebiets Wellenberg können Fremdgesteinskörper a priori nicht ausgeschlossen werden, da der Abstand zwischen den bestehenden Sondierbohrungen gross ist.

Die Überschiebung der helvetischen Decken fand unter erheblicher Überlagerung statt, da über den helvetischen Decken noch die penninischen Klippen-Decken und die Flysch-Decken lagen. Für die Mergel der Palfris- und Vitznau-Formation werden im Standortgebiet Wellenberg aufgrund von Untersuchungen an Flüssigkeitseinschlüssen in Calcit-Adern maximale Temperaturen bzw. Drücke von 250 °C bzw. 250 MPa abgeleitet (Ballentine et al. 1994). Als Folge dieser Bedingungen wurde das Quellvermögen der Tonminerale reduziert.

Für die Sicherheitsbetrachtungen lässt sich eine intensiv zerscherte und verfaltete Tonmergel-Kalkbank-Abfolge mit einer ausgeprägten lithologisch-strukturellen Heterogenität im Millimeter- bis Dekameterbereich ableiten. Die strukturellen Daten der duktilen Planarstrukturen in der Palfris- und Vitznau-Formation zeigen eine signifikante bevorzugte Einregelung. Die gut abgegrenzten Polverteilungen im Stereogramm sind für lithologisch heterogene und strukturell anisotrope Gesteinskomplexe typisch. Für das Standortmodell Wellenberg und den Wirtgesteinsblock kann daher die Gesteinsmatrix als lithologisch und strukturell anisotrop angesehen werden (Milnes 1999).

Die strukturgeologischen Aufnahmen in den Bohrungen zeigen, dass die tertiären Gesteine der Axen-Decke (Globigerinenmergel und Schimbergschiefer) mit der Palfris-Formation auf mehreren Horizonten verschuppt und komplex verfault bzw. zerschert sind. Eine zuverlässige Aussage über den tieferen Verlauf der tertiären Einheiten an der Stirn der Axen-Decke ist deshalb nicht möglich. Die neuen Profilschnitte im NAB 12-04 Rev.1 zeigen einen mit zunehmender Tiefe weiter nach Norden vorgeschobenen Falten- bzw. Schuppenbau der frontalen Axen-Decke. Ohne zusätzliche Daten kann nach Ansicht des ENSI das Tertiär der Axen-Decke nicht belastbar zur Abschätzung des am Standortgebiet Wellenberg zur Verfügung stehenden Wirtgesteinsvolumens verwendet werden. Das ENSI schätzt die N-S-Ausdehnung der Mergel-Formationen des Helvetikums im Standortgebiet Wellenberg daher als etwas weniger gross ein als die Nagra. Die übrigen von der Nagra abgeleiteten Referenz- und Eckwerte zur räumlichen Ausdehnung sind für das ENSI nachvollziehbar und plausibel.

Mineralogie und Geochemie

Angaben der Nagra

Die mineralogischen Analysen der Mergel-Formationen des Helvetikums liegen in Abbildung 6 typischerweise im Bereich von kalkig-sandigen Tonsteinen, sandigen Ton- und Kalkmergeln, tonigen Kalken bis zu nahezu reinen Kalken. Die Mergel-Formationen sind so stark ineinander verschuppt und verfault, dass sie vereinfacht als einheitliche Abfolge betrachtet werden. Die Mergel, welche die Hauptmasse des Wirtgesteins ausmachen, werden bezüglich des Tonmineralgehalts mit einem Referenzwert von 30 Gew.-% (unterer Eckwert: 10 Gew.-%) beschrieben. Den häufig boudinierten und auseinandergerissenen KBA wird für den Tonmineralgehalt ein Referenzwert von 20 Gew.-% zugeordnet (kein unterer Eckwert).

Beurteilung des ENSI

Die Angaben der Nagra im NTB 14-02-VI wurden durch das ENSI zusammen mit jenen im NAB 11-20 und NAB 12-39 geprüft. Für die Mergel-Formationen des Helvetikums zeigt sich insbesondere aufgrund der beobachteten KBA eine sehr grosse mineralogische Variabilität (NAB 12-39). Der Tonmineralgehalt variiert in der Palfris-Formation zwischen 4 und 57 Gew.-%, der Mittelwert liegt bei 30 %. Die Vitznau-Formation ist kalkreicher und weist entsprechend tiefere Tonmineralgehalte auf. Die tertiären Abfolgen der Axen-Decke (Globigerinenmergel und Schimbergschiefer) sind mit 24 Gew.-% Quarz (Mittelwert) deutlich Quarz-reicher als die Palfris-Formation (NAB 12-39). Der Mittelwert ihres Tonmineralgehaltes ist mit 32 Gew.-% vergleichbar zur Palfris-Formation, so dass sie in ähnlicher Weise zur Barrierenwirkung beitragen. Der mittlere Anteil der Mergel-Formationen des Helvetikums liegt knapp über 30 Gew.-%. Die Spanne des Tonmineralanteils ist damit ähnlich wie in den Effinger Schichten (Abbildung 6). Der Anteil an quellbaren Tonmineralen ist am Wellenberg jedoch deutlich tiefer als in der Nordschweiz. Aufgrund der maximal erreichten Temperatur von 250 °C und der Drücke von 250 MPa (NTB 96-01; Ballentine et al. 1994) ist davon auszugehen, dass der Anteil quellbarer Tonminerale nur noch gering ist.

Das ENSI ist mit den Referenzwerten des Tonmineralgehalts für die KBA und die helvetischen Mergeln und deren oberen und unteren Eckwerten einverstanden.

Porenwasser

Angaben der Nagra

Das Referenzporenwasser wurde als Na-Cl-Referenzporenwasser (NTB 14-02-VI) definiert, gültig für das Innere des Mergelstapels im NAB 09-15 (dem Standort des Tiefenlagers entsprechend). Die Salinität beträgt 0.2 mol/kg (NTB 96-01), Messwerte für pH oder P_{CO_2} stehen keine zur Verfügung. Dieser Ungewissheit wird durch eine tief-pH/hoch- P_{CO_2} - und eine hoch-pH/tief- P_{CO_2} -Variante Rechnung getragen.

Eine hoch-saline Variante mit 0.5 mol/kg Chloridgehalt trägt der Ungewissheit bezüglich der Anionen-zugänglichen Porosität Rechnung (0.12 – 0.3; NTB 14-02-VI; NAB 09-15) und deckt die Ungewissheiten der wenigen analysierten Wasserproben und deren Korrektur wegen Kontamination durch die Bohrspülung ab. Diese Variante beinhaltet auch die obere Bandbreite für den Sulfatgehalt.

Der mögliche Redoxbereich wird mit dem Referenzporenwasser (etwas weniger reduzierend, mit Sulfat, kaum Methan) und einer Variante geringen Redoxpotenzials im Stabilitätsbereich von Sulfid und mit relativ hohem Partialdruck von Methan eingegrenzt (NTB 14-02-VI).

Beurteilung des ENSI

Die Herleitung und Beschreibung der Porenwasserzusammensetzung der Mergel-Formationen des Helvetikums mit den vorhandenen Ungewissheiten sind im NTB 14-02-VI und im NAB 09-15 nachvollziehbar beschrieben. Mit den zusätzlichen Porenwasservarianten deckt die Nagra die mögliche Bandbreite der Porenwasserzusammensetzung ab. Das ENSI ist mit dem eingesetzten Referenzporenwasser und den dazu angegebenen Bandbreiten in der Zusammensetzung einverstanden.

Hydraulische Eigenschaften

Angaben der Nagra

Die Mergel-Formationen des Helvetikums im Gebiet Wellenberg bestehen vereinfacht aus *Mergeln* (MGL) und *Kalkbankabfolgen* (MGL-KBA) und haben in den betrachteten Tiefenlagen eine geringe hydraulische Durchlässigkeit. In den obersten 500 bis 600 m sind die K-Werte aufgrund von Dekompaktionseffekten erhöht, darunter liegen die Messwerte in der Regel unter 10^{-9} m/s. Aufgrund von hydrogeologischen Modellen (konzeptuelles hydrogeologisches Modell NTB 93-28; NTB 96-01), in welchen die beschränkte Verbundenheit der Störungen berücksichtigt wird, ist unterhalb der Dekompaktionszone mit K-Werten $< 10^{-11}$ m/s (Referenzwert $K_{\text{eff}} = 3 \cdot 10^{-13}$ m/s, oberer Eckwert $K_{\text{eff}} = 10^{-11}$ m/s, NTB 14-01) zu rechnen. Alternativ werden zusätzlich hydraulisch wirksame Störungen betrachtet, die zu einem höheren Referenzwert von $K_{\text{eff}} = 10^{-12}$ m/s führen, nicht aber zu einem höheren oberen Eckwert (NTB 14-01). Eine Anisotropie der Durchlässigkeit wurde nicht nachgewiesen (NTB 14-01). Aus den Felddaten gibt es keine Hinweise für ein abweichendes hydraulisches Verhalten der Kalkbankabfolgen (MGL-KBA). Die hydraulischen Durchlässigkeiten und die Transmissivitäten von Störungen in den KBA sind deshalb gleich wie in den Mergeln (NTB 14-02-VI).

Die physikalischen Porositäten wurden mittels der Quecksilber-Injektionsmethode bestimmt (Injektionsdruck 200 MPa; Nagra 1994). In den mergeligen Abfolgen (MGL) beträgt die Bandbreite der Messwerte 0.29 – 3.79 Vol.-% (Mittelwert bei 1.43 Vol.-%, NAB 12-39; NTB 96-01) und bestimmt den Referenzwert von 1.4 Vol.-%. In Anbetracht der Ungewissheiten bzgl. der mittels Quecksilber-Injektionsmethode gemessenen Porositäten wird der obere Eckwert bei 4 Vol.-% festgelegt (NAB 12-39). Der untere Eckwert entspricht dem 5. Perzentil und wird auf 0.3 Vol.-% festgelegt. In den Kalkbankabfolgen (MGL-KBA) wird als Referenzwert, oberer Eckwert und unterer Eckwert 0.3 Vol.-% verwendet.

Das Konzept der geochemischen Porosität resp. des Anionen-zugänglichen Anteils der Porosität war zur Zeit des Untersuchungsprogramms Wellenberg erst in der Anfangsphase. Die derzeitige Datenlage erlaubt keine Erklärung der grossen Bandbreite der Anionen-zugänglichen Porosität ohne neue Probennahme. Der aktuelle Kenntnisstand legt für die mergeligen Abfolgen einen relativen Anteil von 30 % als Referenzwert nahe, resp.

0.4 Vol.-%. Basierend auf den Eckwerten der physikalischen Porosität und diesem relativen Anteil berechnet sich ein unterer Eckwert von 0.1 Vol.-% und ein oberer Eckwert von 1.2 Vol.-%. Durch diesen oberen Eckwert wird beispielsweise die hypothetische Kombination des Referenzwerts der physikalischen Porosität mit einem relativen Anteil der Anionen-zugänglichen Porosität von 80 % abgedeckt (NAB 12-39). Für die Kalkbankabfolgen (MGL-KBA) wird als Referenzwert ebenfalls 0.3 Vol.-% verwendet. Obere und untere Eckwerte werden nicht definiert (NAB 12-39; NTB 14-03).

Beurteilung des ENSI

Die HSK äusserte Vorbehalte hinsichtlich einer fehlenden Vernetzung hydraulisch höher durchlässiger Strukturen am Wellenberg (HSK 30/13), wie sie aus dem damaligen konzeptuellen hydrogeologischen Modell (NTB 93-28) für das Rahmenbewilligungsgesuch abgeleitet wurden. Dennoch kann das im NTB 96-01 dargelegte und auf einem geostatistischen Ansatz beruhende K-Blockmodell, welches in seinem Detaillierungsgrad weit über die Modelle in den anderen Standortgebieten hinausgeht, für Etappe 2 SGT als zweckmässig betrachtet werden. Das ENSI akzeptiert, dass für die grossräumige hydraulische Durchlässigkeit der Mergel-Formationen des Helvetikums der von der Nagra angenommene Referenzwert der kleinräumig geklüfteten Matrix wirksam ist, was auch durch unabhängige Evidenzen (Unterdruckzone, stagnierende saline Porenwässer) unterstützt wird. Unter Berücksichtigung der in den hydraulischen Packertests beobachteten Variabilität der Transmissivitäten einschliesslich der Sondierbohrung SB2, der vorhandenen Fehlerbandbreiten in den Messergebnissen und den noch bestehenden Ungewissheiten in der Strukturaufnahme der Bohrkerne (Milnes 1999) und deren Auswirkungen auf das K-Blockmodell hält das ENSI als oberen Eckwert einen etwas höheren Wert als die Nagra für gerechtfertigt ($K_{\text{eff}} = 5 \cdot 10^{-11}$ m/s, siehe Realisation der K-Verteilungen zwischen den beiden Bohrungen SB3 und SB1 im NTB 96-01). Die Wasserführung in Klüften ist hinsichtlich der Barrierenwirkung gegenüber einem äquivalent-porösen Gefüge nachteilig.

Nach Ansicht des ENSI ist der Gesteinskörper heterogen aufgebaut und durch eine ausgeprägte lithologisch-strukturelle Anisotropie gekennzeichnet (HSK 30/9). Entsprechend ist auch für die hydraulischen Parameter eine ausgeprägte Anisotropie anzunehmen (HSK 30/13) und die Wasserwegsamkeit ist in kompetenten Lagen (Kalk-/Kalkmergelbänke, KBA oder Zonen mit Kalzitadernetzwerken) am grössten (HSK 30/13). Die Annahme isotroper Verhältnisse durch die Nagra kann dennoch toleriert werden, weil die der Auswertung zugrunde liegenden K-Werte jeweils den Maximalwert des Tensors der hydraulischen Durchlässigkeit K_{\parallel} parallel zur lithologisch-strukturellen Anisotropie repräsentieren (konservative Betrachtung) und die Abstände zum nächsten Freisetzungspunkt in die Biosphäre unabhängig von der Raumrichtung 100 m betragen.

Die Annahme, dass die MGL-KBA dieselbe geringe hydraulische Durchlässigkeit besitzen wie die MGL, kann für grossräumige Betrachtungen (Massstab des Tiefenlagers) toleriert werden, weil durch die intensive, tektonische Zerschering keine vollständig innerhalb der MGL-KBA verlaufenden Fließspfade anzunehmen sind und die hydraulische Durchlässigkeit des gesamten Wirtgesteinskörpers daher von den Kalkmergeln geprägt wird. In diesem Sinne ist auch für die Mergel-Formationen des Helvetikums die Forderung 5 aus ENSI 33/1 15 umgesetzt worden.

Die Herleitung der Referenzwerte und unteren Eckwerte für die physikalische Porosität und die Anionen-zugängliche Porosität ist von der Nagra bezüglich der Mergel (MGL) und Kalkbänke (MGL-KBA) nachvollziehbar dargelegt und die vorgeschlagenen Werte sind plausibel. Mit den Messungen mit der Quecksilber-Injektionsmethode kann die physikalische Porosität unterschätzt werden. Das ENSI verwendet daher einen oberen Eckwert von 7 Vol.-% für die physikalische Porosität basierend auf den maximalen Messungen der Pyknometer-Porosität. Für den relativen Anteil der Anionen-zugänglichen Porosität nimmt das ENSI einen oberen Eckwert von 50 % an (entspricht 3.5 Vol.-%), um die im NTB 10-01 angegebenen Bandbreiten mit zu berücksichtigen. Für die Kalkbankabfolgen (MGL-KBA) ist das ENSI mit der konservativen Betrachtung eines einheitlichen Werts von 0.3 als Referenz-, oberer und unterer Eckwert einverstanden.

3.2 Geologische Konzeptualisierung

Angaben der Nagra

Für die Festlegung der Eingabeparameter für die Dosisberechnungen verwendet die Nagra vereinfachte geologische Modellkonzepte für den Radionuklidtransport, in welchen der lithologische Aufbau, die tektonisch-strukturellen Elemente und die kombinierte Wirkung dieser Elemente berücksichtigt werden und mit denen die vorhandenen Ungewissheiten bezüglich des Radionuklidtransports ausgewiesen werden. Der potenziell einschlusswirksame Gebirgsbereich (Wirt- und Rahmengesteine) wird dazu in verschiedene lithofazielle Einheiten mit unterschiedlichen Radionuklidrückhaltevermögen bzw. Selbstabdichtungsvermögen gegliedert (NTB 14-02-VI).

Die Konzeptualisierung der lithofaziellen Einheiten erfolgt schrittweise. Für die Standortgebiete in der Nordschweiz werden in einem ersten Schritt die lithostratigraphischen und bohrlochgeophysikalischen Logs im Umfeld der Standortgebiete zusammengestellt. Ausgehend von diesen Aufnahmen werden schematische stratigraphisch-hydrogeologische Sammelprofile und vereinfachte geologische Modellkonzepte erstellt. Zusätzlich fließen Erkenntnisse aus der seismischen Faziesanalyse ein. Die geologische Konzeptualisierung orientiert sich in der Regel am stärksten am Befund der nächst gelegenen Tiefbohrung. Die Konzeptualisierung für das Standortgebiet Nördlich Lägern basiert hauptsächlich auf der Bohrung Weiach, es wurden zusätzlich auch Befunde weiterer Bohrungen und von Oberflächenaufschlüssen berücksichtigt, um der lateralen Variabilität gerecht zu werden. Für den 'Braunen Dogger' wurde im Standortgebiet Nördlich Lägern zusätzlich ein alternatives geologisches Konzeptprofil entwickelt, da im westlichen Teil dieses Gebietes noch Ausläufer der Passwang-Formation und im östlichen Teil aufgrund einer reflexionsseismischen Analyse auch mächtige sandig-kalkige Einheiten auftreten könnten. In einem letzten Schritt wurden schliesslich aus den geologischen Konzeptprofilen Modellkonzepte für die Dosisberechnungen hergeleitet (NTB 14-02-VI).

Diese Konzeptprofile stellen nur schematisch eine mögliche Sedimentabfolge dar, so kann z. B. die Lage und Ausbildung der Sandkalkabfolgen im 'Braunen Dogger' und in der Passwang-Formation vertikal stark variieren. Unterschiede in der Mächtigkeit und Zusammensetzung der lithofaziellen Einheiten werden als Parameterungewissheiten betrachtet und in den Dosisberechnungen mit einer Parametervariation berücksichtigt. Aufgrund der Erfahrungen betreffend die Abhängigkeit der hydraulischen Eigenschaften der Gesteine vom Tonmineralgehalt werden die lithofaziellen Einheiten für die Modellkonzepte des Radionuklidtransports in drei Kategorien eingeteilt (NTB 14-01) (Abbildung 7 und Abbildung 8):

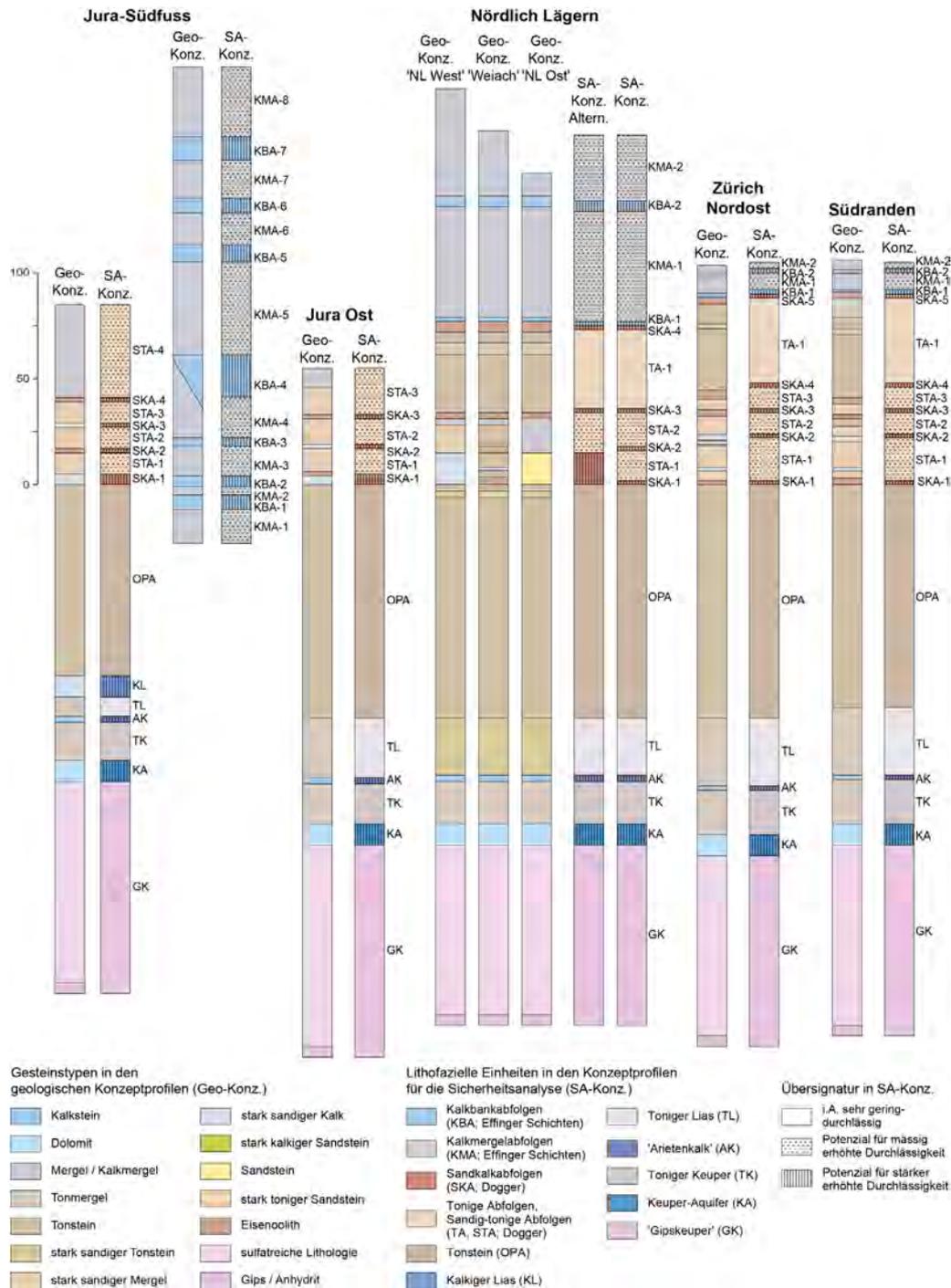


Abbildung 7: Geologische Konzeptprofile und Konzeptprofile für die provisorischen Sicherheitsanalysen (SA) und den sicherheitstechnischen Vergleich für die Standortgebiete in der Nordschweiz (Fig. 4.3-7 aus NTB 14-02-VI).

- 1) Lithofazielle Einheit mit durchschnittlichen Tonmineralgehalten > 40 Gew.-% mit hohem Selbstabdichtungsvermögen sind im Allgemeinen sehr gering durchlässig. Zu diesen Einheiten gehören der Opalinuston (OPA), die tonreichen Abfolgen im 'Braunen Dogger' (TA-1), der Tonige Lias (TL), der Keuper (TK) und Gipskeuper (GK).
- 2) Lithofazielle Einheit mit durchschnittlichen Tonmineralgehalten im Bereich von 20 – 40 Gew.-% mit mässig gutem Selbstabdichtungsvermögen haben ein Potenzial für eine mässig erhöhte Durchlässigkeit. Zu diesen Einheiten gehören die Kalkmergelabfolgen in den Effinger Schichten (KMA), die sandig-tonigen Abfolgen im 'Braunen Dogger' (STA) und die Mergel-Formationen des Helvetikums (MGL, ohne Kalkbankabfolgen).

- 3) Lithofazielle Einheit mit durchschnittlichen Tonmineralgehalten < 20 Gew.-% und geringem Selbstabdichtungsvermögen («harte Bänke») haben ein Potenzial für eine stärker erhöhte Durchlässigkeit. Zu den harten Bänken gehören die Kalkbankabfolgen in den Effinger Schichten (KBA), die Sandkalkabfolgen im 'Braunen Dogger' (SKA), der kalkige Lias (KL), der Arietenkalk (AK) und der Keuper-Aquifer (KA) sowie die Kalkbankabfolgen in den Mergel-Formationen des Helvetikums (KBA, MGL).

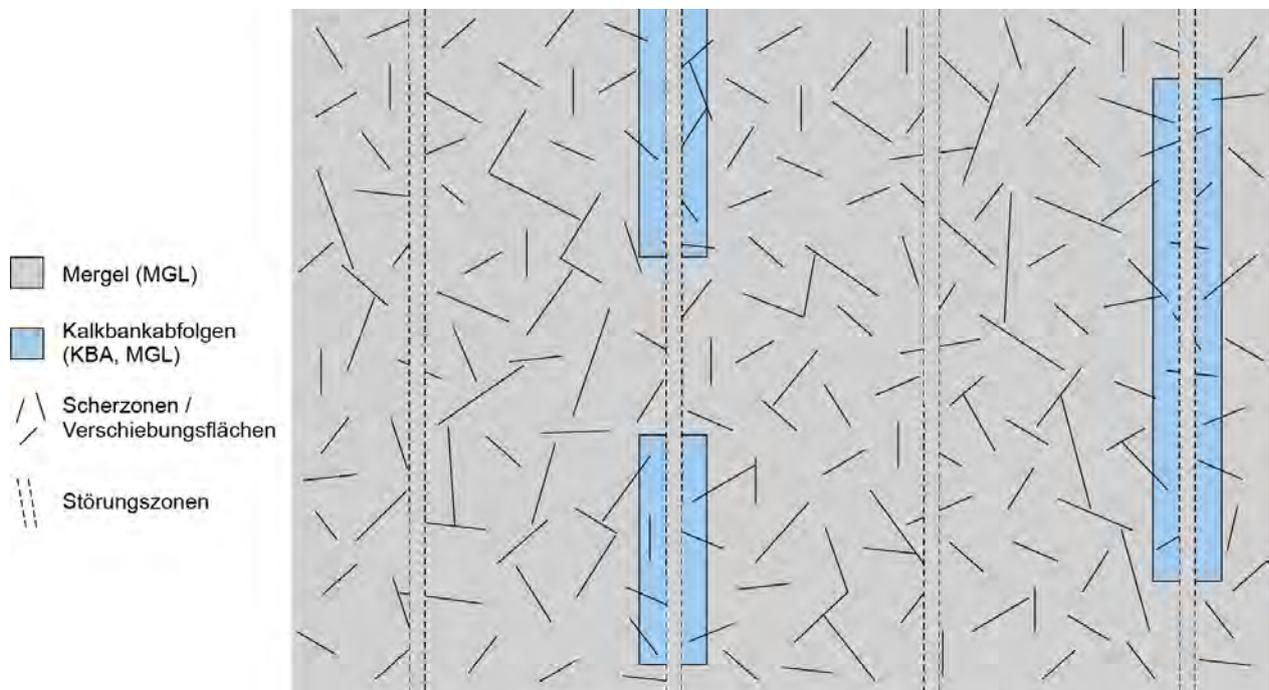


Abbildung 8: Geologisches Konzeptbild für den einschlusswirksamen Gebirgsbereich im Standortgebiet Wellenberg (Fig. 4.3-8 aus NTB 14-02-VI).

Für die Barrierenwirkung der Wirt- und Rahmengesteine stellen die hydrogeologischen Eigenschaften der «harten Bänke» die massgebende konzeptuelle Ungewissheit dar (NTB 14-01). Für diese kann nicht ausgeschlossen werden, dass sie eine erhöhte Wasserführung aufweisen und deshalb als laterale Transportpfade zu einer verringerten Barrierenwirkung der Wirt- bzw. Rahmengesteine führen (NTB 14-01). Die Nagra hat mittels Sensitivitätsanalysen untersucht, ob sich die Bewertung selber bzw. die Reihenfolge der Bewertungen ändert, wenn für die Wirtgesteine bzw. Rahmengesteine eine andere Annahme zum Einfluss der «harten Bänke» auf die Barrierenwirkung des gesamten einschlusswirksamen Gebirgsbereichs (alternative Konzeptualisierungen) getroffen wird (NTB 14-01) (vgl. Kapitel 3.3).

Bei direkt an das Wirtgestein angrenzenden oder im Wirtgestein vorhandenen «harten Bänken» wird als «massgebender Fall» für die Dosisberechnungen eine Konzeptualisierung mit hydrogeologischen Parametern gewählt, bei der die «harten Bänke» wegen ihrer erhöhten lateralen Wasserführung einen ungünstigen Einfluss auf die Barrierenwirkung des Wirtgesteins und der Rahmengesteine haben und verhindern, dass das ganze Wirtgestein bzw. die Rahmengesteine barriierenwirksam sind. Diese Konzeptualisierung wird gewählt, da auch mit zusätzlichen Untersuchungen die Ungewissheiten bezüglich der hydraulischen Eigenschaften der «harten Bänke» nicht absolut zuverlässig reduzierbar sind und deshalb die Bedeutung dieser Situation für die Sicherheit erfasst werden soll (NTB 14-01).

Bei der *qualitativen Bewertung* der 13 Kriterien zu Sicherheit und technischer Machbarkeit (BFE 2011b) und der dazu notwendigen Charakterisierung wird wie bei den Dosisberechnungen die Wirkung der

«harten Bänke» berücksichtigt, wobei das Bewertungsobjekt unterschiedlich sein kann: Wirtgestein sensu stricto (WG-ss), Wirtgestein als ganzes (sensu lato) und einschlusswirksamer Gebirgsbereich (ganzes Wirtgestein einschliesslich der barrierenwirksamen oberen und unteren Rahmengesteine) (NTB 14-01).

Der Lias wird von der Nagra im massgebenden Fall für die Einengung nicht als barrierenwirksam angesehen. Die Nagra unterscheidet für die Sedimente des Lias drei konzeptuelle geologische Einheiten und ordnet diese entsprechend ihrem Tonmineralgehalt den drei Kategorien (siehe oben) zu.

Für den *Tonigen Lias* (TL) lassen die typischen Tonmineralgehalte von 40 Gew.-% auf ein bedeutendes Selbstabdichtungsvermögen schliessen (NTB 14-02-VI). Er wird der Kategorie 1 (Tonmineralgehalte > 40 Gew.-%) zugeordnet (keine Übersignatur im NTB 14-01; NTB 14-01). Der *Kalkige Lias* (KL) und der *Arietenkalk* (AK) werden als «harte Bänke» mit geringem Selbstabdichtungsvermögen bezeichnet (NTB 14-01) und als mögliche, lokal wasserführende Einheiten der Kategorie 3 (Tonmineralgehalte < 20 Gew.-%) zugeordnet. Der Kalkige Lias wird aufgrund der räumlichen Faziesverteilung nur im Standortgebiet Jura-Südfuss angetroffen, während der Arietenkalk in allen Nordschweizer Standortgebieten vorkommt.

Bei den Mergel-Formationen des Helvetikums (Standortgebiet Wellenberg, Abbildung 8) zieht die Nagra als wasserführende Systeme in erster Linie spröde Strukturen in Betracht (Klüfte bzw. Verschiebungsflächen, Störungen, kleinräumige Scherzonen). Im massgebenden Fall für die Einengung geht die Nagra davon aus, dass die Barrierenwirkung der Mergel-Formationen voll zum Tragen kommt. Da nicht ausgeschlossen werden kann, dass ein bedeutender Teil des Freisetzungspfades (bis zu 80 %) entlang von KBA mit drusigen, mit Calcit belegten offenen Klüften mit viel geringerer Barrierenwirkung erfolgt, verkürzt die Nagra in einem Rechenfall den Transportpfad im Mergel entsprechend von 100 m auf 20 m, um auch diesen Fall abzudecken.

Beurteilung des ENSI

Das Vorgehen der Nagra, schrittweise von lithostratigraphischen und bohrlochgeophysikalischen Daten zu geologischen Konzeptprofilen zu gelangen, ist für das ENSI nachvollziehbar. Den Ansatz, die Barrierenwirkung der untersuchten Wirtgesteine anhand der lithologischen Beschaffenheit und insbesondere des Tonmineralgehalts in Form dreier lithofazieller Einheiten zu klassieren, beurteilt das ENSI als zweckmässig. Internationale Erfahrungen zeigen, dass Gesteine mit hohem Tonmineralgehalt (> 40 Gew.-%) gute Barriereigenschaften aufweisen (geringe Permeabilität, plastisches Verformungsverhalten, hohes Sorptions- und Selbstabdichtungsvermögen, vgl. Dewhurst et al. 1999; Fisher und Knipe 2001; NEA 2010; NAB 13-06. Mit abnehmendem Tonmineralgehalt gehen diese Eigenschaften schrittweise verloren. Bei den Tonmineralgehaltsbestimmungen stützt sich die Nagra auf kontinuierliche, mit geophysikalischen Methoden in Bohrungen ermittelte Tonmineralgehaltsprofile sowie auf punktuell erhobene Laboranalysen an Gesteinsproben (Bohrkerne, Cuttings, Aufschlüsse) ab (NAB 14-59; NTB 14-02-VI).

Mit der Konzeptualisierung der lithofaziellen Einheiten und der Erfassung der sogenannten «harten Bänke» (SKA, KBA) hat die Nagra gegenüber Etappe 1 SGT ein zusätzliches geologisches Konzept für die Bewertung der Wirt- bzw. Rahmengesteine 'Brauner Dogger', Effinger Schichten und Mergel-Formationen des Helvetikums eingeführt. Aufgrund der grossen Bedeutung dieses Konzepts für die sicherheitstechnische Bewertung und den Vergleich der geologischen Standortgebiete hat das ENSI die zugrunde liegenden Daten und Überlegungen eingehend geprüft (Kapitel 3.1).

Im Detail hat das ENSI das Inventar an «harten Bänken» in den beiden Nagra-Bohrungen Benken und Weiach und die Zuordnung der lithofaziellen Einheiten zu den Tonmineralgehaltskategorien (siehe oben) anhand der bohrlochgeophysikalischen Primärdaten (Schlumberger-Logs) überprüft. Es zeigte sich dabei, dass alle von der Nagra im 'Braunen Dogger' erfassten «harten Bänke» (NAB 12-51) mit den drei Schlumberger-Messverfahren natürliche Gammastrahlung SGR/GR, elektrischer Widerstand LLD und Sonic-Log gut identifiziert werden können. Auch das Litho-Density-Log ermöglicht eine klare Identifikation der «harten Bänke».

Für die konzeptuelle Zuordnung der «harten Bänke» zu den Sandkalkabfolgen (SKA) sowie für die Klassierung der sandig-tonigen Abfolgen (STA) und der tonigen Abfolge (TA) des 'Braunen Doggers' stützt sich die Nagra auf die Tonmineralgehaltsbestimmungen der Bohrungen Benken bzw. Weiach ab. Zusätzlich berücksichtigt sie

Befunde aus weiteren Bohrungen (u. a. Schlattigen-1) und Laboranalysen an Gesteinsproben angrenzender Aufschlüsse, um die laterale Variation dieser Abfolgen einbeziehen zu können. Unter Berücksichtigung dieses Vorgehens kann das ENSI die von der Nagra vorgenommene Konzeptualisierung des 'Braunen Doggers' in «harte Bänke» (SKA), STA und TA-1 (WG-ss) für die Sicherheitsbetrachtungen der Standortgebiete Zürich Nordost und Nördlich Lägern grundsätzlich nachvollziehen. Bei den eisenoolithischen Horizonten zeigt sich in beiden Gebieten, dass der Tonmineralgehalt stark variieren kann (ENSI 33/462) und diese Bänke nicht alle den SKA, sondern teils auch den STA zuzuordnen sind. Da sich die Sandkalkbänke von den eisenoolithischen Horizonten bezüglich ihrer sedimentären Entstehung, ihrer stofflichen Beschaffenheit, ihrer räumlichen Ausdehnung und Geometrie deutlich unterscheiden (Kapitel 3.1.2), sind diese beiden Gesteinstypen bei einer Weiterführung der Arbeiten getrennt zu konzeptualisieren.

Die Überprüfung des ENSI ergab ferner, dass innerhalb der 37 m (Weiach) bzw. 40 m (Benken) mächtigen tonreichen Abschnitte TA-1 des 'Braunen Doggers' der Bohrungen Weiach bzw. Benken vier bzw. elf 15 bis 60 cm mächtige Bänke mit Tonmineralgehalten < 40 Gew.-% auftreten, die einzeln betrachtet den STA zuzuordnen wären. Diese Heterogenitäten in der tonigen Abfolge TA-1 sind in den beiden schematischen stratigraphisch-hydrogeologischen Sammelprofilen (NTB 14-03) und den beiden Konzeptprofilen (NTB 14-03) der Standortgebiete Nördlich Lägern und Zürich Nordost von der Nagra nicht abgebildet, wurden aber bei den Dosisberechnungen mit einer vereinfachten Parametervariation untersucht (NAB 14-36) (vgl. Kapitel 3.3).

Für die «harten Bänke» ist die Erkenntnis wesentlich, dass innerhalb des Wirtgesteins 'Brauner Dogger' mehrere lateral durchziehende, über einige hundert Meter bis viele Kilometer ausgedehnte lithofazielle Einheiten mit gegenüber den tonreichen Abfolgen geringerem Tongehalt bzw. geringerer Barrierenwirkung nicht ausgeschlossen werden können und für die Effinger Schichten sogar angenommen werden müssen (u. a. Gerstenhübel-Schichten). Das ENSI kommt wie die Nagra zum Schluss, dass die Ungewissheiten bezüglich der Wasserführung in den «harten Bänken» des 'Braunen Doggers' ebenso wie in den Effinger Schichten auch durch aufwändige zusätzliche Untersuchungen (Bohrungen, 3D-Seismik, Felslabor vor Ort etc.) nicht genügend zuverlässig reduziert werden können. Damit kann ihnen eine signifikante Barrierenwirkung nicht belastbar unterstellt werden. Die Wahl der Nagra, «harte Bänke» innerhalb der Nordschweizer Sedimentgesteine im massgebenden Fall der Einengung als Freisetzungspunkt in die Biosphäre zu betrachten, stellt aus Sicht des ENSI mit Blick auf den Langzeitsicherheitsnachweis eine akzeptable Vereinfachung dar. Mit der vorgenommenen Konzeptualisierung hat die Nagra die Forderungen 6, 8 und 40 aus ENSI 33/115 für den 'Braunen Dogger' erfüllt.

Für die Berechnung der Dosisintervalle hat die Konzeptualisierung erhebliche Konsequenzen. Auch das ENSI sieht die «harten Bänke» im Referenzfall innerhalb des 'Braunen Doggers' als barrierenwirksam an. Darauf deuten die Ergebnisse hydraulischer Tests, welche die «harten Bänke» teilweise einschliessen, und die Tracer-Profile der Bohrungen Benken hin (für die Bohrung Weiach fehlen entsprechende Evidenzen aus den Tracerprofilen). Das Standortgebiet Zürich Nordost ist zudem tektonisch kaum überprägt. Im massgebenden Fall für die Einengung wird jedoch auch seitens ENSI die nicht ausschliessbare Situation angenommen, dass die vorhandenen «harte Bänke» nicht barrierenwirksam sind.

Im Standortgebiet Nördlich Lägern, wo die tektonische Überprägung stärker ist (Vorfaltenzone), kann in den «harten Bänken» eine Reduktion der Barrierenwirksamkeit wegen allfälliger Klüftung nicht ausgeschlossen werden. Innerhalb der Effinger Schichten und der Mergel-Formationen des Helvetikums werden die «harten Bänke» bzw. KBA auch im Referenzfall von der Nagra wie auch vom ENSI als nicht barrierenwirksam angesehen. Für beide Standortgebiete Jura-Südfuss und Wellenberg sind aufgrund der geologischen Situation (Nähe zur Born-Engelberg-Struktur und zur Schönenwerd-Eppenberg-Struktur im Standortgebiet Jura-Südfuss bzw. Lage im helvetischen Deckenstapel im Standortgebiet Wellenberg) tektonisch-strukturelle Elemente zu erwarten, welche die Barrierenwirksamkeit der «harten Bänke» stark einschränken. Zusätzlich können Lösungsprozesse in den kalkreichen Schichten die hydraulische Durchlässigkeit erhöhen (ENSI 33/472).

Für die Effinger Schichten und die Mergel-Formationen des Helvetikums ist das ENSI aufgrund seiner Beurteilungen in Kapitel 3.1 mit der Zuordnung zu den Kategorien 2 und 3 einverstanden. Die Kategorisierung deckt sich mit den Beobachtungen aus Bohrungen und Geländeaufschlüssen (für das ENSI ist damit die Forderung 40 aus ENSI 33/115 für die Effinger Schichten erfüllt). Auch in den Mergel-Formationen des Helvetikums wurden entsprechende KBA nachgewiesen.

Das ENSI geht in seiner Bewertung (mFE) konsequent davon aus, dass die «harten Bänke» innerhalb der Nordschweizer Sedimentgesteine als potenzielle Freisetzungspunkte in die Biosphäre anzusehen sind.

Der Tonige Lias bildet in den Standortgebieten Jura Ost, Zürich Nordost und Nördlich Lägern das untere Rahmengestein des Opalinustons, welches die Nagra im mFE trotz der hohen Tonmineralgehalte und der hydraulischen Analogie zum Opalinuston nicht als barrierenwirksam ansieht (mit Ausnahme des Indikators 5 «Mächtigkeit»). Das ENSI hat diese Annahme geprüft und dazu die Möglichkeit betrachtet, das Wirtgestein Opalinuston um die Abfolge des Tonigen Lias zu erweitern (Opalinus sensu lato, OPA-sl). Die Bohrloch-Logs (Benken, Weiach) rechtfertigen nach Ansicht des ENSI für den östlichen Faziesbereich eine weitere Unterteilung des Tonigen Lias in einen oberen Tonigen Lias mit Tonmineralgehalten von 20 bis 37 Gew.-% und einen unteren Tonigen Lias mit Tonmineralgehalten zwischen 50 und 60 Gew.-% (NAB 14-95). Der obere, an den Opalinuston unmittelbar angrenzende Teil wäre damit am ehesten mit den STA des 'Braunen Doggers' vergleichbar, weist jedoch höhere Karbonatgehalte bis 75 Gew.-% auf. Aufgrund dieser Überlegungen kann das ENSI der Konzeptualisierung zustimmen, den Tonigen Lias ausser bei der Bewertung des Indikators 5 «Mächtigkeit» (Kapitel 6.1.1) im mFE nicht als barrierenwirksam zu betrachten. Das ENSI erwartet von der Nagra im Rahmen der Untersuchungen zu Etappe 3 SGT eine vertiefte mineralogische und fazielle Charakterisierung des Tonigen Lias, um die Wirtgesteinsoption OPA-sl auf mögliche standortgebietspezifische Optimierungsmöglichkeiten hin zu testen (z. B. Anordnung der Lagerkammern in der Mitte des OPA-sl statt in der Mitte des OPA zur optimalen Nutzung des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs).

3.3 Modellkonzepte für die Radionuklidausbreitung

3.3.1 Konzeptualisierung für die Radionuklidausbreitung

Angaben der Nagra

Die Modellberechnungen der Nagra für die Ermittlung der charakteristischen Dosisintervalle betrachten eine diffusive und advective Radionuklidfreisetzung unter der Annahme von funktionierenden technischen Barrieren. Eine Radionuklidfreisetzung entlang von untertägigen Bauwerksstrukturen wurde für diese Art der Berechnungen nicht betrachtet, jedoch im Rahmen von Robustheitsprüfungen untersucht (NTB 14-09). Die Modelldomäne wird in das Nahfeld und die Geosphäre unterteilt. Die Biosphäre, die keinen Teil des Barrierensystems darstellt, wird in separaten, unabhängigen Modellen behandelt (Kapitel 2.8). Das Vorgehen der Nagra bei der Modellierung der Nahfeldfreisetzung, welche den Quellterm für die Radionuklidausbreitung in der Geosphäre bildet, wurde bereits in Kapitel 2.3 vorgestellt.

Für die Modellkonzepte des Radionuklidtransports im einschlusswirksamen Gebirgsbereich legt die Nagra zunächst den Typ der Lagerkammern sowie deren Lage innerhalb des Wirtgesteins im Hinblick auf eine optimale Barrierenwirkung des Wirtgesteins fest (NTB 14-03). Da die Richtung der Wasserflüsse im einschlusswirksamen Gebirgsbereich über die langen Betrachtungszeiträume mit nichtreduzierbaren Ungewissheiten behaftet ist, erfolgt die Anordnung der Lagerkammern im Wirtgestein unabhängig davon. Für die geologischen Standortgebiete der Nordschweiz hat dies eine vertikal mittige Anordnung innerhalb der mächtigsten tonreichen lithofaziellen Einheit im Wirtgestein zur Folge (NTB 14-03). Im geologischen Standortgebiet Wellenberg bietet die räumlich erheblich ausgedehnte Wirtgesteinsakkumulation grosse räumliche Flexibilität für die Anordnung der Lagerkammern. Daher ist hier lediglich der Sicherheitsabstand zu anordnungsbestimmenden Elementen zu beachten.

Neben der Anordnung der Lagerkammern ist die Festlegung der Freisetzungspfade unter Berücksichtigung des Spektrums möglicher geologischer Situationen ein wichtiges Element des Modellkonzepts (Kapitel 2.3). Ausgehend von der Lagerkammer enden die Freisetzungspfade in Freisetzungspunkten am oberen Ende des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs, der sich aus der betrachteten geologischen Situation ergibt (Abbildung 9).

Unter dem Begriff «geologische Situation» werden der sedimentäre Aufbau der Wirt- und Rahmengesteine, allfällige tektonisch-strukturelle Elemente und die resultierenden hydrogeologischen Verhältnisse im Hinblick auf den Transport von gelösten Radionukliden verstanden. Von besonderer Bedeutung ist dabei die Beurteilung der hydraulischen Wirkung von lithofaziellen Einheiten mit geringem Tonmineralgehalt («harte Bänke»),

wodurch bei ausreichender Wasserführung entlang von tektonisch-strukturellen Elementen wie Störungen oder Klüften das Rückhaltevermögen des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs reduziert ist (NTB 14-03). Am Ende eines Transportpfades wird eine instantane Freisetzung in die Biosphäre angenommen, wobei allfällige weitere Rahmengesteine nicht berücksichtigt werden.

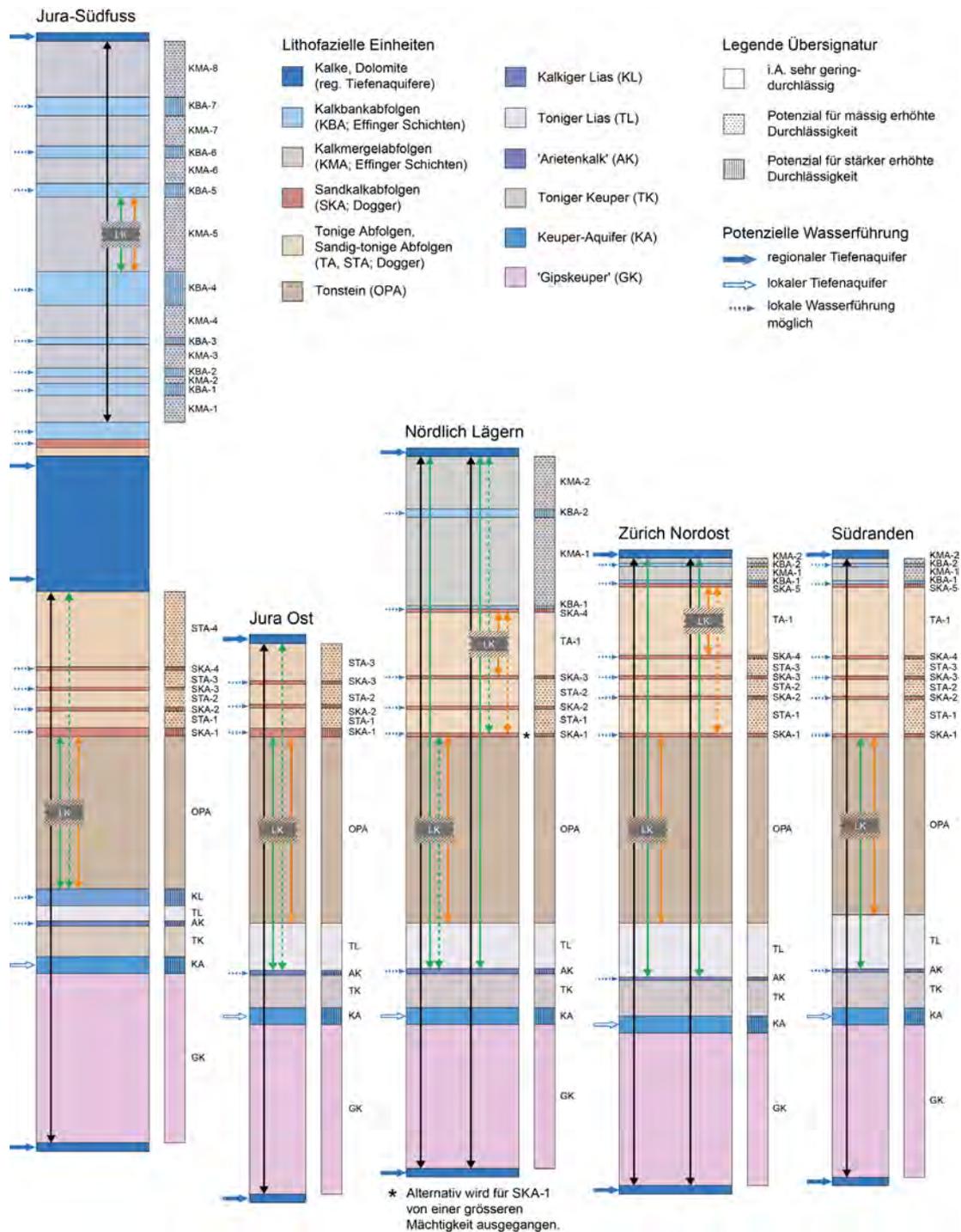


Abbildung 9: Geologische Konzeptbilder der Gesteinsprofile für die Standortgebiete in der Nordschweiz mit den die Barrierenwirkung potenziell beeinflussenden «harten Bänken». LK: Lagerkammer. Die Bedeutung der vertikalen Doppelpfeile ist im Text erklärt (Fig. 4.2-1 aus NTB 14-03).

Die Nagra erfasst im Rahmen der provisorischen Sicherheitsanalysen und des sicherheitstechnischen Vergleichs das Spektrum an möglichen Situationen in der Regel mit drei Situationen:

- Referenzsituation (grüne Pfeile in Abbildung 9), welche die aufgrund der Erfahrungsbasis plausibelste Situation darstellt.
- Ungünstige Situation (orange Pfeile in Abbildung 9), welche eine Situation widerspiegelt, die aufgrund einzelner Evidenzen oder allgemeiner lithologischer Überlegungen nicht auszuschliessen ist und die auch nach zusätzlichen Untersuchungen im Zuge der Lagerrealisierung voraussichtlich nicht ausgeschlossen werden kann.
- Günstige Situation (schwarze Pfeile in Abbildung 9), welche eine Situation widerspiegelt, die aufgrund einzelner Evidenzen auch vorliegen kann.

Alternative Referenz- bzw. ungünstige Situationen, welche die Nagra betrachtet hat, sind in Abbildung 9 durch gestrichelte Linien der entsprechenden Farbe dargestellt. Neben der Konzeptualisierung verschiedener geologischer Situationen wurden auch die gemäss ENSI 33/075 geforderten Parametervariationen durchgeführt (Kapitel 5.2). Zusätzlich zu diesen Parametervariationen hat die Nagra jeweils einen massgebenden Fall für die Einengung (mFE) betrachtet. Dieser beruht auf der ungünstigen geologischen Situation und berücksichtigt insbesondere die Anwesenheit von potenziell hydraulisch wirksamen lithofaziellen Einheiten mit geringem Tonmineralgehalt («harte Bänke»), wodurch die Ausdehnung und/oder das Rückhaltevermögen des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs reduziert werden kann. Die Resultate des mFE hat die Nagra für die Ermittlung der charakteristischen Dosisintervalle herangezogen.

Die Nagra verwendet für ihre Geosphärenmodellierung das Rechenprogramm PICNIC-TD 1.4 (NTB 14-09), welches den Radionuklidtransport entlang eindimensionaler Transportpfade in homogen-porösen Medien oder diskreten wasserführenden Strukturen (Klüfte, Störungen) berechnet. Im letzteren Fall kann auch ein möglicher diffusiver Austausch der Radionuklide mit der umgebenden Gesteinsmatrix berücksichtigt werden. Ferner wird die Sorption der Radionuklide an den Festphasen sowie der radioaktiven Zerfall und Aufbau von Radionukliden berücksichtigt (NTB 14-09).

In den Modellen der Nagra wird die Geosphäre als vertikale Abfolge von horizontal gelagerten, wassergesättigten Gesteinseinheiten modelliert. Eine Gesteinseinheit wird dabei als homogene Einheit modelliert, wobei auch anisotrope Fliess- und Transporteigenschaften berücksichtigt werden können. Wechsellagerungen von zwei oder mehreren unterschiedlich parametrisierten Gesteinseinheiten modelliert die Nagra nicht explizit. Stattdessen werden die jeweils gleich parametrisierten Einheiten zu einem Transportpfad zusammengefasst, so dass dessen Länge dem Mächtigkeitsanteil dieser Einheit an der Gesamtmächtigkeit der Wechsellagerung entspricht. Dabei hat die Reihenfolge dieser Transportpfade im Modell nur eine untergeordnete Bedeutung (NTB 14-03).

Der grossräumige Wasserfluss durch die Geosphäre wird in den Geosphärenmodellen eindimensional und vertikal angenommen, wobei er nach oben oder nach unten gerichtet sein kann. Bestimmende Grössen für den Wasserfluss sind die hydraulische Durchlässigkeit der geringdurchlässigsten Schicht in der betrachteten Gesteinsabfolge sowie der hydraulische Gradient. Ebenso erfolgt in den Modellen der Radionuklidtransport eindimensional und vertikal, jedoch sowohl nach oben als auch nach unten (NTB 14-03). Fallweise wird zusätzlich eine laterale Wasserführung in lithofaziellen Einheiten entlang tektonisch-struktureller Elemente betrachtet.

Für SMA wie auch LMA wird angenommen, dass die Radionuklide nach 100 Jahren homogen verteilt und vollständig in gelöster bzw. sorbierter Form in der Lagerkammer vorliegen. Eine allfällige Barrierenwirkung der Abfallmatrix, der Abfallbehälter und der Endlagerbehälter wird dabei vernachlässigt. Lediglich für das in ausgewählten aktivierten metallischen Komponenten vorhandene ^{14}C ($^{14}\text{C}_{\text{org-c}}$) wird eine konstante Freisetzungsrates kongruent zur Auflösung der Abfallmatrix angenommen.

Für den Endlagerbehälter für Brennelemente (BE) und HAA wird eine (Auslegungs-)Lebensdauer von 10 000 Jahren vorausgesetzt. Die Radionuklidfreisetzung wird nach Behälterversagen durch die langsame Matrixauflösung und elementspezifischen Löslichkeitslimiten bestimmt.

Beurteilung des ENSI

Das ENSI kann die Modellkonzepte der Nagra für die Radionuklidenausbreitung nachvollziehen. Zudem hat das ENSI eigene Modellkonzepte verwendet, um die Robustheit der vorgeschlagenen Konzepte zu prüfen, und diese in eigene numerische Modelle umgesetzt. Alle Konzepte berücksichtigen einen diffusiven und advektiven Radionuklidtransport in der Geosphäre. Hält das ENSI für einzelne Parameter andere Werte als die Nagra für plausibel, so ist dies im jeweiligen Kapitel dargelegt (Kapitel 3.1, 3.3.3 und 3.3.4).

Im Gegensatz zur Nagra hat das ENSI seine Berechnungen mit zweidimensionalen Modellen durchgeführt und dazu das Rechenprogramm COMSOL Multiphysics® eingesetzt. Die Verwendung von unterschiedlichen Rechenprogrammen sowie der Unterschied zwischen ein- und zweidimensionalen Transportmodellen können, bei sonst gleicher Parametrisierung und gleichen Randbedingungen, geringfügige Abweichungen in den Ergebnissen zur Folge haben. Der Einsatz unterschiedlicher Rechenprogramme ermöglicht dem ENSI eine unabhängige Prüfung der Modellergebnisse. Signifikante Abweichungen, die allenfalls numerisch oder konzeptionell bedingt sind, können auf diese Art identifiziert werden.

Wirtgesteine, in denen diskrete wasserführende Elemente (Klüfte oder Störungen) angenommen werden (Mergel-Formationen des Helvetikums und Effinger Schichten), hat das ENSI vereinfachend als homogen-poröse Medien mit äquivalenten Parametern, die aus den Eigenschaften der intakten Gesteinsmatrix und der Klüfte berechnet wurden, modelliert. Für die betrachteten Rechenfälle hat diese Vereinfachung keinen grossen Einfluss auf die Resultate.

Das ENSI beurteilt das Modellkonzept der Nagra für die Referenzsituation und den mFE als nachvollziehbar. Die Nagra hat die unteren Rahmengesteine in den Modellkonzepten für Referenzsituationen berücksichtigt, sofern diese als Teil des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs betrachtet werden können. Damit hat die Nagra die Forderung 39 (Berücksichtigung der unteren Rahmengesteine) nach Ansicht des ENSI erfüllt. Die Vorgehensweise der Nagra, im mFE die hydraulische Wirkung lithofazieller Einheiten mit geringem Tongehalt («harte Bänke») zu berücksichtigen, hat das ENSI mit eigenen Berechnungen überprüft. Darauf basierend erachtet das ENSI es als plausibel und zielführend, im mFE einen potenziellen Freisetzungspunkt an der jeweils ersten lithofaziellen Einheit mit geringem Tongehalt und möglicher hydraulischer Wirkung («harte Bank») zu betrachten. Damit wird den Ungewissheiten Rechnung getragen, welche die «harten Bänke» als potenzielle Wasserfliesspfade haben und die auch mit zusätzlichen Untersuchungen nicht ausgeräumt werden können. Für den mFE wird daher die Forderung 39 hinfällig. Die von der Nagra ausgewiesenen günstigen geologischen Situationen sind für die Ermittlung der charakteristischen Dosisintervalle nicht relevant.

Bei den Konzeptualisierungen für die Radionuklidenausbreitung untersucht die Nagra auch die potenzielle Wasserführung des Wedelsandsteins, des Arietenkalks und der Stubensandstein-Formation als mögliche laterale Exfiltrationspfade. Damit erfüllt sie die in ENSI 33/115 gestellten Forderungen 16, 17, 18 und 24. Ebenfalls hat die Nagra Berechnungen angestellt, um die sicherheitsrelevanten Auswirkungen der möglichen Anordnung von SMA-Lagerkavernen in den Wirtgesteinen 'Brauner Dogger' und Effinger Schichten zu untersuchen. Damit wurde Forderung 41 erfüllt.

Die Modellkonzepte der Nagra sind geeignet, um die Dosisberechnungen vornehmen zu können. Die Beurteilung der verwendeten Parameter erfolgt in den Kapiteln 2.3, 3.1, 3.3.2, 3.3.3 sowie 3.3.4. Die aus den Modellberechnungen resultierenden charakteristischen Dosisintervalle werden in Kapitel 5.2 dieses Gutachtens beurteilt.

3.3.2 Temperatur in Wirt- und Rahmengesteinen

Die Umgebungstemperatur spielt für viele chemische Prozesse eine grosse Rolle. Mit steigenden Temperaturen steigt in vielen Fällen die Reaktivität der beteiligten Stoffe, so dass diese chemischen Reaktionen schneller ablaufen. Dies ist z. B. relevant für die Diffusion.

Angaben der Nagra

Aufgrund der variierenden Tiefe der Wirtgesteine definiert die Nagra einen wirtgesteinsspezifischen in situ Temperaturbereich (NTB 12-03), welcher im NAB 12-55 dokumentiert ist (siehe Tabelle 2).

Tabelle 2: Minimale und maximale Temperaturen für die jeweiligen Grenzflächen der Wirtgesteine (NAB 12-55, Tabelle 1). Die angegebenen Werte sind, unter Berücksichtigung von maximalen bzw. minimalen Anforderungen, auf 5 °C gerundet.

	Tiefenintervall (GOK) [m]	Mittl. Temp. Oberkante [°C]	Mittl. Temp. Unterkante [°C]	Min. Temp. Oberkante [°C]	Max. Temp. Oberkante [°C]	Min. Temp. Unterkante [°C]	Max. Temp. Unterkante [°C]
Effinger Schichten	260-980	20	55	20	25	40	65
'Brauner Dogger'	310-960	25	55	20	30	40	65
Opalinuston	150-1020	15	55	15	20	40	70
Helv. Mergel*	200-1240	15	50	15	20	40	55

* Die ermittelten Werte für die helvetischen Mergel des Wellenbergs beziehen sich auf Daten aus den Bohrungen SB4 und SB3 (Ostrowski et al. 1992).

Für den Tonigen Lias werden wie für Opalinuston 20 – 70 °C als Maximaltemperatur angegeben. Der von der Nagra definierte Temperaturbereich basiert für die Standortgebiete der Nordschweiz auf der Annahme eines Temperaturgradienten von 3 – 5.5 °C/100 m (NAB 12-55), wobei die maximalen Temperaturen aus der maximalen Tiefenlage der Wirtgesteine herrühren. Die Temperaturen für das Standortgebiet Wellenberg sind aus Bohrungen abgeleitet. Für die HAA-Standortgebiete hat die Nagra thermo-hydraulische Modellierungen durchgeführt (Nördlich Lägern: NAB 13-56, Zürich Nordost: NAB 13-97, Jura Ost: NAB 14-39). Darin wird ein Temperaturbereich von 19 – 55.5 °C für die Mitte des Opalinustons für den Referenzfall angegeben. Die von der Nagra erwartete Temperatur in einer mittleren Tiefe eines HAA-Lagers beträgt etwa 40 °C (NAB 17-01, Frage 61).

Beurteilung des ENSI

Temperaturprofile der Bohrungen Benken, Böttstein, Weiach und Schafisheim (Axpo 2012) zeigen über die obersten 1000 m einen mittleren Gradienten von etwa 4.1 °C/100 m. In der Bohrung Riniken sind es 5 °C/100 m und in der Bohrung Oftringen 6 °C/100 m. Aufgrund der Ergebnisse der Bohrungen beurteilt das ENSI den unteren Wert der Bandbreite des Gradienten von 3.0 °C/100 m für die Standortgebiete der Nordschweiz als zu niedrig. Das ENSI geht von einem Referenzwert des Temperaturgradienten von 4.1 °C/100 m aus. Ein ähnlicher Wert (4.3 °C/100m) wird auch im NAB 14-11 für die TH-Modellierung des HAA-Nahfeldes verwendet. Der von der Nagra verwendete obere Eckwert des Gradienten von 5.5 °C/100 m wird vom ENSI als plausibel beurteilt, da erhöhte Temperaturgradienten in den Bohrungen Riniken und Oftringen sowie in den tonigen Schichten der Bohrung Benken (8 °C/100 m) (NTB 00-01) gemessen wurden.

Basierend auf dem Referenzwert und dem oberen Eckwert des Temperaturgradienten, auf den Angaben zu den Referenzmächtigkeiten der Wirtgesteine und der Rahmengesteine (NTB 14-02-VI) sowie auf den Angaben zur Tiefe des Opalinustons unter Terrain (NTB 14-01) hat das ENSI standortspezifische Temperaturen bezogen auf die Mitte des Wirtgesteins bzw. der Rahmengesteine berechnet. Die vom ENSI für die Temperatur abgeleiteten Referenzwerte (RW) und oberen Eckwerte (OE) sind in Tabelle 3 zusammengestellt. Die von der Nagra angegebenen maximalen Temperaturen, die z. B. für die Ermittlung der effektiven Diffusionskoeffizienten berücksichtigt wurden, beurteilt das ENSI auf Basis der vorliegenden Daten als überkonservativ (z. B. für Opalinuston 70

°C). Basierend auf den vorliegenden Daten der Nordschweiz verwendet das ENSI den Mittelwert der Temperaturen der HAA-Standortgebiete (für Opalinuston 36.2 °C) als plausible standortunabhängige Referenztemperatur und das Maximum der Temperaturen der HAA-Standortgebiete (für Opalinuston 52.0 °C) als plausiblen oberen Eckwert der Temperatur für die Standortgebiete der Nordschweiz. Die oberen Bandbreiten der in den thermo-hydraulischen Modellierungen der Nagra angegebenen Temperaturen für den Opalinuston (NAB 13-56; NAB 13-97; NAB 14-39) zeigen ähnliche Werte.

Für das geologische Standortgebiet Wellenberg hat das ENSI die Temperaturen basierend auf der Tiefe der mittleren Lagerebene (720 m u. T.) berechnet, wobei die Gradienten 3.3 °C/100 m für den Referenzwert der Temperatur und 5.5 °C/100 m für den oberen Eckwert verwendet werden.

Table 3: Standortspezifisch abgeschätzte Referenzwerte und obere Eckwerte der Temperatur des ENSI bezogen auf die Mitte der geologischen Schicht (TL: Toniger Lias, OPA: Opalinuston, BD: 'Brauner Dogger', EFF: Effinger Schichten, MGL: Mergel-Formationen des Helvetikums)

LT	SG	RW Temperaturgradient 4.1°C/100 m					OE Temperaturgradient 5.5°C/100 m				
		T TL [°C]	T OPA [°C]	T MGL [°C]	T BD [°C]	T EFF [°C]	T TL [°C]	T OPA [°C]	T MGL [°C]	T BD [°C]	T EFF [°C]
HAA	JO	35	32		28	27	43	39		35	33
HAA	NL	44	41		37	34	55	52		47	42
HAA	ZNO	39	36		32	30	49	45		39	36
SMA	SR	28	25		21	19	34	30		25	22
SMA	ZNO	35	32		28	26	44	40		35	32
SMA	NL	42	39		35	32	53	49		44	39
SMA	JO	33	31		27	26	41	38		33	32
SMA	JS	34	32		28	26	42	39		34	32
SMA	WLB	(3.3°C/100 m)		33.8					49.6		
Mittelwert HAA		39.0	36.2		32.8	33.3					
Maximalwert HAA							55.0	52.0		47.0	42.0

Für Etappe 3 SGT ist es erforderlich, aus den mittels Sondierbohrungen bestimmten Gebirgstemperaturprofilen standortspezifische Referenzwerte und obere Eckwerte der Temperatur auf Lagerebene herzuleiten und diese in den Sicherheitsanalysen zu berücksichtigen.

3.3.3 Diffusion

Die Diffusion beschreibt die Bewegung von im Wasser gelösten Stoffen. Dieser Prozess stellt in gering durchlässigen tonreichen Gesteinen den Haupttransportprozess für im Porenwasser gelöste Radionuklide dar. Der Radionuklidtransport erfolgt in Richtung eines etwaigen Konzentrationsgradienten und kann mittels effektiver Diffusionskoeffizienten in den Radionuklidausbreitungsberechnungen berücksichtigt werden. In Etappe 2 SGT hat die Nagra elementspezifische und gesteinspezifische effektive Diffusionskoeffizienten abgeleitet.

Angaben der Nagra

Die Nagra diskutiert im NTB 14-02-VI die Diffusionseigenschaften der Wirt- und Rahmengesteine. Darin werden gemessene effektive Diffusionskoeffizienten für HTO (Tritium), Na⁺, I⁻ und Cl⁻ senkrecht und parallel zur Schichtung präsentiert, die sich auf eine Referenztemperatur von 25 °C beziehen. Die gleichen Daten werden in Abhängigkeit von der zugänglichen Porosität dargestellt. Zwischen Porosität und Diffusionskoeffizienten besteht ein empirischer Zusammenhang: Das Archie-Gesetz beschreibt die Beziehung zwischen dem effektiven Diffusionskoeffizienten für eine im Porenwasser eines Gesteins gelöste Spezies (D_e), dem Diffusionskoeffizienten dieser Spezies in freiem Wasser (D_w) und der für die betreffende Spezies zugänglichen Porosität (ϵ). Die erweiterte Version des Archie-Gesetzes (e-Archie) bildet die Grundlage für ein Verfahren zur Schätzung effektiver

Diffusionskoeffizienten, die in der Sicherheitsanalyse verwendbar sind (NTB 12-03). Mittels eines zusätzlichen Terms wurde die Referenzkurve anhand der Messwerte kalibriert. Ausserdem wurde eine obere und eine untere Randkurve definiert, um die Bandbreite der Messwerte zu erfassen. Obgleich jedes Element einen eigenen Diffusionskoeffizienten im freien Wasser aufweist, wurden die Elemente in zwei Untergruppen unterschiedlicher Diffusionsgeschwindigkeiten aufgeteilt. Die zu verwendenden Porositäten wurden hauptsächlich anhand von Bohrkernproben der Wirtgesteine bestimmt. Die Werte der Anionen-zugänglichen Porositäten basieren auf der Beobachtung, dass in den meisten Tongesteinen ca. 50 % der totalen Porosität für Anionen zugänglich ist. Im Fall der dem Ionenaustausch unterliegenden Kationen wurde eine Korrektur des effektiven Diffusionskoeffizienten um einen Term der Oberflächendiffusion gemäss Gimmi und Kosakowski (2011) vorgenommen.

Mit steigender Temperatur erhöht sich die Mobilität gelöster Substanzen, hauptsächlich wegen der Abnahme der Viskosität von Wasser. Zur Berücksichtigung des Temperatureffekts auf die Diffusion wurde die Arrhenius-Gleichung verwendet. Für Opalinuston haben Van Loon et al. (2005) die Temperaturabhängigkeit der Diffusionskoeffizienten von HTO, Cl⁻ und Na⁺ im Intervall 5 – 65 °C experimentell untersucht und quantifiziert. Der Temperatureffekt ist nicht vernachlässigbar; wenn z. B. die in situ-Diffusionskoeffizienten vom Felslabor Mont Terri (14 – 16 °C) auf die Labor-Referenztemperatur von 25 °C umgerechnet werden, beträgt der Korrekturfaktor gemäss der Arrhenius-Gleichung 1.3 – 1.4 (NTB 14-02-VI). In einem geologischen Tiefenlager sind die Diffusionskoeffizienten entsprechend der höheren Temperatur noch etwas höher.

Für jedes Wirtgestein, den Tonigen Lias und Bentonit wurde eine Tabelle mit effektiven Diffusionskoeffizienten zusammengestellt. Die Tabellen enthalten einen Referenzwert bei 25 °C, dessen Berechnung unter Nutzung der Referenzporosität und der mittleren Kurve des e-Archie-Gesetzes erfolgte. Obere und untere Eckwerte wurden geschätzt durch Kombinieren der oberen e-Archie-Kurve mit dem oberen Eckwert der Porosität und entsprechend der unteren e-Archie-Kurve mit dem unteren Eckwert der Porosität. Der Temperatureffekt wurde zusätzlich für den oberen Eckwert berücksichtigt. Dazu wurde eine kombinierte Ungewissheit in der Porosität, in der e-Archie-Kurve und in der Temperatur durch Fehlerfortpflanzung abgeschätzt. Die resultierende Ungewissheit wurde zum Referenzwert bei 25 °C addiert (NTB 12-03).

Beurteilung des ENSI

Das ENSI hat die Berechnung der effektiven Diffusionskoeffizienten der Radionuklide für alle Wirtgesteine, den Tonigen Lias und Bentonit überprüft. Das schrittweise Vorgehen der Nagra für die Bestimmung der effektiven Diffusionskoeffizienten basierend auf dem erweiterten Archie-Gesetz (e-Archie) ist nachvollziehbar. Die einheitliche Verwendung der Fitting-Parameter (m_1 , m_2 , B , NTB 12-03) für alle Wirtgesteine, den Tonigen Lias und Bentonit beurteilt das ENSI als robust. Die obere und untere Kurve des e-Archie sind für die dargestellten Messdaten mit wenigen Ausnahmen abdeckend. Die molekularen Diffusionskoeffizienten hängen u. a. vom hydrodynamischen Radius, der Temperatur und der Viskosität ab. Die Einteilung der molekularen Diffusionskoeffizienten in zwei Untergruppen unterschiedlicher Diffusionsgeschwindigkeiten ist plausibel und robust. Die mit den zwei Untergruppen verbundene Ungewissheit beträgt für die Gruppe I etwa 12.5 % und für Gruppe II etwa 33 %. Diese Ungewissheit wurde durch die Nagra nicht in der Bestimmung der oberen Eckwerte der effektiven Diffusionskoeffizienten berücksichtigt.

Die vorgeschlagenen element- und gesteinspezifischen effektiven Diffusionskoeffizienten für Cl⁻, HTO und Na⁺ sind durch experimentelle Daten gut belegt. Unterschiede der effektiven Diffusionskoeffizienten für die Wirtgesteine, Toniger Lias und Bentonit resultieren aus Unterschieden in der zugänglichen Porosität. Die aus Sicht des ENSI bestehenden Ungewissheiten bezüglich der Anionen-zugänglichen Porosität wurden in den oberen Eckwerten der Nagra nicht berücksichtigt. Die Berücksichtigung der Oberflächendiffusion für die Kationen Na⁺, Sr²⁺, Ca²⁺, K⁺, Rb⁺, Cs⁺, Ra²⁺ wird als sicherheitsgerichtet angesehen (Fig. 48, NTB 12-03). Die Berücksichtigung der Temperaturabhängigkeit der effektiven Diffusionskoeffizienten ist aus Sicht des ENSI sicherheitsgerichtet und die Verwendung der Arrhenius-Gleichung eine geeignete Methodik dafür. Damit erachtet das ENSI die in ENSI 33/115 zum Untersuchungsprogramm NTB 10-01 geforderte Abklärung hinsichtlich des Einflusses der Temperatur auf die Diffusionskoeffizienten (Forderung 31) als erfüllt. Allerdings ist das ENSI nicht damit einverstanden, die Temperaturkorrektur nur über eine Fehlerfortpflanzung zu berücksichtigen. Das ENSI hat diese

Kritik am methodischen Vorgehen in seiner Bestimmung der Referenz- und oberen Eckwerte der effektiven Diffusionskoeffizienten berücksichtigt. Für Etappe 3 SGT sind die Werte der effektiven Diffusionskoeffizienten unter Berücksichtigung der relevanten Bandbreiten und Ungewissheiten der beeinflussenden Parameter zu aktualisieren.

Die Referenzwerte der effektiven Diffusionskoeffizienten der Nagra beurteilt das ENSI als zu niedrig, da sich diese auf eine Temperatur von 25 °C beziehen. Die realistisch zu erwartenden Temperaturen in der Mitte der Wirtgesteine bzw. des Tonigen Lias liegen deutlich über 30 °C (Tabelle 2 in Kapitel 3.3.2). Die effektiven Diffusionskoeffizienten des ENSI für alle Standortgebiete basieren auf der mittleren Temperatur der HAA-Standortgebiete und liegen etwa um einen Faktor 1.4 höher als die der Nagra (Abbildung 10).

Die oberen Eckwerte der effektiven Diffusionskoeffizienten berechnet die Nagra unter Berücksichtigung der Ungewissheiten in den Porositätswerten und in der e-Archie-Kurve für die Temperatur von 25 °C sowie für die maximale Temperatur im Wirtgestein. Es erfolgt jedoch keine Temperaturkorrektur, der Einfluss der maximalen Temperatur wird über eine Fehlerfortpflanzung berücksichtigt (NTB 12-03). Aus Sicht des ENSI deckt dieses Vorgehen der Nagra nicht die mögliche Bandbreite ab. Die Daten aus NAB 12-55 und Axpo 2012 zeigen, dass die Temperaturen im Wirtgestein deutlich höher als 25 °C liegen. Hinzu kommt im HAA-Lager eine zusätzliche Temperaturzunahme aufgrund des Wärmeeintrags durch hochaktive Abfälle, die für die ersten 10 000 – 20 000 Jahre etwa 10 – 20 °C betragen kann (NAB 14-11). Ausserdem würde eine grössere Tiefenlage der Lagerebene (bis 900 m) ebenfalls zu einer höheren Temperatur führen. Die oberen Eckwerte der effektiven Diffusionskoeffizienten müssen die Bandbreite der möglichen Temperaturen im Tiefenlager entsprechend widerspiegeln.

Das ENSI hat neue Werte für die oberen Eckwerte der effektiven Diffusionskoeffizienten bestimmt und diese in den Dosisberechnungen berücksichtigt. Für diese Bestimmung stützt sich das ENSI auf seine Beurteilung der zu erwartenden Temperaturen in den Wirt- und Rahmengesteinen (Kapitel 3.3.2). Als oberer Eckwert der Temperatur wird für alle Standortgebiete einheitlich die maximale Temperatur der HAA-Standortgebiete für einen Temperaturgradienten von 5.5 °C/100 m in der Arrhenius-Gleichung verwendet. Zusätzlich berücksichtigt das ENSI die Ungewissheiten der Diffusionskoeffizienten im freien Wasser (NTB 12-03). Für Anionen werden erhöhte Anionen-zugängliche Porositäten gemäss Kapitel 3.1 und für die Mergel-Formationen des Helvetikums höhere obere Eckwerte der Porosität (Kapitel 3.1.5) angesetzt.

Abbildung 10 veranschaulicht, wie stark sich die vom ENSI abweichend zur Nagra berücksichtigten Ungewissheiten auf die ermittelten oberen Eckwerte der effektiven Diffusionskoeffizienten auswirken. In rötlichen Tönen sind die Kationen und in blauen Tönen die Anionen dargestellt. Die Balken zeigen jeweils, um welchen Faktor die effektiven Diffusionskoeffizienten des ENSI höher als die der Nagra sind. Die Kombination der erhöhten Temperatur (T) und der Ungewissheiten in den molekularen Diffusionskoeffizienten (D_w) für die Kationen führt etwa zu einer Erhöhung der effektiven Diffusionskoeffizienten um den Faktor 2. Für die Anionen wirkt sich zusätzlich zur Temperatur (T) und zu den molekularen Diffusionskoeffizienten (D_w) der erhöhte Anteil der Anionen-zugänglichen Porosität (0.7 statt 0.5) aus, weshalb sich die effektiven Diffusionskoeffizienten um den Faktor 2 - 5 erhöhen. Die Unterschiede für die Mergel-Formationen des Helvetikums sind deutlich grösser, da das ENSI dort von höheren Porositäten für den oberen Eckwert ausgeht. Die erhöhten effektiven Diffusionskoeffizienten wirken sich auf die Ergebnisse der Dosisberechnungen aus.

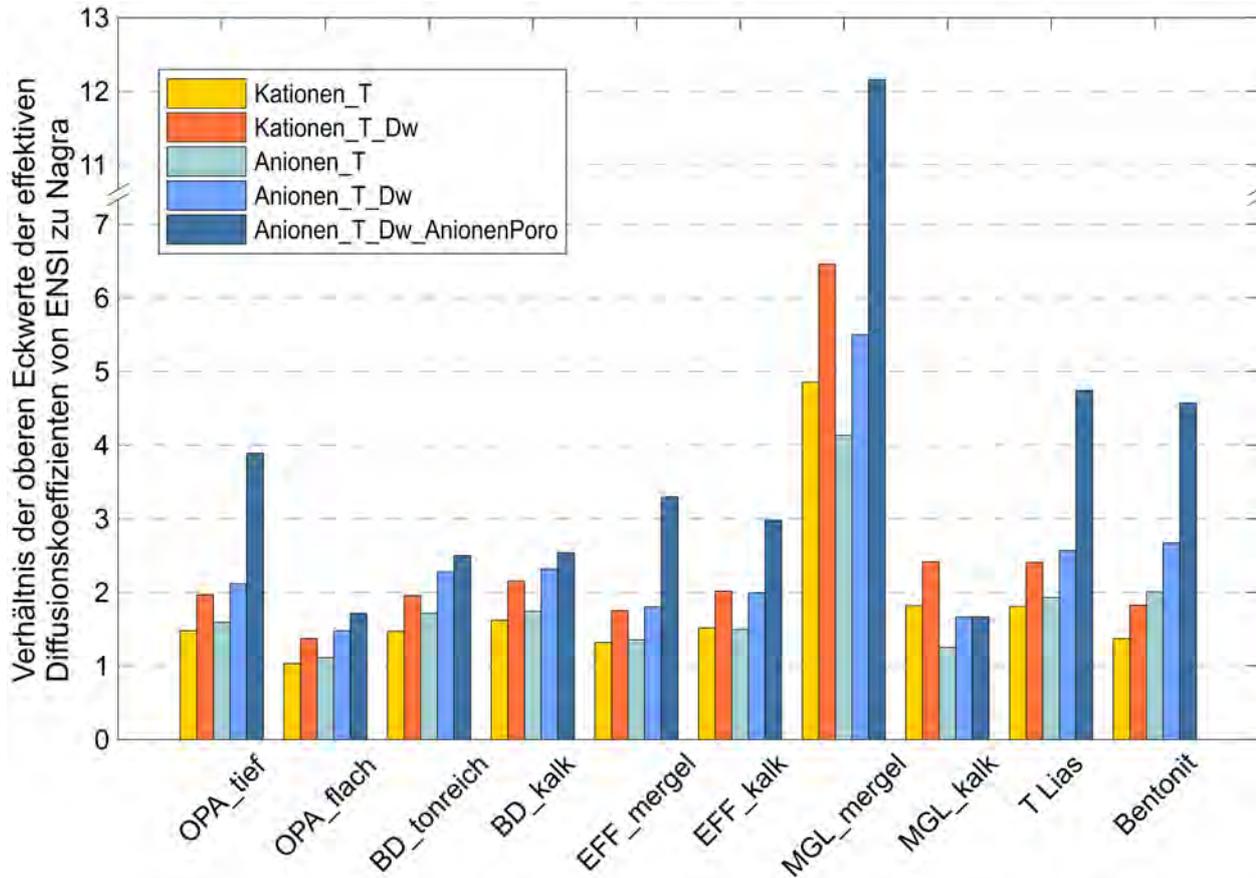


Abbildung 10: Verhältnis der oberen Eckwerte der effektiven Diffusionskoeffizienten von ENSI höher zu Nagra für Kationen und Anionen (T : Temperaturkorrektur, D_w : Ungewissheit des molekularen Diffusionskoeffizienten, AnionenPoro: Korrektur der Anionen-zugänglichen Porosität).

3.3.4 Sorption und Löslichkeitslimiten

Die Sorption ist ein wichtiger Rückhalte Mechanismus bei der Ausbreitung der Radionuklide im Nahfeld und in der Geosphäre. Sie kommt durch Wechselwirkungen zwischen Radionukliden und Gesteinsoberflächen zustande und ist für verschiedene chemische Elemente unterschiedlich stark ausgeprägt. Das Ausmass der Sorption der einzelnen Radionuklide hängt unter anderem von Parametern wie dem pH-Wert, den Redoxbedingungen und der Spezierung der Radionuklide im Porenwasser ab. Die Nagra hat für die verschiedenen Wirt- und Rahmengesteine sowie für das Bentonit-Nahfeld (HAA) und das Zementnahfeld (SMA) Sorptionsdaten erhoben, welche für die Dosisberechnungen verwendet werden.

Neben der Sorption wird die maximale Konzentration einiger Radionuklide im Porenwasser des Zementnahfelds eines LMA-Lagers und des Bentonitnahfelds eines HAA-Lagers auch durch deren beschränkte Löslichkeit begrenzt. Unter dem Begriff Löslichkeitslimiten versteht man die maximale Menge eines chemischen Elements, die sich im Porenwasser des betrachteten Referenzsystems aufzulösen vermag. Als klassisches Werkzeug wird für solche Betrachtungen die Gleichgewichtsthermodynamik angewendet. Diese sagt aus, welche Stoffmenge sich mit einem Festkörper in der zugehörigen flüssigen Phase im Gleichgewicht befindet und wie sich das untersuchte Element auf die verschiedenen gelösten Spezies verteilt.

Maximale Löslichkeiten im Zementnahfeld

Angaben der Nagra

Die Löslichkeitsberechnungen wurden mit einem am PSI entwickelten Code durchgeführt unter Verwendung einer aktualisierten thermodynamischen Datenbank (NAB 12-07). Neben Referenzwerten werden auch untere und obere Eckwerte evaluiert. Oft sind für Formationskonstanten der Festkörper und gelösten Spezies Bandbreiten verfügbar, mit welchen die unteren und oberen Eckwerte abgeschätzt werden können. In vielen Fällen ist auch ungewiss, ob wirklich der thermodynamisch stabilste Festkörper gebildet wird. Dann wird die (kinetische) Bildung von alternativen Festkörpern in die Herleitung der Referenz- und Eckwerte mit einbezogen. Dieses Verfahren verlangt Expertenwissen (NTB 14-06; NTB 14-07).

Der Einfluss von Isosaccharinsäure, einem bei hohem pH-Wert stark komplexierenden Zersetzungsprodukt der Zellulose, auf die Löslichkeit der Elemente wurde ebenfalls ermittelt. Das Isosaccharinat-Anion ist dafür bekannt, mit zwei-, drei- und vierwertigen Kationen starke Komplexe zu bilden und damit gegebenenfalls erhöhte Konzentrationen in Lösung zu stabilisieren. Das Isosaccharinat-Anion hat also schlimmstenfalls auf die trivalenten Elemente sowie Po und Th einen löslichkeitserhöhenden Einfluss (NTB 14-07).

Beurteilung des ENSI

Das ENSI hat die von der Nagra ermittelten Löslichkeitslimiten im Zementnahfeld stichprobenartig geprüft. Die Bestimmung der Löslichkeitslimiten für das Zementnahfeld durch die Nagra unter Berücksichtigung der neusten thermodynamischen Daten erachtet das ENSI als stufengerecht. Durch dieses Verfahren konnten die Löslichkeitslimiten einiger Elemente angepasst werden. So konnte beispielsweise der obere Eckwert von Zirkonium genauer bestimmt werden (NTB 14-07), welcher ein Kritikpunkt des ENSI im Entsorgungsnachweis war (HSK 35/86). Die von der Nagra vorgeschlagenen elementspezifischen Werte für die maximale Löslichkeiten im Referenzporenwassers für das Zementnahfeld sind aus Sicht des ENSI für die meisten Elemente nachvollziehbar und plausibel.

Die Nagra hat den Einfluss der Isosaccharinsäure (ISA) auf die maximale Löslichkeit der verschiedenen Radionuklide für das Zementnahfeld in der Abfallgruppe 2 nachvollziehbar aufgezeigt. Für Etappe 3 SGT ist darzulegen, ob bei weiteren Elementen wie z. B. Zinn, Protactinium, Blei und Kobalt der Einfluss von ISA bei den Löslichkeitslimiten analog zur Sorption berücksichtigt werden müsste. Das ENSI erachtet die Forderung 34 damit als grundsätzlich erfüllt.

Sorption im Zementnahfeld

Angaben der Nagra

Für Etappe 2 SGT wurden neue experimentelle Daten für die Sorption der Radionuklide im Zementnahfeld und die Sorptionsmechanismen der einzelnen Radionuklide ausgewertet. Damit wurden die Sorptionskoeffizienten (k_d -Werte) aus Etappe 1 SGT aktualisiert (NTB 14-08). Die Nagra unterscheidet bei der Bestimmung der k_d -Werte im Zementnahfeld drei Phasen der Zementdegradation (Stage I, II, III). Für diese Phasen werden die Sorptionskoeffizienten jeweils für oxidierende und reduzierende Bedingungen bestimmt.

Für die Dosisberechnungen werden Referenzwerte und untere Eckwerte (UE) für die Sorptionskoeffizienten des Zementnahfeldes ausgewählt. Für die meisten Radionuklide sind die Referenzwerte die k_d -Werte der reduzierten Spezies aus der Zementdegradationsphase II, da sich der Grossteil des Zementnahfelds während des Betrachtungszeitraums in Phase II befindet. Die Methodik zur Bestimmung der UE der Sorptionskoeffizienten wurde im Vergleich zum Entsorgungsnachweis und zur Etappe 1 SGT erweitert. Die UE wurden durch drei unterschiedliche Methoden bestimmt: der pessimistische UE ($k_{d'pess}$) wurde mit Hilfe eines Ungewissheitsfaktors (f_E) ermittelt: $k_{d'pess} = k_d / f_E$. Der Ungewissheitsfaktor ergibt sich aus den experimentellen Ungewissheiten bei der Bestimmung der Sorptionskoeffizienten. Für stark sorbierende Radionuklide beträgt der Faktor 3.3, für schwach sorbierende Radionuklide 1.4. Der Literaturvergleichs-UE wurde aus ONDRAF 2009, 2010 entnommen. Der UE in Folge des Einflusses von hoch-salinem Porenwasser basiert auf den Sorptionskoeffizienten von degradiertem Zement,

welcher in Kontakt mit hoch-salinem Porenwasser steht. Für die Dosisberechnungen wurde für jedes Radionuklid jeweils der tiefste der drei beschriebenen UE ausgewählt.

Für Kobalt, Nickel und anorganischen Kohlenstoff erfolgt die Rückhaltung in der Zementmatrix nicht über einen gewöhnlichen Adsorptionsprozess. Es wird angenommen, dass die Rückhaltung durch einen löslichkeitslimitierenden Prozess und einen darauffolgenden Isotopenaustausch erfolgt. Die Konzentration der im Porenwasser befindlichen Isotope wird durch die Löslichkeitslimite der entsprechenden Spezies bestimmt. Dabei wird angenommen, dass sich die gelösten und gebundenen Isotope im Zementnahfeld im Gleichgewicht befinden. Die Rückhaltung der Isotope erfolgt schliesslich durch Isotopenaustausch der im Porenwasser gelösten Radionuklide mit den entsprechenden stabilen Isotopen in der Zementmatrix. Mit diesen Annahmen werden für Kobalt, Nickel und anorganischen Kohlenstoff operative k_d -Werte bestimmt. Im Gegensatz zu Etappe 1 SGT werden die operativen k_d -Werte in Etappe 2 SGT nicht über das Radionuklidinventar ermittelt, sondern über die Löslichkeitslimiten und über die Menge der stabilen Isotope im Zementnahfeld von Kobalt, Nickel und anorganischem Kohlenstoff, welche für den Austausch zur Verfügung stehen.

Störstoffe mit möglichen Auswirkungen auf die Aufnahme von Radionukliden durch Zementstein (insbesondere organische und anorganische Liganden wie EDTA, CN-, Abbauprodukte von Ionenaustauscherharzen, Zellulose und Betonzusatzmitteln) können die Radionuklidmobilität im Zement erhöhen. Abfälle mit grossen Mengen dieser Störstoffe werden deswegen der Abfallgruppe 2 zugeordnet. Die Auswirkungen der Störstoffe werden mittels Sorptionsreduktionsfaktoren quantifiziert und für die Sorptionskoeffizienten in der Abfallgruppe 2 berücksichtigt.

Beurteilung des ENSI

Das ENSI ist grundsätzlich mit den gewählten k_d -Werten für die Radionuklide im Zementnahfeld (ausser für das Zementnahfeld im Wirtgestein Effinger Schichten) und den Sorptionsreduktionsfaktoren für die Abfallgruppe 2 einverstanden.

Die Sorptionskoeffizienten aller Radionuklide für das Zementnahfeld in Verbindung mit umliegendem Wirtgestein Effinger Schichten müssen aus Sicht des ENSI angepasst werden, da hier das höher saline Referenzporenwasser der Effinger Schichten einen Einfluss auf die Sorption hat. Das ENSI empfiehlt daher, die von der Nagra ermittelten UE unter Einfluss von salinem Porenwasser als Referenzsorptionskoeffizienten für das Zementnahfeld unter Einfluss des Wirtgesteins Effinger Schichten anzunehmen. Ausgehend von diesen Sorptionskoeffizienten müssen die $k_{d, pess}$ bei umliegendem Wirtgestein Effinger Schichten neu berechnet werden. Die vom ENSI durchgeführten Berechnungen mit den geänderten Referenzsorptionskoeffizienten sind in Kapitel 5.2.9 dargestellt.

Das ENSI ist mit der Berechnung der operationellen k_d -Werte für Kobalt, Nickel und anorganischem Kohlenstoff einverstanden. Die Forderung 35 «Sorptionskoeffizienten der Elemente Kohlenstoff (anorganisch), Kobalt und Nickel» der 41 ENSI Forderungen (ENSI 33/115) ist somit erfüllt.

Das ENSI begrüsst die erweiterte Art der Bestimmung des UE. Durch diese Erweiterung wird eine grössere Bandbreite für die Sorptionskoeffizienten der Radionuklide aufgezeigt. Aus Sicht des ENSI muss jedoch der Einfluss der Alkali-Kieselsäure-Reaktion bei den UE für die Sorptionskoeffizienten für Etappe 3 SGT geprüft werden, da aufgrund kieselsäurehaltiger Zuschlagstoffe im Beton und silikatreicher Materialien in den radioaktiven Abfällen die vollständige Zementdegradation durch die Alkali-Kieselsäure-Reaktion bereits in einigen hundert bis tausend Jahren erfolgen kann (NTB 14-11, EGT 2016, Kapitel 2.3.1).

Maximale Löslichkeiten im Bentonit

Angaben Nagra

Die Löslichkeitslimiten im Bentonit wurden nach dem gleichen Vorgehen wie für Zementstein ermittelt (NTB 14-06). Da im Bentonit keine Isosaccharinsäure vorkommt, ist ihr Einfluss vernachlässigbar.

Beurteilung ENSI

Das ENSI hat die von der Nagra ermittelten Löslichkeitslimiten für das Bentonit-Nahfeld stichprobenartig geprüft. Die von der Nagra vorgeschlagenen elementspezifischen Werte für die maximalen Löslichkeiten im Referenzporenwasser für Bentonit sind aus Sicht des ENSI nachvollziehbar und plausibel.

Sorption auf Wirtgesteine, Rahmengesteine und Bentonit

Angaben der Nagra

Für Etappe 2 SGT wählt die Nagra das nachfolgend beschriebene methodische Vorgehen zur konsistenten Herleitung der Sorptionskoeffizienten für Wirt- und Rahmengesteine sowie Bentonit (NTB 09-03; NTB 12-04). Die hauptsächlichsten Einflussfaktoren für die Sorption in diesen Systemen sind der Gehalt an Schichtsilikaten, insbesondere an 2:1-Tonmineralen (Illit, Smektit und Illit-Smektit-Wechselagerungen), sowie die Porenwasserchemie, welche die Spezierung der Radionuklide in der wässrigen Phase bestimmt. Die Sorptionsquelldaten entstammen vorwiegend Messungen auf Illit (oder Montmorillonit für Bentonit). Sie wurden auf die definierten Bedingungen eines jeden Systems umgerechnet, indem eine Reihe sogenannter Konvertierungsfaktoren benutzt wurde. Diese berücksichtigen Unterschiede in der Mineralogie, dem pH-Wert und der Radionuklidspeziation. Schliesslich wurde ein Konvertierungsfaktor Labor zu Feld verwendet, um die Sorptionsmessungen von dispergierten Systemen (Batch-Experimenten) auf intaktes Gestein unter in situ-Bedingungen zu übertragen. In einigen wenigen Fällen enthielten die Gesteine zu wenig Tonminerale, um diesen Ansatz zu verwenden. Es wurde trotzdem eine Sorptionsdatenbank erstellt, indem ein Verfahren zur Anwendung kam, bei dem Calcit die hauptsächlich sorbierende Phase darstellt.

Da nicht für alle Radionuklide ausreichend experimentelle Messdaten auf Illit, Montmorillonit oder Calcit vorliegen, werden die Sorptionskoeffizienten einiger Radionuklide mittels chemischer Analogien bestimmt. Die Radionuklide Radium, Cäsium, Strontium, Calcium und Kalium binden sich durch Kationenaustausch an die Wirt- und Rahmengesteine sowie an den Bentonit. Daher werden die k_d -Werte dieser Elemente nicht nach dem oben erläuterten Verfahren ermittelt, sondern analog zu Etappe 1 SGT mittels eines von der Nagra erstellten Modells berechnet.

Die UE werden analog zu Etappe 1 SGT mittels eines Sorptionsreduktionsfaktors (f_E) festgelegt: $UE = k_d / f_E$. Für jedes Radionuklid wird in jeder der Porenwasserzusammensetzungen ein UE bestimmt. Für die Dosisberechnungen wird jeweils der tiefste UE ausgewählt.

Das Vertrauen in die Gültigkeit und Richtigkeit dieses Verfahrens zur Bestimmung der k_d -Werte wurde durch zusätzliche Studien gestärkt (NTB 09-07, Bradbury und Baeyens 2011 sowie NTB 12-05). In allen Fällen waren die Ergebnisse der einzelnen zum Vergleich genutzten Ansätze konsistent mit den Vorhersagen des im NTB 12-04 beschriebenen Verfahrens.

Beurteilung des ENSI

Aus Sicht des ENSI ist das von der Nagra gewählte Vorgehen zur Bestimmung der Sorptionskoeffizienten für die Wirt- und Rahmengesteine und den Bentonit für alle Radionuklide nachvollziehbar und plausibel. Die Nagra hat die Herleitung der Sorptionskoeffizienten klar dargelegt. Sie hat gezeigt, dass die durch das oben erläuterte Verfahren bestimmten Sorptionskoeffizienten in den allermeisten Fällen gut mit den gemessenen Sorptionskoeffizienten übereinstimmen bzw. zwischen den unteren und oberen Eckwerten liegen. Nur in wenigen Ausnahmefällen kommt es zu grösseren Abweichungen zwischen den gemessenen und den durch das Vorgehen bestimmten Werten. Da sich auch diese Abweichungen noch innerhalb eines akzeptablen Rahmes befinden, ist das ENSI mit den Sorptionsdatensätzen für die Wirt- und Rahmengesteine und für den Bentonit einverstanden. Die Forderungen 2 («Parameteranpassung Porosität, Diffusion- und Sorptionskoeffizienten des 'Braunen Doggers'») und 30 («Methodenvalidierung des Vorgehens zur Bestimmung der Sorptionskoeffizienten») aus ENSI 33/115 sind daher erfüllt.

3.4 Gasbildung und Gastransport

Gas wird in einem Tiefenlager vor allem durch die anaerobe Korrosion von Metallen und durch die Degradation von organischen Materialien gebildet. Die Menge des entstehenden Gases hängt dementsprechend von der Zusammensetzung der Rohabfälle, der Abfallbehälter sowie von den metallischen Ausbauten der Lagerkammern ab.

Ein hoher Gasdruck im Lager kann zu Deformationen der natürlichen und technischen Barrieren führen, was die Sicherheitsfunktion der Barrieren beeinträchtigen kann. Zusätzlich kann radionuklidhaltiges Porenwasser durch das gebildete Gas verdrängt sowie der Transport von volatilen Radionukliden in der Gasphase ermöglicht werden. Um die Sicherheit des Tiefenlagers zu gewährleisten, muss das System der technischen und natürlichen Barrieren einerseits den Transport von Radionukliden so weit wie möglich verzögern und andererseits ausreichend durchlässig für Gas sein.

Im Folgenden werden zunächst die Korrosionsraten erläutert, welche die Grundlage für die Gasbildung darstellen. Aufbauend auf den Gasbildungsraten und den Gesteinseigenschaften werden die sicherheitstechnischen Konsequenzen der Gasbildung beurteilt.

3.4.1 Korrosionsraten

Angaben der Nagra

Die Korrosionsraten von metallischen Materialien unter anaeroben Bedingungen hängen von den Eigenschaften des Materials selbst und von den physikalischen und chemischen Eigenschaften der Umgebung ab. Zur Bestimmung der Korrosionsraten unter anaeroben Bedingungen hat die Nagra weitere Versuche durchgeführt sowie einen Literaturvergleich verschiedener Experimente zur Metallkorrosion vorgenommen und darauf basierend die Werte der Korrosionsraten aus der Etappe 1 SGT angepasst (NAB 14-21; NAB 15-17 Rev 1). Die Materialien Eisen und Kohlenstoffstahl stellen fast 80 % der gesamten Metallmasse bei SMA und einen noch grösseren Anteil bei HAA dar (NAB 14-21). Die von der Nagra vorgeschlagenen Korrosionsraten der verschiedenen Metalle werden in Tabelle 4 aufgelistet.

Tabelle 4: Vorgeschlagene Korrosionsraten von der Nagra für Metalle in einem SMA- und LMA-Lager (Zementnahfeld, $pH \geq 10.5$) und einem HAA-Lager (Bentonitnahfeld, $pH < 10.5$) unter anaeroben Lagerbedingungen (NAB 14-21 und NAB 15-17 Rev 1).

Material	Korrosionsrate [$\mu\text{m}/\text{Jahr}$]
Eisen und Kohlenstoffstahl, $pH < 10.5$	2 (oberer Eckwert: 5)
Eisen und Kohlenstoffstahl, $pH \geq 10.5$	0.02 (oberer Eckwert: 0.03) gesättigte Bedingungen <0.01 ungesättigte Bedingungen
Rostfreier Stahl & Nickellegierungen, $pH < 10.5$	0.1
Rostfreier Stahl & Nickellegierungen, $pH \geq 10.5$	0.001
Zircaloy	0.001
Blei	0
Magnesium	5
Aluminium	10
Zink	100
Kupfer	0

Beurteilung des ENSI

Das ENSI und seine Experten beurteilen die aktualisierten Korrosionsraten der verschiedenen Metalle unter anaeroben Bedingungen als plausibel. Der von der Nagra gewählte Referenzwert für die Korrosionsrate des Kohlenstoffstahls im HAA-Lager von 2 µm/Jahr ist sicherheitsgerichtet. Basierend auf den vorliegenden Daten beurteilt das ENSI im Unterschied zur Nagra einen oberen Eckwert der Korrosionsrate von 10 µm/Jahr als angemessen, um die in verschiedenen Experimenten gemessenen Korrosionsraten umfassend abzudecken (ENSI 33/463). Aufgrund der Sensitivitätsanalyse der Nagra mit abdeckenden Gasbildungsraten ist das jedoch ausreichend und hat somit keine Auswirkung auf den Einengungsentscheid in Etappe 2 SGT.

3.4.2 Gasbildung

Angaben der Nagra

SMA-Lager

Unter Annahme einer vollständigen Korrosion aller metallischen Stoffe und der Degradation der Organika entsteht eine Gasmenge von $4 \cdot 10^7$ m³ (NTB 14-03). Es werden fünf verschiedene zeitliche Entwicklungen der Gasbildung für das SMA-Lager aufgezeigt (Nagra 2015c; NAB 17-01, Frage 65): Die sogenannte «typische Gasbildungsrate», die «Referenzfall MIRAM 14» Rate sowie die drei konstanten Gasbildungsraten «Basisfall» (0.1 m³ Gas/m³ Abfall/Jahr), «Unterer Eckwert» (0.001 m³ Gas/m³ Abfall/Jahr) und «Oberer Eckwert» (1 m³ Gas/m³ Abfall/Jahr). Die «typische Gasbildungsrate» basiert auf Ergebnissen aus Korrosionsexperimenten mit ungesättigten Bedingungen. Die Gasbildungsrate «Referenzfall MIRAM 14» baut auf den Korrosionsraten des NAB 14-21 und dem Abfallinventar MIRAM 14 auf.

Die Gasbildungsraten für ATA und SMA sind in den ersten 100 Jahren nach Einlagerung gegenüber Etappe 1 SGT deutlich niedriger. Die Ursache liegt nicht in den Abfällen selbst, sondern im Kenntnisstand zur Gasbildung in Etappe 2 SGT, welcher die Verwendung von weniger konservativen Korrosions- bzw. Abbauraten als in Etappe 1 SGT erlaubt (NTB 14-03).

HAA-Lager

Die insgesamt gebildete Gasmenge für die Referenzannahmen beträgt $2.3 \cdot 10^7$ m³ (NTB 14-03). In einer unveröffentlichten internen Arbeitsnotiz (Nagra 2015c) und im NAB 17-01 (Frage 65) werden für das HAA-Lager drei verschiedene zeitliche Entwicklungen der Gasbildung aufgezeigt, welche auf drei unterschiedlichen Korrosionsraten für Kohlenstoffstahl beruhen: 0.5 µm/Jahr, 1 µm/Jahr und 2 µm/Jahr. Zusätzlich berechnet die Nagra auf Anfrage des ENSI die Gasbildung basierend auf zwei weiteren Korrosionsraten für Kohlenstoffstahl, nämlich 5 µm/Jahr und 10 µm/Jahr (NAB 17-01, Frage 65). Die im NTB 14-03 angegebenen Gasbildungsraten und insgesamt gebildeten Gasmengen beziehen sich ausschliesslich auf die Abfälle (NAB 17-01, Frage 72). Die Gasbildung aus den metallischen Einbauten ist nicht vernachlässigbar und deswegen wird für die Gastransportberechnungen zusätzlich eine Referenzgasbildungsrate von 0.06 m³ Gas/m³ Abfall/Jahr für die Tunneleinbauten berücksichtigt (NAB 14-10). Die radiolytische Gasproduktion hingegen ist unwesentlich (NTB 14-11).

Beurteilung des ENSI

SMA-Lager

Im Vergleich zur Etappe 1 SGT geht die Nagra in Etappe 2 SGT von einer fast doppelt so grossen Gesamtgasmenge aus, die sich durch die Zunahme der Metall- und Organikamengen gegenüber Etappe 1 SGT (Kapitel 2.1) erklären lässt. Für das SMA-Lager ist die Gasbildung aus den metallischen Einbauten vernachlässigbar klein (NAB 17-01, Frage 72) und wird daher nicht berücksichtigt. Das ENSI ist mit der ermittelten Gasmenge aus den SMA-Abfällen der Nagra für die Beurteilung in Etappe 2 SGT einverstanden.

Die auf MIRAM 14 basierende Referenzgasbildungsrate in Etappe 2 SGT liegt in einem vergleichbaren Größenbereich wie die Referenzgasbildungsrate der Etappe 1 SGT. Die Nagra hat in ihren Berechnungen zum

Gastransport die «typische Gasbildungsrate» verwendet und auf Rückfrage des ENSI ihre Herleitung erläutert (NAB 17-01, Frage 65). Dabei hat die Nagra die Verwendung der Gasbildungsrate «Referenzfall MIRAM 14» für die Berechnung des Gastransports empfohlen. Diese ist höher als die erwähnte «typische Gasbildungsrate». Jedoch hat die Nagra aus Gründen der Projektabwicklung die Gasbildungsrate «Referenzfall MIRAM 14» für ihre Berechnungen nicht verwendet (Kapitel 3.4.3). Aufgrund der Sensitivitätsanalyse der Nagra mit abdeckenden Gasbildungsraten hat dies keine Auswirkung auf den Einengungsentscheid und ist für Etappe 2 SGT daher nicht relevant.

Die Nagra hat in der Bestimmung der Gasbildungsraten für das HAA- und das SMA-Lager die oberen Eckwerte der Korrosionsraten nicht mitberücksichtigt. Da alle Wirtgesteine von dieser Erhöhung der Korrosionsraten gleichermaßen betroffen sind und abdeckende Gasbildungsraten bei den Gastransportberechnungen verwendet wurden, hat dies keinen Einfluss auf die Standortauswahl.

Das ENSI kommt zum Schluss, dass die Betrachtungen der Nagra zur Gasbildung für die Einengung der Standortgebiete ausreichend sind.

HAA-Lager

Das ENSI stellt fest, dass basierend auf den Angaben der Nagra für den Entsorgungsnachweis (NTB 04-06) und für die Etappe 2 SGT (NAB 14-104) sowohl die Anzahl der Endlagerbehälter als auch die Masse der einzelnen Endlagerbehälter abgenommen haben. Die Beurteilungsgrundlage dafür ist das Basisszenarium des Abfallinventars MIRAM 14 (Kapitel 2.1). Daher ist die insgesamt gebildete Gasmenge für Etappe 2 SGT im Vergleich zum Entsorgungsnachweis um knapp die Hälfte gesunken. Das ENSI kann die berechnete Gasmenge für das HAA-Lager aus den Abfällen und den metallischen Einbauten (NAB 17-01, Frage 72) nachvollziehen.

3.4.3 Gastransport

Angaben Nagra

Die Nagra hat im NAB 13-83 die für die Gasfreisetzung relevanten gasbezogenen Prozesse und Phänomene beschrieben und bewertet. Darüber hinaus wurden für alle Wirtgesteine in den vorgeschlagenen Standortgebieten Referenzdatensätze der gasbezogenen Transporteigenschaften festgelegt, die grundlegend für die Modellanalysen sind. Zu den relevanten Gastransporteigenschaften zählen die Porosität, die intrinsische Permeabilität, die relative Permeabilität und die Kapillardruck-Sättigungsbeziehung der Wirtgesteine (NAB 13-83).

SMA-Lager

Für die Berechnungen der Gasausbreitung (NAB 13-92; NAB 14-98) wurden verschiedene Gasbildungsraten verwendet, die das gesamte Spektrum an möglichen Gasbildungsraten sicher erfassen (NAB 17-01, Frage 65). Zur Minimierung des Gasdrucks kann die Oberfläche von metallischen Komponenten durch die Abfallbehandlung reduziert oder das für die Aufnahme des Gases zur Verfügung stehende Porenraumvolumen erhöht werden. Dies kann zum Beispiel durch bautechnische Massnahmen erreicht werden. Schliesslich kann das von der Nagra vorgeschlagene «Engineered gas transport system» (EGTS) verwendet werden mit dem Ziel, das gebildete Gas aus den Lagerkavernen mittels optimierter Verschluss-, Verfüllungs- und Versiegelungselemente entlang der Kavernen bzw. Tunnel bis in die Rahmengesteine abzuführen (NAB 14-16; NAB 13-92).

Es ist vorgesehen, die Hohlräume in den SMA-Lagerkammern mit hoch-porösem Zementmörtel und die Zugangsbauwerke mit Sand/Bentonitmischungen zu verfüllen bzw. zu versiegeln. Wenn sich beide Materialien in direktem Kontakt befinden, besteht die Möglichkeit, dass langfristige mineralogische Umwandlungen den Porenraum in der Kontaktzone verschliessen. Im Extremfall könnte der Porenraum undurchlässig für Gas werden. Eine Übergangsschicht, die aus geeigneten Materialien besteht und einen ausreichenden Abstand zwischen den zementhaltigen Materialien und der Sand/Bentonitmischung gewährleistet, ist eine Möglichkeit, die nachteiligen Mineralreaktionen zu vermeiden oder zumindest abzuschwächen. Um dies zu untersuchen, hat die Nagra im NAB 14-16 geochemische Berechnungen durchgeführt. Diese Berechnungen zeigen, dass in einem

geeignet ausgelegten EGTS die chemischen Reaktionen nicht zu einer signifikanten Porositätsreduktion mit einem Verlust der Gasdurchlässigkeit führen werden (NAB 14-16).

Entsprechend einer Forderung des ENSI (ENSI 33/366) hat die Nagra Sensitivitätsstudien zur Gasfreisetzung für die verschiedenen Wirtgesteine in den vorgeschlagenen Standortgebieten durchgeführt (NAB 14-98). Der Schwerpunkt dieser Studien liegt auf dem Vergleich des Gasdruckaufbaus in den verfüllten Lagerkammern unter dem konservativen Ansatz einer zweidimensionalen Ausbreitung. Mit dieser Annahme wird das Gas ausschliesslich über das Wirtgestein (d. h. nicht entlang der verfüllten Untertagebauwerke) freigesetzt. Das Verhältnis zwischen dem Porenwasserdruck und dem lithostatischen Druck wird als Indikator für die mögliche mechanische Schädigung des Gebirges herangezogen. Die vergleichenden Berechnungen zeigen, dass für alle Rechenfälle der Gasdruck in den Lagerkammern unterhalb des lithostatischen Drucks und in den meisten Fällen unterhalb des Schwellendrucks für dilatanzkontrollierten Gastransport (ca. 80 % des lithostatischen Drucks) bleibt.

HAA-Lager

Bzgl. der Berechnungen des Gastransports für das HAA-Lager (NAB 14-10) wurden ähnliche Werte für die Gasbildungsraten verwendet wie im Entsorgungsnachweis (NTB 04-06). Dabei ist die Gasbildung aus der Tunnelinstallation berücksichtigt. Für das HAA-Lager hat die Nagra untersucht, ob in den verfüllten Lagerstollen Gasdruckwerte entstehen können, die allenfalls die Barrierenwirkung negativ beeinflussen könnten (NAB 14-10). Für die Beurteilung dieser Frage wurden zweidimensionale numerische Modellanalysen zum Gasdruckaufbau und zur Gasfreisetzung nach Lagerverschluss durchgeführt (Beschränkung auf Gastransport durch das Wirtgestein). Gasfreisetzungsmo­dellierungen wurden für die gesamte Bandbreite der Gastransportparameter des Opalinustons (Referenzwerte sowie obere/untere Eckwerte) und für typische Lagertiefen (450 m, 600 m, 750 m unter Terrain) durchgeführt. Mit den Referenzwerten erreichen die Gasdruckwerte in keinem der gerechneten Rechenfälle den lithostatischen Gebirgsdruck. Selbst unter der Annahme von konservativen Gasproduktionsraten und einer reduzierten Gastransportkapazität des Wirtgesteins treten nur in einem Rechenfall Gasdruckwerte über dem lithostatischen Druck auf (NAB 14-10). Durch die Wahl eines alternativen Behältermaterials (z.B. Endlagerbehälter mit Kupfermantel) können für einen langen Zeitraum deutlich geringere Gasproduktionsraten erreicht werden.

Beurteilung ENSI

Das ENSI und seine Experten (EGT 2016) haben die Aussagen der Nagra zum Gastransport geprüft und kommen zum Schluss, dass die Ausführungen der Nagra nachvollziehbar und mehrheitlich plausibel sind.

Die Nagra hat für die Gastransportberechnungen die Gasbildungsrate basierend auf MIRAM 14 (Grundlage für die Radionuklid­ausbreitungsberechnungen) nicht verwendet (Kapitel 3.4.2.). Aufgrund der Sensitivitätsanalyse der Nagra mit abdeckenden Gasbildungsraten hat dies jedoch keine Auswirkung auf den Einengungsentscheid und ist für Etappe 2 SGT ausreichend. Dennoch fordert das ENSI, dass die verwendeten Modelle und Parameter bei der Beurteilung aller sicherheitstechnischen Aspekte in Etappe 3 SGT konsistent verwendet werden.

Aus Sicht des ENSI werden im Bericht NAB 13-83 wichtige Grundlagen zu den Prozessen und Parametern des Gastransports in den verschiedenen Wirtgesteinen basierend auf Experimenten zusammengestellt. Somit erfüllt die Nagra mit den Berichten NAB 13-83 und NAB 14-16 die Forderung 7 in ENSI 33/115. Die Nagra hat die wirtgesteinspezifische Aufsättigung bei ihren Gastransportberechnungen basierend auf den Parametern im NAB 13-83 berücksichtigt und damit die Forderung 38 erfüllt. Das ENSI erwartet, dass die Nagra weitere Aspekte (z. B. Validierung der Modelle, Parameterwerte, Stoffgesetze, gekoppelte Prozesse) des Gastransports durch Experimente in weiteren Schritten der Lagerrealisierung vertieft analysieren wird.

SMA-Lager

Aus Sicht des ENSI tragen die Resultate der Berichte NAB 14-16 und NAB 13-92 dazu bei, die Wirkung und Langzeitentwicklung eines EGTS zu verstehen. Aus Sicht des ENSI muss der Nachweis des von der Nagra vorgeschlagenen EGTS mit Ergebnissen aus weiteren Demonstrationsversuchen erbracht werden. Aus diesem Grund stützt sich das ENSI bei seiner Bewertung des Indikators 31 «Verhalten des Wirtgesteins bezüglich Gas» in Etappe 2 SGT nicht auf das EGTS ab.

Für das SMA-Lager hatte die Nagra in Etappe 1 SGT vier verschiedene Wirtgesteine vorgeschlagen. Im Rahmen der Zwischenhalt-Fachsitzung über Gas (ENSI 33/366) hat das ENSI einen Vergleich der verschiedenen Wirtgesteine bezüglich Gastransport für Etappe 2 SGT gefordert. Die Nagra hat mit zweidimensionalen Berechnungen, ohne Berücksichtigung von zusätzlichen technischen Massnahmen wie das EGTS, den Gasdruckaufbau in den vorgeschlagenen Wirtgesteinen für ein SMA-Lager verglichen (NAB 14-98). Das ENSI kann diesen Vergleich nachvollziehen und erachtet die Forderung damit als erfüllt.

Das ENSI hat im Rahmen der Überprüfung ausgewählte Rechenfälle nachgerechnet und neue Varianten betrachtet, um den Effekt einer Variation der Parameter und der Konzeptualisierung auf die Berechnungen zu analysieren. Das ENSI kann die Resultate und Schlussfolgerungen der Nagra für den Gastransport in den Wirtgesteinen Opalinuston, Effinger Schichten und Mergel-Formationen des Helvetikums nachvollziehen, kommt aber für das Wirtgestein 'Brauner Dogger' in Nördlich Lägern und Zürich Nordost zu anderen Schlussfolgerungen als die Nagra.

In Abbildung 11 werden die ENSI-Resultate des Referenzfalls und eines Alternativfalls für den Opalinuston und den 'Braunen Dogger' in Nördlich Lägern gezeigt. Diese Resultate stimmen mit den entsprechenden Resultaten der Nagra überein. Das ENSI hat die Ungewissheiten in der Konzeptualisierung und den hydraulischen Eigenschaften der «harten Bänke» des 'Braunen Doggers' mit zusätzlichen Berechnungen untersucht. Basierend auf diesen Rechenfällen und Modell- und Parametervariationen haben aus Sicht des ENSI die «harten Bänke» wegen der höheren Durchlässigkeit (Kapitel 3.2) eine bessere Transportkapazität für Gas als der Opalinuston. Insbesondere im alternativen Fall mit erhöhten Durchlässigkeiten in den tonreichen Abfolgen des 'Braunen Doggers' (TA und STA) zeigt sich ein geringerer Druckanstieg (Abbildung 11). Unter Berücksichtigung der ganzen Parametervariation fallen die Werte des relativen Drucks (Verhältnis zwischen dem Gasdruck und dem lithostatischen Druck) beim 'Braunen Dogger' tendenziell tiefer aus als beim Opalinuston. Doch die aus den Berechnungen resultierende Bandbreite (Abbildung 11) des relativen Drucks ist beim 'Braunen Dogger' aufgrund der Ungewissheiten in der Datengrundlage grösser als beim Opalinuston.

Die Analyse des ENSI zeigt, dass die tonige Abfolge (TA) entscheidend ist für die beschränkte Gastransportkapazität des 'Braunen Doggers'. Aufgrund der ähnlichen Referenzwerte für die intrinsische Permeabilität in der TA ist im Referenzfall die Gastransportkapazität vom 'Braunen Dogger' ähnlich wie jene vom Opalinuston. Es reicht aber eine Erhöhung der intrinsischen Permeabilität der TA um einen Faktor 5 bis 10, um den relativen Druck im ganzen Wirtgestein wesentlich zu reduzieren, weil dann der Gastransport primär entlang der Sandkalkabfolge (SKA) stattfindet. Die Ungewissheiten der hydraulischen Durchlässigkeit in der TA des 'Braunen Doggers' sind gross. Deswegen bewertet das ENSI den 'Braunen Dogger' unter Berücksichtigung dieser Ungewissheiten und der vorhandenen Heterogenitäten bezüglich Gastransport besser als der Opalinuston.

Das ENSI stellt fest, dass die Nagra unterschiedliche Werte der intrinsischen Permeabilität für die Radionuklid-ausbreitungs- (Kapitel 6.1.1) und Gastransportberechnungen (NAB 14-98) verwendet hat. Das betrifft insbesondere die Referenzwerte der intrinsischen Permeabilität für die sandig-tonige Abfolge und die Sandkalkabfolge. Zudem entsprechen die Werte der intrinsischen Permeabilität für die Gastransportberechnungen im Alternativfall nicht den oberen Eckwerten der intrinsischen Permeabilität für die Radionuklid-ausbreitungs-berechnungen. Daher hat das ENSI zusätzliche Gastransportberechnungen für den 'Braunen Dogger' mit den für die Radionuklid-ausbreitung verwendeten Referenzwerten und oberen Eckwerten der intrinsischen Permeabilität (Kapitel 6.1.1) durchgeführt. Während das Resultat der Berechnung für Referenzwerte mit dem Resultat des Referenzfalls in Abbildung 11 übereinstimmt, liegt das Resultat der Berechnung mit den oberen Eckwerten zwischen den Werten des Referenzfalls und des Alternativfalls für 'Brauner Dogger' in Abbildung 11.

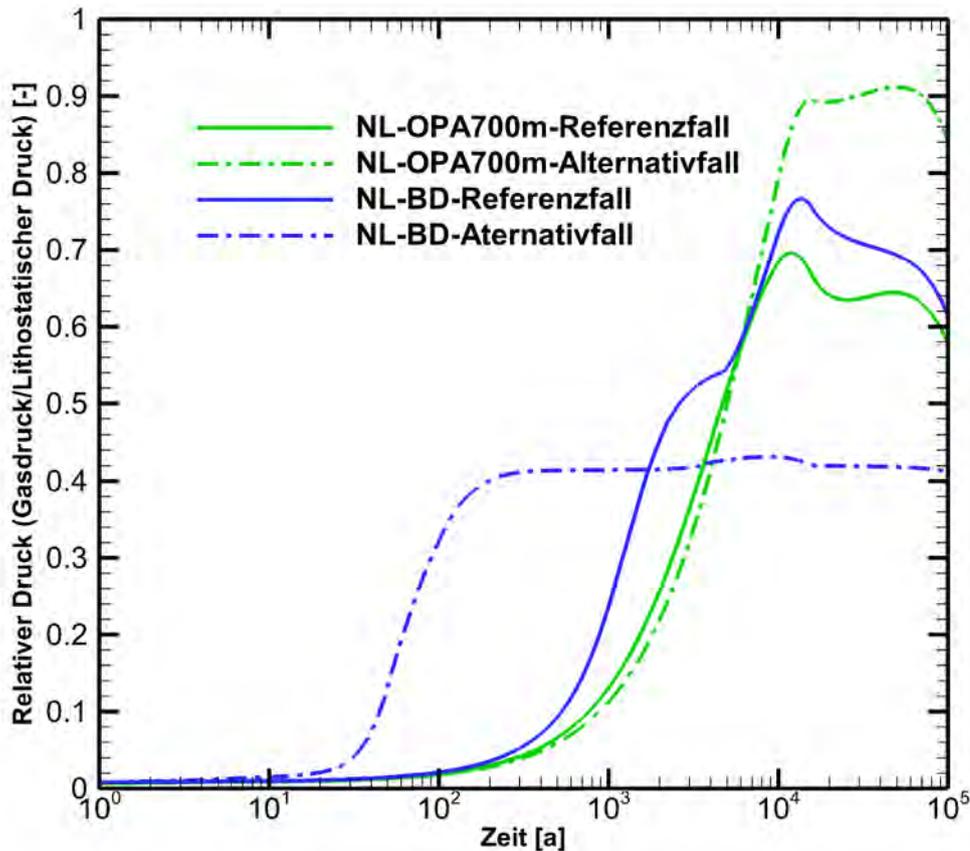


Abbildung 11: Referenzfall- und Alternativfall-Berechnung des ENSI zum relativen Druck für die Wirtgesteine 'Brauner Dogger' (BD, Tiefe: 649m) und Opalinuston (OPA, Tiefe: 700m) im Standortgebiet Nördlich Lägern als Funktion der Zeit.

HAA-Lager

Aus den Berechnungen der Nagra im NAB 14-10 ist ersichtlich, dass die drei vorgeschlagenen Standortgebiete Zürich Nordost, Nördlich Lägern und Jura Ost mit dem Wirtgestein Opalinuston trotz unterschiedlicher Tiefenlage ähnliche Resultate für den relativen Druck aufweisen. Die Berechnungen zeigen auch, dass die Parameter «intrinsische Permeabilität» und «Gasbildungsrate» die sensitivsten Parameter für die Bestimmung der Gastransportkapazität sind. Das ENSI beurteilt die Resultate der Nagra als plausibel und nachvollziehbar. Es erwartet, dass in Etappe 3 SGT die numerischen Analysen mit standortspezifischen Parametern und Konzepten verfeinert und mit Experimenten belegt werden. Falls technische Massnahmen für die Begrenzung der Gasdruckwerte im HAA-Lager notwendig sind, muss die Nagra in ihrem Referenzkonzept für Etappe 3 SGT die sicherheitstechnischen Konsequenzen der technischen Massnahmen aufzeigen.

Fazit

Das ENSI hält fest, dass die Nagra für die Gastransportberechnungen nicht die von ihr selbst empfohlenen Gasbildungsraten des MIRAM 14 verwendet, sondern die sogenannten «typischen Gasbildungsraten». Aufgrund der Sensitivitätsanalyse der Nagra mit abdeckenden Gasbildungsraten ist das jedoch ausreichend und hat somit keine Auswirkung auf den Einengungsentscheid in Etappe 2 SGT. Darüber hinaus sind auch die von der Nagra verwendeten K-Werte nicht immer konsistent mit den K-Werten, welche in den Radionuklidtransportberechnungen verwendet werden. Das ENSI fordert deswegen, dass die Modelle und Parameter mit ihren Bandbreiten bei der Beurteilung aller sicherheitstechnischen Aspekte in Etappe 3 SGT konsistent verwendet werden.

Die Resultate der Berichte der Nagra tragen dazu bei, die Wirkung und Langzeitentwicklung eines EGTS zu verstehen. Aus Sicht des ENSI muss der Nachweis des von der Nagra vorgeschlagenen EGTS mit Ergebnissen aus weiteren Demonstrationsversuchen erbracht werden.

Das ENSI beurteilt die Resultate der Nagra als plausibel und nachvollziehbar. Es erwartet, dass in Etappe 3 SGT die numerischen Analysen mit standortspezifischen Parametern und Konzepten verfeinert und mit Experimenten belegt werden. Falls technische Massnahmen für die Begrenzung der Gasdruckwerte im SMA- oder HAA-Lager notwendig sind, muss die Nagra in ihrem Referenzkonzept für Etappe 3 SGT die sicherheitstechnischen Konsequenzen der technischen Massnahmen aufzeigen.



4 Methodik für die Auswahl von mindestens zwei Standortgebieten in Etappe 2 SGT

Das Ziel von Etappe 2 SGT ist die Einengung auf mindestens 2 Standortgebiete pro Lagertyp unter Zurückstellung von eindeutig weniger geeigneten Standortgebieten. In diesem Kapitel wird die von der Nagra angewandte Methodik (Einengungsmethodik) beschrieben und durch das ENSI hinsichtlich der Erfüllung der Vorgaben (BFE 2011b; ENSI 33/075; ENSI 33/154) und der Eignung beurteilt. Dabei werden die entscheidenden Aspekte der Einengungsmethodik durch das ENSI vertieft geprüft und, falls notwendig, wird ein abweichendes Vorgehen des ENSI erläutert. Die Beurteilung des ENSI stützt sich auch auf den Expertenbericht ENSI 33/465.

Die qualitative Beurteilung erfolgt anhand der in BFE (2011b) vorgegebenen 13 Kriterien zu Sicherheit und technischer Machbarkeit (Abbildung 12). Die Kriterien wiederum setzen sich aus mehreren Indikatoren zusammen und werden zu Kriteriengruppen zusammengefasst.

Kriteriengruppe	Kriterien
1. Eigenschaften des Wirtgesteins bzw. des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches	1.1 Räumliche Ausdehnung 1.2 Hydraulische Barrierenwirkung 1.3 Geochemische Bedingungen 1.4 Freisetzungspfade
2. Langzeitstabilität	2.1 Beständigkeit der Standort- und Gesteinseigenschaften 2.2 Erosion 2.3 Lagerbedingte Einflüsse 2.4 Nutzungskonflikte
3. Zuverlässigkeit der geologischen Aussagen	3.1 Charakterisierbarkeit der Gesteine 3.2 Explorierbarkeit der räumlichen Verhältnisse 3.3 Prognostizierbarkeit der Langzeitveränderungen
4. Bautechnische Eignung	4.1 Felsmechanische Eigenschaften und Bedingungen 4.2 Untertägige Erschliessung und Wasserhaltung

Abbildung 12: Kriterien zur Standortevaluation hinsichtlich Sicherheit und technischer Machbarkeit gemäss BFE (2011b).

Im Folgenden wird zuerst der grundsätzliche Umgang mit Variabilitäten und Ungewissheiten und anschliessend das von der Nagra für den sicherheitstechnischen Vergleich der Standortgebiete und die darauf folgende Einengung für Etappe 2 SGT gewählte Vorgehen in fünf Schritten diskutiert. Abbildung 13 illustriert vergleichend das methodische Vorgehen der Nagra und des ENSI.

4.1 Umgang mit Variabilitäten und Ungewissheiten

Angaben der Nagra

Gemäss den Vorgaben in ENSI 33/075 müssen die von der Nagra dokumentierten Aussagen für die Auswahl von geologischen Standortgebieten in Etappe 2 SGT belastbar sein, d. h. sie müssen auch unter Berücksichtigung der bestehenden Variabilitäten und Ungewissheiten gültig sein.

Die relevanten Ungewissheiten werden auf zwei Ebenen erfasst (NTB 14-01). Erstens wird zur Berücksichtigung von konzeptuellen Ungewissheiten, insbesondere der hydrogeologischen Eigenschaften der «harten Bänke» und deren Einfluss auf die Barrierenwirkung der Wirt- und Rahmengesteine und der Modellvorstellung zur Erosion für die Abgrenzung der Lagerperimeter ein Spektrum von Konzeptualisierungen betrachtet. Das Spektrum ist wie folgt definiert:

- *Referenz-Konzeptualisierung*, d. h. die auf Basis der Erfahrung plausibelste Konzeptualisierung,
- *ungünstige Konzeptualisierung*, d. h. eine Konzeptualisierung mit ungünstiger Wirkung auf das Barrierensystem,

-
- *günstige Konzeptualisierung*, d. h. eine Konzeptualisierung mit günstiger Wirkung auf das Barrierensystem.

Zweitens werden zur Berücksichtigung von Parameter-Ungewissheiten bei Bedarf Variationen der Parameter zur Untersuchung der Sensitivität der Entscheidung verwendet, welche die relevanten Bandbreiten der Parameterwerte wie folgt abdecken:

- *Referenzwert*, d. h. der auf Basis der Erfahrung plausibelste Wert,
- *günstiger Eckwert*, d. h. ein günstiger Wert, der aufgrund der Evidenzen auch auftreten kann,
- *ungünstiger Eckwert*, d. h. ein ungünstiger Wert, der aufgrund der Evidenzen nicht ausgeschlossen werden kann.

Die für die Einengung massgebende Konzeptualisierung, kombiniert mit den massgebenden Werten für ausgewählte Parameter und Referenzwerten für alle anderen Parameter, wird als massgebender Fall für die Einengung (mFE) bezeichnet.

Bei der Wahl der massgebenden Parameterwerte bzw. Konzeptualisierungen wird berücksichtigt, ob sich deren Ungewissheiten mit zukünftigen Untersuchungen zuverlässig reduzieren lassen. Falls nicht, werden ungünstige, die Ungewissheiten berücksichtigende Werte bzw. alternative Konzeptualisierungen verwendet, andernfalls werden realistische Werte bzw. Konzepte verwendet. Damit wird gewährleistet, dass der Entscheid bezüglich der Einengung der geologischen Standortgebiete in Etappe 2 SGT belastbar ist. Der für die Einengung massgebende Fall für die Dosisberechnungen unterscheidet sich vom «massgebenden Fall für die Einengung» bei der Bewertung darin, dass bei den Dosisberechnungen nur das Wirtgestein betrachtet wird.

Bei der Abgrenzung von untertägigen Lagerperimetern in den geologischen Standortgebieten werden neben optimierten Lagerperimetern (massgebender Lagerperimeter für die Einengung: mLE), welche die Basis für die anschliessenden Bewertungen bilden, zusätzlich alternative Lagerperimeter abgegrenzt, um zu prüfen, wie sensitiv die Abgrenzung auf alternative Annahmen und Ungewissheiten reagiert (NTB 14-01).

Beurteilung des ENSI

Das ENSI erachtet das von der Nagra gewählte Vorgehen zum Umgang mit Variabilitäten und Ungewissheiten als zielführend und stufengerecht für Etappe 2 SGT. Es erfüllt methodisch die Vorgaben (BFE 2011b; ENSI 33/075; ENSI 33/154). Das ENSI erachtet es als sicherheitsgerichtet, bei der Bestimmung des massgebenden Falls für die Einengung (mFE) die in Etappe 3 SGT mögliche Reduzierbarkeit der Ungewissheiten einfließen zu lassen. Bei reduzierbaren Ungewissheiten bzgl. der Konzeptualisierung bzw. Parametrisierung ergibt sich der mFE aus der Referenzkonzeptualisierung bzw. den Referenzwerten. Bei nicht reduzierbaren Ungewissheiten wird auf die jeweils ungünstige Variante zurückgegriffen. Das ENSI wendet bei seiner Beurteilung dasselbe Vorgehen an, wobei es aufgrund eigener Überlegungen die Konzeptualisierung und Parametrisierung teilweise unterschiedlich gewählt hat. Diese Abweichungen werden im Gutachten erläutert.

Die vom mFE abweichenden alternativen Konzeptualisierungen und Parameterwerte werden vom ENSI im Rahmen der Bewertung der Indikatoren bzw. der Identifizierung von eindeutigen Nachteilen diskutiert (Kapitel 6.1), um die Robustheit des Vergleichs auf der Ebene der Indikatoren zu prüfen.

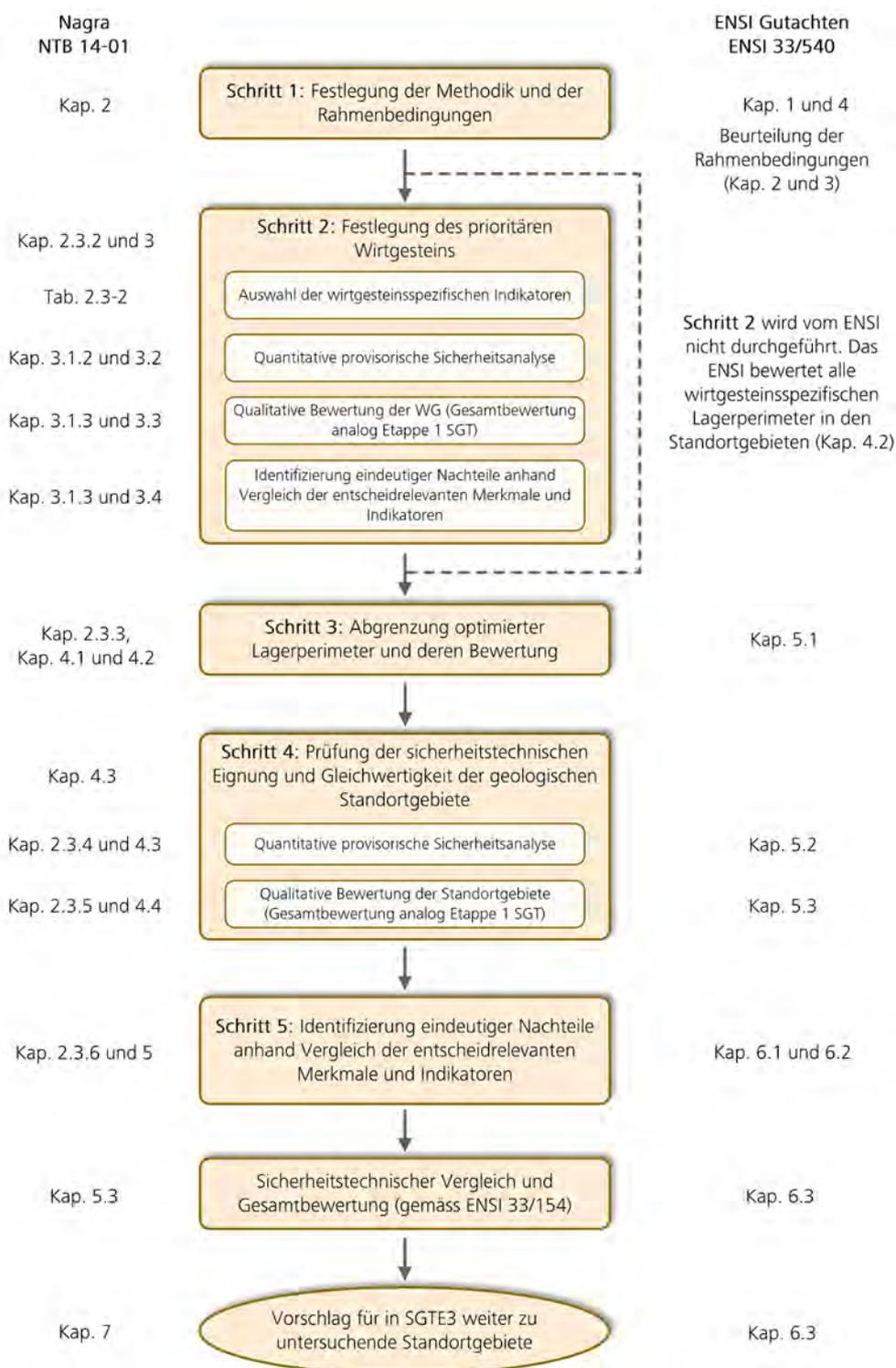


Abbildung 13: Vergleichende Darstellung des methodischen Vorgehens der Nagra und des ENSI zur Bestimmung der weiter zu untersuchenden Standortgebiete in Etappe 3 SGT inkl. der Referenzen zu den relevanten Kapitel in den Gesuchs- und Gutachtenunterlagen.

Der Begriff des massgebenden Falls für die Einengung (mFE) wird sowohl für die qualitative Bewertung als auch für die verwendet, wobei sich diese zum Teil unterscheiden. Sofern die Verwendung des Begriffs aus dem Zusammenhang ersichtlich ist, wird auf eine Präzisierung in diesem Gutachten verzichtet.

4.2 Festlegung des prioritären Wirtgesteins

Angaben der Nagra

In Standortgebieten mit mehr als einem Wirtgestein erfolgt in Schritt 2 (Abbildung 13) eine sicherheitsorientierte Optimierung bezüglich der Wirtgesteine. Zunächst wird anhand von wirtgesteinsspezifischen Dosisintervallen geprüft, ob die verschiedenen Wirtgesteine sicherheitstechnisch geeignet und in Etappe 2 SGT gleichwertig sind. Als nächstes wird mittels der qualitativen Bewertung einer Auswahl wirtgesteinsspezifischer Indikatoren geprüft, ob die verbleibenden Wirtgesteine gesamthaft eine Bewertung von mindestens «geeignet» aufweisen. Anhand einer Auswahl wirtgesteinsspezifischer entscheiderelevanter Merkmale und zugehöriger Indikatoren werden anschliessend in einer vergleichenden Bewertung der Wirtgesteine allfällige eindeutige Nachteile identifiziert. Wirtgesteine, die im Vergleich mit dem jeweils anderen Wirtgestein keine eindeutigen Nachteile aufweisen, werden als prioritäre Wirtgesteine, die anderen als weitere Wirtgesteine bezeichnet (NTB 14-01).

Beurteilung des ENSI

Das ENSI verzichtet in seiner Beurteilung auf diesen Schritt und bewertet die jeweiligen wirtgesteinsspezifischen Lagerperimeter in einem Auswahlschritt (Kapitel 5 und 6). Aus Sicht des ENSI kann die Selektion der Indikatoren für die Ermittlung des prioritären Wirtgesteins einen Einfluss auf die Entscheidungsfindung (z. B. Nichtberücksichtigung des Platzangebots oder Berücksichtigung der Tiefenlage) haben. Der Schritt zur Auswahl des prioritären Wirtgesteins war behördlich nicht vorgegeben, er wurde von der Nagra als Teil des Einengungsvorschlags für Etappe 2 SGT entwickelt. Das Vorgehen des ENSI ohne den Schritt zur «Festlegung des prioritären Wirtgesteins» erlaubt es zusätzlich, die Robustheit des Vorschlags der Nagra zu prüfen.

Das ENSI hat daher im Rahmen seiner Prüfung des Einengungsvorschlags verlangt, dass die Nagra für die weiteren, zurückgestellten Wirtgesteine (Effinger Schichten im Standortgebiet Jura-Südfuss und 'Brauner Dogger' in den Standortgebieten Nördlich Lägern und Zürich Nordost) Lagerperimeter abgrenzt und deren zugehörige Indikatoren bewertet (NAB 17-01, Fragen 30 und 47). Das ENSI nimmt seine Prüfung aufbauend auf diesen Ergänzungen in allen geologischen Standortgebieten für sämtliche Wirtgesteine vor.

4.3 Abgrenzung der optimierten Lagerperimeter

Angaben der Nagra

Im Schritt 3 (Abbildung 13) wird innerhalb der in Etappe 1 SGT festgelegten Standortgebiete eine optimierte räumliche Konfiguration der prioritären Wirtgesteine ausgewählt (Abgrenzung von optimierten Lagerperimetern). Im Unterschied zu Etappe 1 SGT werden zur Abgrenzung der Lagerperimeter einige Indikatoren modifiziert oder nicht mehr berücksichtigt (NTB 14-01).

Zur Untersuchung der Sensitivität der Entscheide bezüglich der verschiedenen Optimierungsmöglichkeiten werden für jedes geologische Standortgebiet mehrere Lagerperimeter abgegrenzt, wobei der als mLE bezeichnete Lagerperimeter den Ausgangspunkt für den sicherheitstechnischen Vergleich der Nagra bildet. Die anderen durch Berücksichtigung alternativer Konzeptualisierungen und/oder alternativer Optimierungsanforderungen abgegrenzten Lagerperimeter (alternative Lagerperimeter) werden für die Untersuchung der Sensitivität und Robustheit verwendet und bei Bedarf punktuell auch bei der Entscheidungsfindung berücksichtigt.

Beurteilung des ENSI

Das ENSI beurteilt das methodische Vorgehen zur Abgrenzung der mLE (schrittweise Verschärfung der Anforderungen mit Hilfe von Mindestanforderungen (MA), verschärften Anforderungen (VA) und Optimierungsanforderungen (OA)) sowie die dafür verwendeten Indikatoren grundsätzlich als zielführend und nachvollziehbar. Mit der durchgeführten Abgrenzung der Lagerperimeter anhand der MA und VA aus Etappe 1 SGT und unter Berücksichtigung der neuen Daten und Erkenntnisse (NTB 14-01, NTB 14-02 Dossier I bis VIII) kommt die Nagra den Vorgaben in ENSI 33/154 nach. Des Weiteren erachtet das ENSI die Abgrenzung von alternativen Lagerperi-

metern zur Berücksichtigung von konzeptionellen Ungewissheiten als zielführend, um einen robusten Vergleich der Lagerperimeter in den verschiedenen Standortgebieten zu ermöglichen.

Bei der Verschärfung der Anforderungen ist es nach Ansicht des ENSI wichtig, dass für jedes Wirtgestein in jedem Standortgebiet der beste Lagerperimeter für einen Vergleich verwendet wird. Die Nagra strebt bei der Abgrenzung optimierter Lagerperimeter an, ein genügendes Platzangebot bereit zu stellen. Dies erachtet das ENSI als entscheidend für den Einengungsprozess. Die Ergebnisse dieser Prüfung durch das ENSI werden in Kapitel 5.1 weiter diskutiert.

4.4 Prüfung der sicherheitstechnischen Eignung und Gleichwertigkeit der geologischen Standortgebiete

Im Schritt 4 der Einengungsmethodik (Abbildung 13) führt die Nagra für die sechs Standortgebiete eine quantitative provisorische Sicherheitsanalyse durch und beurteilt die Standortgebiete qualitativ anhand der 13 Kriterien hinsichtlich Sicherheit und technischer Machbarkeit (Abbildung 12).

Quantitative provisorische Sicherheitsanalyse

Für den Vergleich von Standortgebieten werden für die quantitative provisorische Sicherheitsanalyse Dosisberechnungen durchgeführt. Die daraus abgeleiteten charakteristischen Dosisintervalle werden anhand von zwei radiologischen Kriterien bewertet (ENSI 33/075). Das erste Kriterium ist das in der Richtlinie ENSI-G03 festgelegte Schutzkriterium von 0.1 mSv/Jahr, unterhalb welchem alle Standortgebiete als sicherheitstechnisch geeignet in Bezug auf die Dosisberechnungen in Etappe 2 SGT sind. Das zweite Kriterium ist der aus der Strahlenschutzverordnung (StSV) abgeleitete Wert von 0.01 mSv/Jahr, unterhalb welchem alle Standortgebiete als sicherheitstechnisch gleichwertig in Bezug auf die Dosisberechnungen in Etappe 2 SGT betrachtet werden. Die vom ENSI definierten Anforderungen an die Dosisberechnungen werden in Kapitel 5.2 erläutert und deren Resultate beurteilt.

Angaben der Nagra

Anhand von charakteristischen Dosisintervallen wird für die optimierten untertägigen Lagerperimeter geprüft, ob die geologischen Standortgebiete bzw. die zugehörigen Lagerperimeter in Bezug auf die Dosisberechnungen sicherheitstechnisch geeignet und gleichwertig sind (ENSI 33/075). Der Referenzfall wird durch die Referenz-Konzeptualisierung und die Referenz-Parameterwerte gebildet. Ausgehend vom Referenzfall werden zur Bestimmung des charakteristischen Dosisintervalls die vom ENSI festgelegten Rechenfälle für das standardisierte Parametervariationsverfahren berücksichtigt und zusätzlich die Konzeptualisierung des mFE der Dosisberechnungen einbezogen.

Beurteilung des ENSI

Die Nagra hat das standardisierte Parametervariationsverfahren zur Ermittlung der charakteristischen Dosisintervalle gemäss den Vorgaben (ENSI 33/075) durchgeführt. Das ENSI beurteilt die zusätzliche Einführung des mFE für die Dosisberechnungen als sicherheitsgerichtet und zielführend. Das ENSI hat im Rahmen der Beurteilung der quantitativen provisorischen Sicherheitsanalyse die Ergebnisse der Nagra durch unabhängige Berechnungen überprüft. Dabei hat das ENSI teilweise andere Parameterwerte als plausibel eingestuft und in den Berechnungen berücksichtigt. Die Ergebnisse der Dosisberechnungen sind in Kapitel 5.2 dargestellt.

Qualitative Bewertung der Standortgebiete bzw. Lagerperimeter

Für die qualitative Bewertung der geologischen Standortgebiete in Etappe 2 SGT gelten die Vorgaben des Sachplans (BFE 2011b) und des ENSI (ENSI 33/075; ENSI 33/154; ENSI 33/170). Dabei muss die Nagra überprüfen, ob die Standortgebiete in der Gesamtbewertung der 13 Kriterien mindestens «geeignet» sind.

Angaben der Nagra

Die qualitative Bewertung der geologischen Standortgebiete in Etappe 2 SGT erfolgt grundsätzlich gleich wie in Etappe 1 SGT. Aufgrund der unterschiedlichen Ausgangslage und Rahmenbedingungen in Etappe 2 SGT werden aber einige wichtige Anpassungen vorgenommen, welche im Folgenden diskutiert werden. Aufgrund der Fokussierung auf die geologischen Standortgebiete aus Etappe 1 SGT mit ihren Wirt- und Rahmengesteinen sind in Etappe 2 SGT einige der Indikatoren nicht mehr relevant und werden deshalb nicht mehr verwendet (NTB 14-01). Einige Indikatoren und ihre Bewertungsskalen wurden präzisiert, um den gegenüber Etappe 1 SGT erhöhten Detaillierungsgrad zu berücksichtigen (NAB 17-01, Frage 44).

In Etappe 2 SGT basieren die Bewertungen auf unterschiedlichen Bewertungsobjekten wie Wirtgestein (WG), einschlusswirksamer Gebirgsbereich (EG), Lagerperimeter (LP) und Wirtgestein sensu stricto (WG-ss). Als WG-ss wird die tonreiche Gesteinsabfolge mit genügender Mächtigkeit innerhalb des Wirtgesteins bezeichnet, in der die Lagerkammern angeordnet werden. Bei den mit LPmin/LPmax gekennzeichneten Indikatoren bezieht sich die Bewertung auf den für den jeweiligen Indikator ungünstigsten Punkt innerhalb des Lagerperimeters.

Zur Berücksichtigung des entsprechenden Kritikpunkts der Behörden in ihren Gutachten und Stellungnahmen zu Etappe 1 SGT wird die Abstufung der Bewertungen im oberen Bereich der Bewertungsskala verbessert. Neu reicht die Werteskala der Nagra von 0 bis 5 (statt von 0 bis 4 wie in Etappe 1 SGT). Von 0 bis 3 bleibt die Werteskala unverändert, ab 3 wird sie angepasst: «ungenügend» ($0 \leq x < 1$), «ungünstig» ($1 \leq x < 2$), «bedingt günstig» ($2 \leq x < 3$), «günstig» ($3 \leq x < 4$) bis «sehr günstig» ($4 \leq x < 5$).

Um differenziertere Ergebnisse zu erhalten, hat die Nagra gegenüber Etappe 1 SGT eine verfeinert abgestufte Bewertung durchgeführt. Diese verfeinerte Abstufung erfolgt in 0.2er Schritten, ausgehend vom Mittelwert der jeweiligen Bewertungsstufe (z. B. 3.5 für «günstig»). Die Gesamtbewertung erfolgt anhand der im SGT definierten Bewertungsskala «sehr geeignet» «geeignet» «bedingt geeignet» «weniger geeignet».

Die Bewertungen der Indikatoren werden schrittweise auf der Ebene der Kriterien, der Kriteriengruppen und der Gesamtbewertung basierend auf einer gleichgewichteten arithmetischen Mittelung aggregiert (analog wie in Etappe 1 SGT).

Beurteilung des ENSI

Das ENSI erachtet es als stufengerecht und nachvollziehbar, dass nicht mehr alle Indikatoren aus Etappe 1 SGT für Etappe 2 SGT verwendet werden, und es ist mit der Auswahl der verwendeten Indikatoren mit einer Ausnahme einverstanden. Der Indikator 47 «Gesteinsfestigkeiten und Verformungseigenschaften» wird vom ENSI nicht bewertet, weil dieser Aspekt bereits in Indikator 1 berücksichtigt ist und dazu eine Doppelbewertung vermieden werden soll (Kapitel 5.3).

Das von der Nagra in Etappe 2 SGT neu eingeführte Bewertungsobjekt WG-ss ist weder im Sachplan noch vom ENSI vorgegeben. Das ENSI erachtet dessen Einführung jedoch grundsätzlich als nachvollziehbar und sicherheitsgerichtet. Die Abgrenzung des WG-ss ist von der standortspezifisch gewählten geologischen Konzeptualisierung abhängig (Kapitel 3.1 und 3.2). Das ENSI hat die für die jeweiligen Indikatoren gewählten Bewertungsobjekte und –skalen geprüft. Entsprechende Erläuterungen des ENSI zu seiner Beurteilung und die fachliche Begründung für die Anpassungen bei der Wahl der Bewertungsskalen bzw. der -objekte werden in den Kapiteln 5.3 und 6.1 und sowie in ENSI 33/539 diskutiert. Die Wahl der Bewertungsobjekte kann aus den Tabellen in Kapitel 5.3 entnommen werden.

Nach Ansicht des ENSI hat die Nagra bei der Bewertung der Indikatoren, Kriterien und Kriteriengruppen die Vorgaben des ENSI für Etappe 2 SGT adäquat und stufengerecht berücksichtigt. Das ENSI kommt zum Schluss, dass der Abstand der numerischen Werte von 0.2 angesichts der mehrheitlich bestehenden Ungewissheiten und Variabilitäten zu fein abgestuft ist. Deshalb beschränkt sich die Beurteilung des ENSI jeweils auf die Ebene der Bewertungsstufen (z. B. 4.5 oder 3.5).

Das ENSI erachtet die Aggregation der Bewertungen auf Ebene der Kriterien, der Kriteriengruppen und der Gesamtbewertung mittels gleichgewichteter arithmetischer Mittelung als stufengerecht, da dieses Vorgehen den Vergleich mit den Resultaten aus Etappe 1 SGT erlaubt. Die Kompensierbarkeit und Unabhängigkeit der

Indikatoren wird bei der Identifikation eindeutiger Nachteile stärker berücksichtigt (Kapitel 6). Aus Sicht des ENSI wurden seitens Nagra die Vorgaben aus ENSI 33/075 erfüllt.

4.5 Sicherheitstechnischer Vergleich der geologischen Standortgebiete

Gemäss ENSI 33/075 kann in Etappe 2 SGT ein Standortgebiet zurückgestellt werden, falls anhand der Kriterien zu Sicherheit und technischer Machbarkeit belastbare eindeutige Nachteile gegenüber den anderen Standortgebieten festgestellt werden. Die Nagra hat aufzuzeigen, welche sicherheitstechnischen Indikatoren besondere Bedeutung für die Langzeitsicherheit und die technische Machbarkeit haben und wie die eindeutigen Nachteile erfasst, beurteilt und in ihrem Vorschlag der geologischen Standortgebiete berücksichtigt werden. Sie hat gemäss ENSI 33/154 anhand mindestens folgender entscheidrelevanter Merkmale (EM) zu beurteilen und zu begründen:

- a) die Wirksamkeit der geologischen Barriere,
- b) die Langzeitstabilität der geologischen Barriere,
- c) die Explorier- und Charakterisierbarkeit der geologischen Barriere im Standortgebiet,
- d) die bautechnische Machbarkeit eines Tiefenlagers unter Berücksichtigung der vorgeschlagenen Standortareale.

Die Nagra kann für ihren sicherheitstechnischen Vergleich weitere entscheidrelevante Merkmale bezeichnen.

Im Schritt 5 werden zunächst eindeutige Nachteile anhand der entscheidrelevanten Merkmale und entscheidrelevanten Indikatoren identifiziert. Anschliessend erfolgen der sicherheitstechnische Vergleich und die vergleichende Gesamtbewertung der geologischen Standortgebiete bzw. der zugehörigen Lagerperimeter. Die verschiedenen Teilergebnisse bilden die Grundlage für den Einengungsentscheid.

Identifikation eindeutiger Nachteile anhand entscheidrelevanter Merkmale und Indikatoren

Angaben der Nagra

Die Bewertung der durch ENSI 33/154 vorgegebenen entscheidrelevanten Merkmale geschieht durch Aggregation der Bewertungen der zugehörigen entscheidrelevanten Indikatoren, wobei die Bewertungen unverändert aus der qualitativen Bewertung übernommen werden. Aufgrund seiner grossen Bedeutung für die Barrierenwirksamkeit und für die Langzeitstabilität wird der Indikator «Selbstabdichtungsvermögen» zwei Merkmalen als entscheidrelevant zugeordnet (NTB 14-01). Die Indikatoren innerhalb der vier entscheidrelevanten Merkmale werden wie folgt aggregiert:

Bei den Merkmalen «Wirksamkeit der geologischen Barriere» und «Explorier- und Charakterisierbarkeit der geologischen Barriere im Standortgebiet» werden die Bewertungen der zugehörigen Indikatoren jeweils durch arithmetische, gleich gewichtete Mittelung aggregiert, weil die entsprechenden Indikatoren kompensierbare Beiträge zum übergeordneten Merkmal leisten. Bei den Merkmalen «Langzeitstabilität der geologischen Barriere» und «Bautechnische Machbarkeit eines Tiefenlagers unter Berücksichtigung der vorgeschlagenen Standortareale» wird jeweils das Minimum der Bewertungen der zugehörigen Indikatoren übernommen, weil die zugehörigen Indikatoren nicht-kompensierbare Beiträge zum übergeordneten Merkmal leisten.

Liegt die Bewertung eines Lagerperimeters für ein entscheidrelevantes Merkmal oder für einen zugehörigen Indikator um mindestens zwei Bewertungsstufen tiefer als die Bewertung der anderen Lagerperimeter für dasselbe Merkmal oder für denselben Indikator, so wird dies als Hinweis auf einen eindeutigen Nachteil interpretiert; liegt die Bewertung nur um eine Bewertungsstufe tiefer, so besteht ein Hinweis auf einen vertieft zu prüfenden Nachteil (NTB 14-01). In jedem Fall wird argumentativ dargelegt, welche dieser Hinweise tatsächlich als eindeutige Nachteile eingestuft werden.

Bei der Identifikation von eindeutigen Nachteilen wird zusätzlich für jedes Standortgebiet überprüft, ob die für den mLE bzw. für den mFE identifizierten Hinweise auf eindeutige Nachteile auch dann Bestand haben, wenn alternative Annahmen bei der Abgrenzung der Lagerperimeter bzw. alternative Konzeptualisierungen der Rahmengesteine betrachtet werden (NAB 17-01, Frage 50).

Für den Vergleich der Standortgebiete bezüglich der entscheidungsrelevanten Indikatoren bzw. Merkmale werden drei verschiedene Verfahren verwendet. Dabei wird dem «direkten Vergleich der Bewertungen» die höchste Bedeutung gegeben; das «Outranking» und die «Malus-Bilanzierung» werden verwendet, um allenfalls vorhandene zusätzliche Hinweise auf eindeutige Nachteile zu identifizieren und zu überprüfen, ob diese gegebenenfalls als eindeutige Nachteile einzustufen sind (NTB 14-01).

Beurteilung des ENSI

Das ENSI erachtet es als zielführend, dass für die Identifikation von eindeutigen Nachteilen dieselben Bewertungen wie für die Indikatoren bei der qualitativen Bewertung der Standortgebiete bzw. Lagerperimeter die Grundlage bilden und die eindeutigen Nachteile argumentativ begründet werden. Das ENSI erachtet die von der Nagra vollzogene Zuordnung der entscheidungsrelevanten Indikatoren zu den entscheidungsrelevanten Merkmalen als fachlich nachvollziehbar und stützt die doppelte Gewichtung des Indikators 22 «Selbstabdichtungsvermögen» aufgrund seiner Wichtigkeit sowohl für das entscheidungsrelevante Merkmal «Wirksamkeit der geologischen Barriere» als auch für das entscheidungsrelevante Merkmal «Langzeitstabilität». Aufgrund eigener Überlegungen berücksichtigt das ENSI für das entscheidungsrelevante Merkmal «Langzeitstabilität» zusätzlich die Indikatoren 29 «Auflockerungszone im Nahbereich der Untertagebauten» (Kapitel 6.1) und 31 «Verhalten des Wirtgesteins bzgl. Gas» (Kapitel 6.1). Die von der Nagra gewählten Ansätze zur Aggregation erachtet das ENSI und sein Experte (ENSI 33/465) als zielführend.

Während die Nagra den Begriff «Schwäche» für die beiden schlechtesten Bewertungsstufen («bedingt günstig» und «ungünstig») verwendet, verwendet das ENSI diesen Begriff im relativen Sinne, d. h. gegenüber den besten Bewertungen.

Das ENSI erachtet es als zielführend, dass die Nagra eindeutige Nachteile argumentativ identifiziert und folgt diesem Vorgehen. Ausserdem beurteilt es das ENSI als sicherheitsgerichtet dafür die alternativen Lagerperimeter mit einzubeziehen.

Die Diversität der gewählten methodischen Verfahren («direkter Vergleich der Bewertungen», «Outranking» und «Malus-Bilanzierung») zum Vergleich der Standortgebiete bezüglich der entscheidungsrelevanten Indikatoren bzw. Merkmale ist sinnvoll (ENSI 33/465). Die Anwendung komplexerer Methoden wäre angesichts der Ungewissheiten und des gegenwärtigen Wissensstands zu den relevanten Indikatoren nicht stufengerecht. Die von der Nagra festgelegte Unterscheidung zwischen einem Hinweis auf einen eindeutigen Nachteil bzw. Hinweis auf einen vertieft zu prüfenden Nachteil erfolgt aus Sicht des ENSI subjektiv auf Basis einer Experteneinschätzung (NAB 17-01, Frage 51). Da die Identifizierung von eindeutigen Nachteilen durch die Nagra argumentativ erfolgt, erachtet das ENSI dieses Vorgehen als zielführend. Das ENSI übernimmt diese Unterscheidung nicht, sondern prüft alle Bewertungsunterschiede zum bestbewerteten Standortgebiet einheitlich auf eindeutige Nachteile. Abschliessend identifiziert das ENSI analog zur Nagra die eindeutigen Nachteile unter Berücksichtigung von Expertenwissen argumentativ.

Sicherheitstechnischer Vergleich und vergleichende Gesamtbewertung

Die Nagra hat für den Vorschlag von mindestens zwei Standortgebieten je für HAA und SMA zu zeigen, dass ihre sicherheitstechnischen Aussagen unter Berücksichtigung der bestehenden Variabilitäten und Ungewissheiten in Daten und Prozessen belastbar sind. Gemäss ENSI 33/154 können in Etappe 2 SGT Standortgebiete nur dann zurückgestellt werden, falls folgende Fragen mindestens einmal belastbar mit «Ja» beantwortet werden:

- 1) Erfüllen Standortgebiete das Dosis-Schutzkriterium nicht?
- 2) Sind Standortgebiete aufgrund der Ergebnisse der Dosisberechnungen eindeutig weniger geeignet?
- 3) Sind die Gesamtbewertungen der Standortgebiete schlechter als «geeignet»?
- 4) Können bei Standortgebieten anhand der Kriterien zu Sicherheit und technischen Machbarkeit belastbare eindeutige Nachteile gegenüber anderen Standortgebieten festgestellt werden?

Angaben der Nagra

Für den sicherheitstechnischen Vergleich bzw. die vergleichende Gesamtbewertung werden die Ergebnisse aller Bewertungsschritte (Schritt 2 bis 5) hinsichtlich der Frage ausgewertet, welche geologischen Standortgebiete in der Gesamtschau am ungünstigsten abschneiden und deshalb zurückzustellen sind. Zu diesem Zweck werden die vier in ENSI 33/154 aufgeführten Fragen verwendet.

Beurteilung des ENSI

Nach Ansicht des ENSI erfüllt die Nagra mit dem angewandten Vorgehen grundsätzlich die behördlichen Vorgaben. Deren Umsetzung beurteilt das ENSI als transparent und aus methodischer Sicht nachvollziehbar.

Gemäss den Anforderungen an den sicherheitstechnischen Vergleich bzw. die vergleichende Gesamtbewertung (ENSI 33/075; ENSI 33/154) kann ein Standortgebiet zurückgestellt werden, falls eindeutige Nachteile gegenüber den anderen Standortgebieten festgestellt werden (Kapitel 6.1). Eine Zurückstellung ist jedoch nicht zwingend erforderlich.

Um die Robustheit der qualitativen Bewertung der Standortgebiete bzw. Lagerperimeter zu prüfen, hat das ENSI verschiedene Verfahrensweisen zum Vergleich der Lagerperimeter getestet (z. B. der Einfluss von Rundungen bei der Bewertung der Indikatoren sowie alternative Methoden aus ENSI 33/142). Die durchgeführten Robustheitstests führen zu sehr ähnlichen Ergebnissen und zeigen, dass die Entscheidung für das Zurückstellen eines Standortgebiets in erster Linie von den qualitativen Bewertungen selbst abhängt.



5 Abgrenzung optimierter Lagerperimeter – Beurteilung und Bewertung

5.1 Abgrenzung optimierter Lagerperimeter in den geologischen Standortgebieten

Ausgehend von den in Etappe 1 SGT abgegrenzten geologischen Standortgebieten und abgestützt auf die Mindest- (MA) und verschärften Anforderungen (VA) gemäss NTB 08-05, definiert die Nagra in Etappe 2 SGT gemäss den Vorgaben in ENSI 33/154 für jedes Standortgebiet in einem ersten Teilschritt untertägige Lagerperimeter. Diese aktualisieren die bevorzugten Bereiche aus Etappe 1 SGT unter Berücksichtigung der neuen Datengrundlage. Im zweiten Teilschritt werden die Anforderungen an sechs ausgewählte, flächenwirksame Indikatoren (Tabelle 5) im Sinne einer Optimierung teilweise weiter verschärft. Die resultierenden Bereiche werden als optimierte untertägige Lagerperimeter bezeichnet und im NTB 14-01 dargestellt.

Das ENSI geht zunächst auf den Teilschritt 1 und die für die Abgrenzung verwendeten Daten und Indikatoren ein (Kapitel 5.1.1). Darauf aufbauend werden im Teilschritt 2 die verschiedenen Prozesse der Optimierung der Lagerperimeter beurteilt (Kapitel 5.1.2) und abschliessend die GIS-Schneideprozesse und die daraus resultierenden optimierten untertägigen Lagerperimeter für die Standortgebiete dargestellt und kommentiert (Kapitel 5.1.3).

5.1.1 Abgrenzung untertägiger Lagerperimeter anhand von Mindest- und verschärften Anforderungen

Angaben der Nagra

Im ersten Teilschritt der Abgrenzung der Lagerperimeter werden für jedes geologische Standortgebiet Lagerperimeter abgegrenzt, bei denen unter Verwendung der neuen Daten und Erkenntnisse die MA und VA an die relevanten Indikatoren (NTB 14-01) gemäss Etappe 1 SGT (NTB 08-05) berücksichtigt werden. Die Abgrenzung der Lagerperimeter berücksichtigt die Indikatoren, die für die Sicherheit und technische Machbarkeit des geologischen Tiefenlagers besonders wichtig sind und einen ausgeprägten flächenwirksamen Bezug aufweisen (NTB 14-01). Die folgenden Ausführungen gelten für die geologischen Standortgebiete in der Nordschweiz. Sinngemäss übertragen ist das Vorgehen auch im Standortgebiet Wellenberg anwendbar.

Im Unterschied zu Etappe 1 SGT werden zur Abgrenzung der Lagerperimeter einige Indikatoren modifiziert oder nicht mehr berücksichtigt. Die Ergebnisse der 2D-Seismik ermöglichen es, in den Teilgebieten, die früher als «diffus gestörte Zonen» klassifiziert wurden, neu zwischen ungestörten Zonen, regionalen Störungszonen und zu meidenden tektonischen Zonen zu differenzieren. In Etappe 1 SGT wurde mit der betreffenden VA die Randzone des Hegau-Bodensee-Grabens gemieden. Weil die geologischen Standortgebiete in Etappe 2 SGT ausserhalb dieser Randzone liegen, ist der mit dieser Zone assoziierte Indikator «Tektonisches Regime (konzeptionell zu meidende Zone)» hinfällig. Ferner wurde der Indikator «Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf flächenhafte Erosion» durch den Indikator «Tiefenlage unter lokaler Erosionsbasis im Hinblick auf die Bildung neuer Rinnen» ersetzt, um die lokalen Erosionsverhältnisse (insbesondere die Bildung neuer Durchbruchsrinnen) differenzierter zu berücksichtigen.

Nach der Durchführung des GIS-Schneideprozesses in Teilschritt 1 wird geprüft, ob die resultierenden Gebiete die Anforderung bezüglich des Platzangebots und die MA für eine Gruppe von sechs Indikatoren erfüllen (NTB 14-01). Insgesamt zeigt sich für alle geologischen Standortgebiete, dass die Abgrenzung der bevorzugten Bereiche aus Etappe 1 SGT unter Berücksichtigung neuer geologischer Erkenntnisse genügend gross ausgedehnt wurde. Entsprechend erfüllen alle Standortgebiete diese Anforderungen und qualifizieren sich deren Lagerperimeter für die nachfolgende Optimierung.

Anschliessend werden für die so abgegrenzten Lagerperimeter mögliche Schwachpunkte identifiziert und damit die Grundlage für die Festlegung der Optimierungsstrategie gelegt: Die HAA- und SMA-Standortgebiete für Zürich Nordost, Nördlich Lägern, Jura Ost und der SMA-Standortgebiete für Jura-Südfuss zeigen lokal klare Anzeichen einer tektonischen Überprägung, die neu als zu meidende tektonische Zonen definiert werden (Optimierung bzgl. zu meidender tektonischer Zonen). In den SMA-Standortgebieten Südranden und Jura Ost

sowie in den HAA-Standortgebieten Zürich Nordost und Jura Ost ist aufgrund der relativ geringen Tiefenlage der Wirtgesteine die Optimierung bzgl. «Maximierung der minimalen Tiefenlage» eingeschränkt. Für die SMA- und HAA-Standortgebiete Zürich Nordost und Nördlich Lägern sowie für das SMA-Standortgebiet Jura-Südfuss erachtet die Nagra eine Optimierung hinsichtlich grösserer Tiefenlagen aufgrund geotechnisch ungünstiger Bedingungen als kritisch (Optimierung bzgl. «Minimierung der maximalen Tiefenlage der Lagerebene»). In jedem Fall muss die Optimierungsanforderung an den Indikator «Platzangebot untertags» unter Berücksichtigung der erforderlichen Platz-Reserven erfüllt sein. Diese ist standortspezifisch, um auch in denjenigen geologischen Standortgebieten mit einer höheren Dichte an Störungszonen und bei ungünstigen gebirgsmechanischen Bedingungen ausreichende Reserven im Platzangebot zu gewährleisten. Bei der Evaluation der Schwachpunkte werden auch die Variabilitäten und Ungewissheiten berücksichtigt.

Im Rahmen der Zusatzdokumentation zur Nachforderung des ENSI (ENSI 33/476) hat die Nagra neben der Nachlieferung von weiteren Unterlagen zur maximalen Tiefenlage auch geprüft, welche Auswirkungen die Lockerung der Optimierungsanforderung bezüglich maximaler Tiefenlage auf die Abgrenzung der Lagerperimeter hat und ob es unter Berücksichtigung weiterer Aspekte (z. B. Schutz vor Erosion, Berücksichtigung geodynamischer Modellvorstellungen) sinnvoll ist, zusätzliche Lagerperimeter abzugrenzen. Eine solche Lockerung der Anforderungen an die maximale Tiefenlage ist möglich, weil auch in Tiefen bis 800 bzw. 900 m u. T. ein sicheres Lager erstellt werden kann (NAB 16-41).

Beurteilung des ENSI

Das ENSI erachtet das Vorgehen der Nagra (NTB 14-01; NAB 16-41) zur Optimierung der räumlichen Konfiguration der Lagerperimeter als sicherheitsgerichtet. Die Auswahl der zur Abgrenzung verwendeten Indikatoren ist zielführend (Kapitel 4). Gegenüber Etappe 1 SGT hat die Nagra einzelne raumwirksame Indikatoren entweder nicht mehr berücksichtigt oder neu eingeführt. Das ENSI erachtet es als zielführend, in Etappe 2 SGT anstatt des Indikators 38 «Diffus gestörte Zonen» den Indikator 6 «Regionale tektonische Elemente a) Abstand zu regionalen Störungszonen, b) Zu meidende tektonische Zone» zu verwenden, um zwischen den unterschiedlichen tektonischen Überprägungen zu differenzieren. Da alle geologischen Standortgebiete ausserhalb der Randzone des Hegau-Bodensee-Grabens liegen, ist das ENSI damit einverstanden, den Indikator 45 «Tektonisches Regime» aus Etappe 1 SGT zur Abgrenzung der Lagerperimeter nicht mehr aufzuführen. Ferner erachtet das ENSI den neuen Indikator 3 «Tiefenlage unter lokaler Erosionsbasis im Hinblick auf die Bildung neuer Rinnen», welcher den Indikator «Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf flächenhafte Erosion» aus Etappe 1 SGT ersetzt, grundsätzlich als sinnvoll. Für diesen Indikator werden jedoch keine MA oder VA definiert.

Die in Etappe 2 SGT verwendeten Indikatoren, für welche MA und/oder VA gelten oder welche für die Optimierung der Lagerperimeter in Teilschritt 2 und für das GIS-Schneiderverfahren herangezogen werden, sind in Tabelle 5 aufgelistet.

Tabelle 5: Liste der für die Abgrenzung der optimierten untertägigen Lagerperimeter in Teilschritt 2 verwendeten flächenwirksamen Indikatoren in Etappe 2 SGT (NTB 14-01, Tabelle 2.3-5) sowie deren Beurteilung durch das ENSI hinsichtlich der Erfüllung der MA und VA (Abkürzungen siehe Glossar).

I-Nr.		Abgrenzung LP			GIS	Beurteilung der MA und VA durch das ENSI
		MA	VA	OA		
1	Tiefenlage im Hinblick auf bautechnische Machbarkeit (u. B. Gesteinsfestigkeiten und Verformungseigenschaften)	x	x	x	x	Im Standortgebiet WLB erfüllen die tieferen Lagerebenen auf 200 bzw. 400 m ü. M. die MA nicht.
2	Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf Gesteinsdekompression	x	x	x	x	MA und VA erfüllt.
3	Tiefenlage unter lokaler Erosionsbasis im Hinblick auf die Bildung neuer Rinnen			x	x	keine MA und VA definiert.
4	Tiefenlage unter Fels im Hinblick auf glaziale Tiefenerosion	x	x	x	x	MA erfüllt. Unter Berücksichtigung des im NAB 17-01 (Frage 81) dokumentierten alternativen Lagerperimeter HAA-ZNO-aL506-r werden die VA erfüllt.
5	Mächtigkeit	x	x		x	Im Standortgebiet JS erfüllen die Wirtgesteine OPA und EFF die MA nicht.
6	Regionale tektonische Elemente	x		x	x	MA erfüllt.
8	Platzangebot untertags		x	x	x	Unter Berücksichtigung der in NAB 16-41 gewählten alternativen Lagerperimeter (SMA-NL-OPA-aL1-r, SMA-NL-BD-mLE-r und HAA-NL-OPA-aL1-r) werden die VA erfüllt.

Für das SMA-Standortgebiet Wellenberg wird die MA hinsichtlich der maximalen Tiefenlage unter Terrain (Indikator 1) für die Lagerebenen auf 400 und 200 m ü. M. (935 und 1139 m u. T.) formal nicht eingehalten (Kapitel 5.3, Indikator 1). Allerdings ist auch das ENSI aufgrund der Angaben der Nagra im NAB 14-81, NTB 14-01 und NAB 17-01 (Frage 79) der Ansicht, dass die Erstellung der Lagerkammer in den Mergel-Formationen des Helvetikums auch in grösseren Tiefen als 800 m u. T. grundsätzlich bautechnisch machbar ist (Kapitel 2.10), was aufgrund dieses Indikators nicht zum Ausschluss des Standortgebiets (Kapitel 6.1.4) führt.

Im Standortgebiet Jura-Südfuss werden die Rahmengesteine des Opalinustons im plausiblen Fall (Referenzfall) sowohl vom ENSI als auch von der Nagra als nicht barrierenwirksam angesehen (Kapitel 3.2, Kapitel 5.3.1). Für das Wirtgestein Effinger Schichten im Standortgebiet Jura-Südfuss stellen die «harten Bänke» nach Ansicht des ENSI auch bei einer günstigen Konzeptualisierung anzunehmende Freisetzungspunkte dar (Kapitel 3.2, Kapitel 5.3.1) und müssen deshalb ebenfalls als nicht barrierenwirksam angesehen werden. Hierdurch werden die MA des Indikators 5 «Mächtigkeit» für die Wirtgesteine Opalinuston und für die KMA-5 der Effinger Schichten (Abbildung 7) nicht erfüllt. Diese abweichenden Beurteilungen gegenüber Etappe 1 SGT erfolgen aufgrund neuer Daten (z. B. NAB 14-101; NAB 14-95; NAB 13-16; NAB 14-12) sowie der vertieften Neubeurteilung der umfassenden Datengrundlage im Hinblick auf den Vergleich der Standortgebiete in Etappe 2 SGT durch das ENSI.

Trotz nicht erfüllten MA beurteilt das ENSI die betroffenen Lagerperimeter SMA-WLB-MGL, SMA-JS-OPA und SMA-JS-EFF auch in den Folgeschritten der Einengung (Optimierung, Bewertung, Vergleich), um einen Gesamtvergleich aller betrachteten Standortgebiete zu ermöglichen. Das ENSI berücksichtigt die nicht erfüllten MA bei der Bewertung der Lagerperimeter sowie im sicherheitstechnischen Vergleich entsprechend.

In dem von der Nagra für das HAA-Standortgebiet Zürich Nordost als massgebend bezeichneten Lagerperimeter HAA-ZNO-mLE-r werden die VA des Indikators 4 «Tiefenlage unter Fels im Hinblick auf glaziale Tiefenerosion» bei Anwendung der ENSI-Definition von glazial übertieften Felsrinnen nicht erfüllt. Rinnen, deren Felsoberfläche unter die lokale Erosionsbasis reicht, werden in Etappe 2 SGT vom ENSI als glazial übertiefte Rinnen eingestuft. Auch bei Anwendung der Definition gemäss Etappe 1 SGT, d. h. glazial übertieften Felsrinnen liegen dort vor, wo die Quartärmächtigkeit mehr als 100 m beträgt, werden die VA des Indikators 4 verletzt. Das ENSI hat deshalb die Nagra aufgefordert, einen Lagerperimeter zu bezeichnen, welcher die Anforderungen des ENSI bezüglich des Indikators 4 erfüllt. Die Nagra hat in ihrer Antwort auf Frage 81 im NAB 17-01 einen Lagerperimeter HAA-ZNO-aL506-r mit einer maximalen Tiefenlage der Lagerebene von 800 m u.T. definiert. Dieser tieferliegende Lagerperimeter erfüllt die an den Indikator 4 gestellten Mindest- und verschärften Anforderungen.

Nach Ansicht des ENSI erfüllen die Indikatoren 13 «Redox-Bedingungen», 27 «Potenzial zur Bildung neuer Wasserwegsamkeiten (Verkarstung)», 34 «Rohstoffvorkommen unterhalb des Wirtgesteins», 36 «Mineral- und Thermalwassernutzungen», 44 «Explorationsbedingungen an Oberfläche» und 49 «Natürliche Gasführung (im Wirtgestein)» die MA und haben gegenwärtig keinen Einfluss auf die Abgrenzung optimierter Lagerperimeter in den geologischen Standortgebieten. Diesbezügliche Erläuterungen finden sich in ENSI 33/539.

Die nicht erfüllten MA bzw. VA stehen im Zusammenhang mit neuen Erkenntnissen (SMA-WLB-MGL), angepasster Methodik (HAA-ZNO) sowie Konzeptualisierungen (SMA-JS-OPA und SMA-JS-EFF). Bei der Abgrenzung von Lagerperimetern gilt es zu berücksichtigen, dass diese die Anforderungen bzgl. «Platzangebot untertags» erfüllen. Entsprechende Abweichungen beim Vorgehen nimmt das ENSI zur Kenntnis und berücksichtigt diese bei der qualitativen Bewertung des Lagerperimeters. Unter diesem Aspekt ist die in Teilschritt 1 erfolgte Abgrenzung der Lagerperimeter aus Sicht des ENSI inhaltlich nachvollziehbar und grundsätzlich plausibel.

5.1.2 Anforderungen an die Optimierung der untertägigen Lagerperimeter

Angaben der Nagra

Der zweite Teilschritt der Abgrenzung der Lagerperimeter hat zum Ziel, die vorgängig identifizierten Schwächen der untertägigen Lagerperimeter abzubauen und dadurch besonders günstige Konfigurationen der Wirtgesteine innerhalb der geologischen Standortgebiete zu identifizieren (NTB 14-01). Die in Etappe 1 SGT für die ausgewählten, flächenwirksamen Indikatoren (Tabelle 5) verwendeten MA und VA werden von der Nagra bei der Optimierung teilweise weiter verschärft und angepasst (Optimierungsanforderungen, OA). Dabei werden in jedem geologischen Standortgebiet bei Bedarf verschiedene Konzeptualisierungen betrachtet, nämlich eine Referenz-Konzeptualisierung und alternative (ungünstige und/oder günstige) Konzeptualisierungen. Konkret erfolgt die Optimierung der Lagerperimeter, indem im GIS-Schneideprozess die Anforderungen je nach Bedarf für eine oder mehrere Konzeptualisierungen für die folgenden fünf Indikatoren unter Berücksichtigung eines genügenden Platzbedarfs erhöht werden:

- Indikator 1 «Tiefenlage im Hinblick auf bautechnische Machbarkeit (u. B. Gesteinsfestigkeiten und Verformungseigenschaften)»,
- Indikator 2 «Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf Gesteins-Dekompaktion»,
- Indikator 3 «Tiefenlage unter lokaler Erosionsbasis im Hinblick auf die Bildung neuer Rinnen»,
- Indikator 4 «Tiefenlage unter Fels im Hinblick auf glaziale Tiefenerosion» sowie
- Indikator 6 «Regionale tektonische Elemente: a) Abstand zu regionalen Störungszonen, b) Zu meidende tektonische Zonen».

Während den zu meidenden tektonischen Zonen bei der Optimierung immer ausgewichen wird, verläuft die standortspezifische Optimierung der vier Indikatoren zur Tiefenlage schrittweise mit dem Ziel, eine ausgewogene Bewertung zu erreichen. In jedem Fall muss die Optimierungsanforderung an den Indikator 8 «Platzangebot untertags» unter Berücksichtigung der erforderlichen Platzreserven erfüllt sein (NTB 14-01; NAB 16-41).

Zur Untersuchung der Sensitivität der Entscheide bezüglich der verschiedenen Optimierungsmöglichkeiten werden für jedes geologische Standortgebiet mehrere Lagerperimeter abgegrenzt (NTB 14-01), wobei der als «massgebender Lagerperimeter für die Einengung» (mLE) bezeichnete Lagerperimeter den Ausgangspunkt für den sicherheitstechnischen Vergleich der Nagra bildet. Die anderen durch Berücksichtigung alternativer Konzeptualisierungen und/oder alternativer Optimierungsanforderungen abgegrenzten Lagerperimeter (alternative Lagerperimeter) werden für die Untersuchung der Sensitivität und Robustheit verwendet und bei Bedarf punktuell auch bei der Entscheidungsfindung berücksichtigt. Die für die alternativen Lagerperimeter massgebenden konzeptuellen Ungewissheiten betreffen

- die Modellvorstellungen zur Erosion (speziell die Bildung von Durchbruchsrinnen),
- die Tiefenlage (Ungewissheiten in der Tiefenlage des prioritären Wirtgesteins),
- die Lockerung der Anforderungen an die minimale (Erosion) und maximale (bautechnische Machbarkeit) Tiefenlage und
- die Wirtgesteinsabgrenzung (ohne Berücksichtigung der tertiären Schiefer der Axen-Decke für den Lagerperimeter Wellenberg).

Die optimierten Lagerperimeter werden abschliessend mit Expertenwissen geprüft und bei Bedarf noch spezifisch bezüglich raumwirksamer Elemente, die nicht systematisch mittels GIS-Verfahren erfasst werden können, angepasst. Im Fall des Standortgebiets Zürich Nordost wird dabei das auf der 3D-Seismik im Zürcher Weinland (NTB 00-03) basierende detaillierte Störungsinventar berücksichtigt und es werden lokale Störungszonen und Gebiete unruhiger Schichtlagerung gemieden. Im Standortgebiet Jura-Südfuss werden damit ungünstige Situationen bezüglich Explorierbarkeit (westlicher Teil im Bereich Bahnhof Olten) vermieden. Bei sehr grossen Lagerperimetern (SMA-ZNO-OPA und SMA-JO-OPA) wird zudem modellhaft aufgezeigt, wie diese genutzt werden könnten (z. B. im Hinblick auf ein Kombilager). Die so weiter optimierten Lagerperimeter werden als «modellhaft modifiziert» bzw. «manuell angepasst» bezeichnet (NTB 14-01).

Für die in Etappe 2 SGT durchgeführte Abgrenzung der Lagerperimeter im Standortgebiet Wellenberg werden die Lagerebenen 540 m ü. M., 400 m ü. M. und 200 m ü. M. bzw. 743 m u. T., 935 m u. T. und 1139 m u. T., verwendet (NTB 14-01). Diese Anordnung des Lagers auf mehreren Ebenen wurde bereits in Etappe 1 SGT vorgesehen. Wegen Ungewissheiten in der Lage der Felsoberfläche in 100 000 Jahren werden drei Erosionsszenarien betrachtet: Übertiefung um 50 m und verstärkte Tiefenerosion mit 100 m bzw. 200 m. Da auch bezüglich der Barrierenqualität des tertiären Schiefer der Axen-Decke Ungewissheiten bestehen, wird in einer alternativen Abgrenzung untersucht, ob die Platzverhältnisse auch ohne Nutzung des Tertiärs als Wirtgestein ausreichen. Es zeigt sich (NTB 14-01), dass die erforderliche Fläche für die Lagerperimeter bei Einhaltung der erwünschten Überdeckung eigentlich nur erreicht wird, wenn sowohl die Ebene 400 m ü. M. (935 m u. T.) als auch die Ebene 200 m ü. M. (1139 m u. T.) verwendet werden. Die Lagerebene 540 m ü. M. (743 m u. T.) würde wegen der beschränkten Überdeckung nur für Abfälle mit vergleichsweise kleinem Nuklidinventar verwendet werden (NTB 14-01).

Alle abgegrenzten Lagerperimeter mit ausreichendem Platzangebot sowie ohne (erwartete) deutlich schlechtere Bewertung im Quervergleich werden für die Einengung berücksichtigt (NAB 17-01, Frage 62; NTB 14-01 bzw. bzgl. alternativer Lagerperimeter Anhang C). Die von der Nagra auf Rückfrage des ENSI abgegrenzten optimierten Lagerperimeter für die Wirtgesteine 'Brauner Dogger' und Effinger Schichten sind im NAB 17-01, Frage 47 dokumentiert und bewertet. Der ebenfalls auf Nachfrage des ENSI abgegrenzte alternative Lagerperimeter HAA-ZNO-aL506-r ist in der Antwort zu Frage 81 im NAB 17-01 dokumentiert und bewertet.

Beurteilung des ENSI

Das ENSI erachtet das Vorgehen der Nagra zur Optimierung der räumlichen Konfiguration der Lagerperimeter unter Berücksichtigung der Zusatzdokumentation im Rahmen der Nachforderung des ENSI (ENSI 33/476) und dem NAB 17-01 als sicherheitsgerichtet. Die Auswahl der zur Abgrenzung verwendeten Indikatoren ist zielführend. Nachfolgend werden für alle im GIS-Schneidprozess berücksichtigten Indikatoren die Abgrenzung der massgebenden Lagerperimeter für die Einengung, die Abgrenzung alternativer Lagerperimeter, die Optimierungsziele sowie deren speziellen Eigenschaften und Ungewissheiten diskutiert.

Indikator 1: Tiefenlage im Hinblick auf bautechnische Machbarkeit (unter Berücksichtigung von Gesteinsfestigkeiten und Verformungseigenschaften)

Angaben der Nagra

Die maximale Tiefenlage der Lagerebene ist massgebend für die Beurteilung der geotechnischen Bedingungen und die damit verbundene mögliche Schädigung der geologischen und technischen Barrieren (NTB 14-01). Im Rahmen der Abgrenzung der Lagerperimeter in der Nordschweiz wird angestrebt, die Tiefe der Lagerebene auf 600 m u. T. (SMA-Lager) bzw. 700 m u. T. (HAA-Lager) zu beschränken (Optimierungsanforderungen, NAB 14-81). Aufbauend auf diesen Optimierungsanforderungen wurden im NTB 14-01 optimierte Lagerperimeter abgegrenzt.

Aufgrund der Nachforderung des ENSI (ENSI 33/476) wird im NAB 16-41 die Abgrenzung von Lagerperimetern in der Nordschweiz gegenüber den Angaben im NTB 14-01 erweitert, wo dies sinnvoll ist. Im Sinne einer Sensitivitätsanalyse werden ergänzend zu den bestehenden Lagerperimetern zusätzliche Lagerperimeter abgegrenzt, wobei die Anforderungen an die maximale Tiefenlage (max. 900 m u. T. beim HAA-Lager bzw. max. 800 m u. T. beim SMA-Lager) gelockert bzw. die ausgewiesenen zu meidenden tektonischen Zonen nicht berücksichtigt werden. Diese Prüfung der Lagerperimeter für das HAA-Lager in den Standortgebieten Zürich Nordost, Nördlich Lägern und Jura Ost und für das SMA-Lager in Nördlich Lägern hat zur Abgrenzung von zusätzlichen Lagerperimetern im Hinblick auf eine breitere Diskussion geführt.

Die Evaluation der Lagerperimeter für das HAA-Lager in den HAA-Standortgebieten Zürich Nordost und Jura Ost sowie für das SMA-Lager in den SMA-Standortgebieten Südranden, Zürich Nordost, Jura Ost und Jura-Südfuss im Rahmen der Nachforderung führt gegenüber NTB 14-01 zu keiner Neuurteilung der dort aufgeführten Lagerperimeter. Die maximale Tiefe der Lagerebene in den relevanten Lagerperimetern ist aus Sicht der Bautechnik machbar (NTB 14-01; NAB 16-41). Einzig im Standortgebiet Nördlich Lägern (NL) hat die Prüfung zur Abgrenzung eines neuen massgebenden Lagerperimeters für die Einengung für HAA- und SMA-Lager geführt (NAB 16-41), wobei neu von maximalen Tiefenlagen von 850 m u. T. bzw. 800 m u. T. ausgegangen wird. Im Gegensatz zu dem im NTB 14-01 für die Einengung verwendeten Lagerperimeter HAA-NL-mLE-r und SMA-NL-mLE-r erfüllen die Lagerperimeter HAA-NL-aL1-r und SMA-NL-aL1-r die Anforderungen bezüglich Platzangebot besser.

Das Standortgebiet Wellenberg wird im Rahmen der Nachforderung nicht behandelt (NAB 16-41).

Der auf Nachfrage des ENSI (NAB 17-01, Frage 81) abgegrenzte alternative Lagerperimeter HAA-ZNO-aL506-r weist eine maximale Tiefe von 800 m u. T. auf.

Beurteilung des ENSI

Die Berücksichtigung der Tiefe der Lagerebene bei der Optimierung der räumlichen Abgrenzung der Lagerperimeter (NTB 14-01; NAB 16-41) ist nach Ansicht des ENSI grundsätzlich zweckmässig. Das ENSI beurteilt jedoch die von der Nagra angestrebten maximalen Tiefen der Lagerebene von 600 m u. T. (SMA-Lager) und 700 m u. T. (HAA-Lager) auf Basis der eingereichten Unterlagen, einschliesslich der im Rahmen der Nachforderung des ENSI eingereichten Zusatzdokumentation, als nicht ausreichend belastbar (Kapitel 2.9, 2.10 und 6.1.4).

Demzufolge ist bei der Abgrenzung der Lagerperimeter für das HAA-Lager und das SMA-Lager in den Standortgebieten der Nordschweiz von einer maximalen Tiefe von 900 m u. T. für HAA-Lager und 800 m u. T. für SMA-Lager gemäss den weiterhin gültigen Mindestanforderungen bzw. verschärften Anforderungen aus Etappe 1 SGT auszugehen. Nach Ansicht des ENSI erfüllen die beiden tieferen Lagerebenen im Standortgebiet Wellenberg die Mindestanforderungen bezüglich der maximalen Tiefenlage nicht. Um jedoch ein genügendes Platzangebot zur Verfügung zu stellen, erachtet das ENSI es ebenfalls als zweckmässig, im Standortgebiet Wellenberg Lagerperimeter unterhalb der Mindestanforderung von 800 m u. T. abzugrenzen, da die Erstellung von Lagerkammern in den Mergel-Formationen des Helvetikums nach Ansicht des ENSI auch in grösseren Tiefen grundsätzlich bautechnisch machbar ist (Kapitel 6.1.4).

Aufgrund der Beurteilung des ENSI ergeben sich für die maximale Tiefenlage unter Terrain für die Abgrenzung der Lagerperimeter SMA-NL-BD, SMA-NL-OPA, HAA-NL und HAA-ZNO gegen Süden, einschliesslich des auf Nachfrage des ENSI abgegrenzten alternativen Lagerperimeters HAA-ZNO-aL506-r (NAB 17-01, Frage 81) mit einer maximalen Tiefe von 800 m u. T., zusätzliche, potenziell nutzbare Flächen.

Indikator 2: Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf Gesteins-Dekompaktion

Angaben der Nagra

Hinsichtlich der Langzeitsicherheit eines geologischen Tiefenlagers sind Dekompaktionseffekte von besonderer Bedeutung, da sie allenfalls mit dem teilweisen Verlust der hydraulischen Barrierenfunktion der Wirtgesteine einhergehen (NTB 14-02-IV). Der Indikator 2 «Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf Gesteins-Dekompaktion» wird zur Abgrenzung optimierter Lagerperimeter verwendet (NTB 14-01). Bereiche mit sehr geringer Wirtgesteinsüberlagerung werden im Hinblick auf die zukünftige Erosion und die damit verbundene Dekompaktion nach Möglichkeit gemieden (NTB 14-02-III).

In Etappe 1 SGT bezogen sich die MA und VA für diesen Indikator auf den notwendigen einschlusswirksamen Gebirgsbereich (Wirtgestein und barrierenwirksame Rahmengesteine), wobei die Tiefenlage zum Zeitpunkt des Verschlusses des Lagers zugrunde gelegt und die flächenhafte Erosion durch einen weiteren Indikator gesondert erfasst wurden (NTB 08-05). In Etappe 2 SGT werden Erosionsprozesse bis zum Ende des Betrachtungszeitraums berücksichtigt und für die Standortgebiete der Nordschweiz bezieht sich der Indikator auf die Oberkante des Wirtgesteins, am Wellenberg auf die Lagerebene. Der Beurteilung der Dekompaktion dient die heutige Überdeckung (NTB 14-01), wobei die für Etappe 2 SGT modifizierten Bewertungsskalen (NTB 14-01; NAB 17-01, Frage 44) die Langzeitentwicklung berücksichtigen. Im Hinblick auf die zukünftige Erosion wird davon ausgegangen, dass die Abtragung der lokalen Topographie flächenhaft erfolgt und mit der Einschneidung der Hauptflüsse, d. h. einer Absenkung der lokalen Erosionsbasis, etwa Schritt hält (NTB 14-02-III).

Für das SMA-Lager ist zur Optimierung ein Wert für Top Wirtgestein von mindestens 350 m u. T. (Nordschweiz) bzw. 600 m u. T. (Wellenberg, Bezugsniveau Lagerebene) und für das HAA-Lager ein Wert von mindestens 450 m u. T. anzustreben, damit in der Nordschweiz neben dem Wirtgestein zusätzlich zumindest 50 m der oberen Rahmengesteine als Barriere nutzbar sind. Für diese Optimierungsanforderungen wird eine «sehr günstige» Bewertung erreicht (NTB 14-01).

Beurteilung des ENSI

Aus Sicht des ENSI ist es sinnvoll, den Indikator 2 in die Optimierung der Lagerperimeter einzubeziehen. Dekompaktion kann zu einem weitgehenden Verlust der Barrierenwirkung der Wirtgesteine führen, der nicht durch andere Prozesse kompensiert werden kann.

Das ENSI ist einverstanden, die Langzeitentwicklung durch eine Bewertungsskala zu berücksichtigen, welche den gesamten Betrachtungszeitraum umfasst. Auch die dabei berücksichtigten Erosionsprozesse sind aus Sicht des ENSI geeignet, um Optimierungsanforderungen und Bewertungsskalen für diesen Indikator zu bestimmen (Kapitel 2.6.3). Im massgebenden Fall für die Einengung (mFE) geht die Nagra davon aus, dass nur das WG-ss und keine weiteren Rahmengesteine barrierenwirksam sind (NTB 14-01). Damit ist das ENSI einverstanden. Aus Sicht des ENSI sind daher die Auswirkungen entlastungsbedingter Dekompaktion durch Erosion ausschliesslich

für das WG-ss zu beurteilen, wofür das ENSI eine eigene Bewertungsskala verwendet (ENSI 33/539).

Das ENSI erachtet jedoch die Optimierungsanforderungen OA der Nagra teilweise als so streng, dass dadurch günstige Flächenbereiche abgeschnitten werden können: Eine Optimierung in Richtung immer grösserer Tiefenlagen ist im Hinblick auf die Dekompaktion und Erosionsprozesse grundsätzlich sinnvoll, jedoch wird das Optimierungspotenzial mit zunehmender Tiefe geringer. Die Grenze der Optimierung sieht das ENSI erreicht, wenn das WG-ss innerhalb des Betrachtungszeitraums auch bei pessimistischen Erosionsszenarien (hohe, aber plausible Erosionsraten, welche auch durch zusätzliche Untersuchungen in Etappe 3 SGT kaum reduziert werden können) nicht von Dekompaktion erfasst wird. Eine darüber hinausgehende Anforderung führt nicht zu einem besseren Schutz vor erosionsbedingter Dekompaktion (ENSI 33/539). Das ENSI leitet daraus folgende Optimierungsanforderung ab (entspricht der Bewertungsstufe «sehr günstig», Kapitel 5.3 bzw. 6.1.2): Das WG-ss/LPmin wird im Betrachtungszeitraum nicht von der Dekompaktion erfasst. Wird diese OA eingehalten, werden gleichzeitig die VA aus Etappe 1 SGT unter pessimistischen Annahmen für die flächenhafte Erosion auch noch am Ende des Betrachtungszeitraums eingehalten.

Die Optimierungsanforderungen des ENSI für den Indikator 2 werden in ENSI 33/539 denjenigen der Nagra gegenübergestellt. Es zeigt sich, dass das ENSI an das Standortgebiet Wellenberg höhere OA stellt (894 bzw. 888 m u. T. für die Lagerebenen bei 400 bzw. 200 m ü. M) und diese nur erreicht werden können, wenn gleichzeitig die maximale Tiefenlage im Hinblick auf bautechnische Machbarkeit (Mindestanforderung aus Etappe 1 SGT: 800 m u. T.) überschritten würde (Kapitel 6.1.4). Für die SMA-Lagerperimeter SMA-SR-OPA, SMA-ZNO-OPA, SMA-NL-OPA, SMA-JO-OPA sowie für die HAA-Lagerperimeter ergeben sich gegenüber der Nagra geringere OA. Für die übrigen Lagerperimeter kommt das ENSI zu denselben OA wie die Nagra.

Im Standortgebiet Wellenberg, wo die OA des ENSI strenger als diejenige der Nagra ist, liegen aufgrund des ausgeprägten Oberflächenreliefs Teilbereiche der unteren und mittleren Lagerebenen mit bis zu 1139 bzw. 935 m u. T. (Kapitel 6.1.4) z. T. deutlich unterhalb der ausgewiesenen minimalen Überdeckung von 601 m (NTB 14-02-III; NTB 14-02-V) und der OA des ENSI. Mit der vorhandenen Flexibilität bezüglich der Anzahl der Lagerebenen (NTB 14-01) und weil die Erstellung der Lagerkammern in den Mergel-Formationen des Helvetikums auch in grösseren Tiefen als 800 m u. T. grundsätzlich bautechnisch machbar ist (Kapitel 2.10), besteht grundsätzlich die Möglichkeit, die Lagerperimeter im Hinblick auf die Platzverfügbarkeit zu optimieren (Verkleinerung der Lagerperimeter und Einschleiben weiterer und tieferer Lagerebenen).

Bei Anwendung der teilweise weniger strengen Optimierungsanforderungen des ENSI ergeben sich für die Lagerperimeter SMA-ZNO-BD, SMA-NL-OPA, SMA-NL-BD, SMA-JO-OPA und HAA-NL hinsichtlich der minimalen Tiefenlage unter Terrain gegen Norden und für SMA-JS-EFF gegen Westen potenziell nutzbare Flächen.

Indikator 3: Tiefenlage unter lokaler Erosionsbasis im Hinblick auf die Bildung neuer Rinnen

Angaben der Nagra

Bei der Erosion geht die Nagra gegenüber Etappe 1 SGT differenzierter vor. Einerseits wird das zukünftige Einschneiden des Hauptflussnetzes betrachtet. Andererseits ist der flächenhafte Abtrag der Topographie (Abtrag der Hochzonen) bezogen auf das Hauptflussnetz zu beachten. Zusätzlich wird als möglicher Erosionsprozess in Etappe 2 SGT auch die Bildung von neuen Durchbruchsrinnen als Folge von Flussumlenkungen im Zusammenhang mit zukünftigen Vergletscherungen explizit betrachtet; dazu wird der neu eingeführte Indikator 3 «Tiefenlage unter lokaler Erosionsbasis im Hinblick auf die Bildung neuer Rinnen» verwendet (NTB 14-02-III; NAB 14-25). Dies bedeutet, dass es zwischen zwei Punkten des Hauptflussnetzes bei Vorliegen entsprechender Bedingungen (Topographie, Vergletscherung) zu einer Durchbruchrinne kommen könnte und damit die dazwischen liegende Erhebung bis auf das Niveau des Hauptflussnetzes abgetragen würde (NTB 14-01).

Um auch nach Bildung einer Durchbruchrinne noch eine genügende Barrierenwirkung zu haben, strebt die Nagra für das SMA-Lager im Rahmen der Optimierung an, dass der Top Opalinuston in den geologischen Standortgebieten Südranden und Jura-Südfuss mindestens 100 m und in den Standortgebieten Zürich Nordost und Nördlich Lägern mindestens 150 m unter der heutigen Erosionsbasis liegt. Zusätzlich wird im Standortgebiet Südranden die Neuhauserwald-Rinne, inkl. eines 200 m breiten Puffers, vollständig gemieden. Mit dieser Anforderung wird von der Nagra das im Vergleich zur Bildung einer neuen Rinne wahrscheinlichere Szenario

einer Ausräumung und Verbreiterung der existierenden Rinne berücksichtigt (NAB 17-01, Frage 73). Da im Standortgebiet Jura Ost im Betrachtungszeitraum von 100 000 Jahren die Bildung einer Durchbruchrinne ausgeschlossen werden kann, werden keine Optimierungsanforderungen für den Indikator 3 festgelegt. Für die HAA-Standortgebiete Zürich Nordost und Nördlich Lägern wird verlangt, dass der Top Opalinuston mindestens 350 m unter der heutigen Erosionsbasis liegt. Für das HAA-Standortgebiet Jura Ost soll der Top Opalinuston mindestens 200 m unter der heutigen Erosionsbasis liegen. Nach Ansicht der Nagra wird damit sichergestellt, dass auch am Ende des Betrachtungszeitraums eine für das jeweilige Standortgebiet angemessene glaziale Übertiefung möglich ist, bis die Oberkante des Opalinustons erreicht wird (NTB 14-01). Die im Rahmen der Nachforderung von der Nagra durchgeführte Überprüfung hat zu einer Bestätigung der verwendeten Erosionsszenarien und der daraus abgeleiteten Anforderungen geführt (NAB 16-41). Ausserdem wurden zusätzlich Lagerperimeter abgegrenzt, welche modifizierte Anforderungen an die minimale Tiefenlage unter lokaler Erosionsbasis berücksichtigen.

Der Indikator 3 ist einer der drei Schlüsselindikatoren zur Festlegung der minimalen Tiefenlage optimierter Lagerperimeter (NTB 14-01). Aufgrund der Neueinführung dieses Indikators wurden keine MA und VA gemäss Etappe 1 SGT (NTB 14-01) festgelegt.

Der mLE wird im geologischen Standortgebiet Südranden durch die Neuhauserwald-Rinne in zwei Teile geteilt. Der östliche Teil ist gemäss Nagra sehr beschränkt in seiner Grösse und wird in der Bewertung daher nicht berücksichtigt. Der für die Einengung massgebende westliche Teil wird von der Nagra als prioritäre Fläche bezeichnet (NTB 14-01).

Beurteilung des ENSI

Da es sich beim Indikator 3 um einen für Etappe 2 SGT neu definierten Indikator handelt (NAB 17-01, Frage 44), hat das ENSI diesen Indikator vertieft überprüft und die Berücksichtigung dieses Prozesses (Bildung neuer Durchbruchrinnen) grundsätzlich als sicherheitsgerichtet beurteilt (Kapitel 6.1.2 oder ENSI 33/539).

Die von der Nagra festgelegte Untergrenze der Bewertungsstufe «günstig» in der neu definierten Bewertungsskala des Indikators 3 bildet gleichzeitig die Optimierungsanforderung bei der Abgrenzung der optimierten Lagerperimeter (NTB 14-01; NAB 17-01, Frage 71). Die Definition der Bewertungsskala des Indikators 3 wird aus Sicht des ENSI als zwischen den Standortgebieten methodisch uneinheitlich (betrifft vor allem die SMA-Standortgebiete) und als teilweise nicht nachvollziehbar beurteilt. Das ENSI hat auf Basis des vorliegenden geologischen Kenntnisstands (NTB 14-02-III; NAB 14-25) eine modifizierte Bewertungsskala definiert, welche detailliert in ENSI 33/539 beschrieben wird.

Die Meidung der Neuhauserwald-Rinne als zusätzliche Optimierungsanforderung für das Standortgebiet Südranden spiegelt bestehende Ungewissheiten bzgl. der standortspezifischen Langzeitentwicklung wider. Obwohl eine zukünftig potenzielle Ausräumung und Verbreiterung dieser Rinne aus Sicht des ENSI durch die entsprechende Optimierungsanforderung des Indikators 3 (Oberkante Opalinuston soll mindestens 100 m unter der heutigen Erosionsbasis liegen) bereits berücksichtigt ist, wird die Meidung der Neuhauserwald-Rinne aufgrund der im Vergleich geringen Tiefenlage des Wirtgesteins gegenüber den anderen SMA-Standortgebieten als sicherheitsgerichtet und gerechtfertigt beurteilt. Der daraus resultierende Einfluss auf das Platzangebot wird unter Indikator 8 «Platzangebot untertags» diskutiert.

Die für SMA-SR-OPA abgegrenzten sechs alternativen Lagerperimeter stellen eine sinnvolle Ergänzung dar. Sie ermöglichen eine zielführende Sensitivitätsbetrachtung. Die Auswirkungen der Meidung der Neuhauserwald-Rinne werden beispielsweise durch SMA-SR-aL3-r aufgezeigt. Weitere alternative Lagerperimeter bzgl. der Tiefenlage unter Erosionsbasis wurden für HAA-ZNO und HAA-JO sowie im Rahmen der Nachforderung für HAA-NL abgegrenzt. Diese Auswahl wird seitens ENSI als zweckmässig angesehen.

Das ENSI beurteilt die von der Nagra für das Standortgebiet Wellenberg betrachteten Erosionsszenarien von 50 m, 100 m bzw. 200 m glazialer Tiefenerosion im Engelbergertal als inhaltlich nachvollziehbar und angemessen. Die Beurteilung des ENSI bzgl. des Indikators 3 basiert auf dem alternativen Lagerperimeter SMA-WLB-mLE-re200 und damit im Gegensatz zur Nagra auf dem als «pessimistisch» bezeichneten Szenario mit 200 m glazialer Tiefenerosion (ENSI 33/539).

Bei der Anwendung der teilweise strengeren Anforderungen des ENSI bzgl. der Tiefenlage unter lokaler Erosionsbasis im Hinblick auf die Bildung neuer Rinnen (ENSI 33/539) ergeben sich für die Abgrenzung keine Einschränkungen für die massgebenden SMA- und HAA-Lagerperimeter der Nordschweiz. Zum Standortgebiet Wellenberg gelten die vom ENSI betreffend Dekompaktion gemachten Aussagen analog für den Indikator 3.

Indikator 4: Tiefenlage unter Fels im Hinblick auf glaziale Tiefenerosion

Angaben der Nagra

Über die Anwendung der MA und VA hinaus werden in Etappe 2 SGT glazial übertiefte Felsrinnen neu als quartäre Übertiefung von mehr als 50 m unter Erosionsbasis inkl. eines seitlichen Randstreifens von 200 m definiert (NTB 14-01). Die zur Anwendung gebrachten VA des Indikators 4 lauten: Die Mindestüberdeckung bezüglich der Felsoberfläche muss 500 m für HAA-Lagerperimeter bzw. 300 m für SMA-Lagerperimeter im Bereich von glazial übertieften Felsrinnen betragen. In allen anderen Bereichen müssen mindestens 400 m (HAA) bzw. 200 m (SMA) für die Oberkante Wirtgestein unter Felsoberfläche erreicht werden (NTB 14-02-III). Eine Abgrenzung bzgl. der heutigen Tiefenlage unter Fels erfolgt für das Standortgebiet Wellenberg nicht, da das Tal der Engalberger Aa als ganzes übertieft ist.

Im Fall des Standortgebiets Wellenberg wird kein Abstand von der heutigen Felsoberfläche verwendet, sondern es werden verschiedene Szenarien für den zukünftigen Verlauf der Felsoberfläche konstruiert, wobei auch eine Talverbreiterung durch gravitative Prozesse berücksichtigt wird.

Beurteilung des ENSI

Die von der Nagra im NTB 14-02-III geforderten Mindestüberdeckungen der Oberkante Wirtgestein unter Felsoberfläche entsprechen den VA an den Indikator 4 gemäss Etappe 1 SGT (NTB 08-05). Damit werden die behördlichen Vorgaben (ENSI 33/154) erfüllt. Mit der Berücksichtigung einer lateralen Pufferzone von 200 Metern um die glazial übertieften Felsrinnen folgt die Nagra einer Empfehlung des ENSI aus Etappe 1 SGT. Die von der Nagra überarbeitete Definition von glazial übertieften Felsrinnen (Übertiefung von mehr als 50 m unter Erosionsbasis) beurteilt das ENSI hingegen als nicht plausibel (Kapitel 6.1.2), da der Schwellenwert von 50 m fachlich nicht begründet ist (NAB 17-01, Frage 45). Das ENSI behandelt glaziale Rinnen daher als Rinnen, welche unter die lokale Erosionsbasis reichen. Infolgedessen erfüllt der massgebende Lagerperimeter der Nagra, HAA-ZNO-mLE-r, die VA im Bereich von glazial übertieften Rinnen nicht (Kapitel 6.1.2). Dies trifft auch bei Anwendung der in Etappe 1 SGT verwendeten Definition von glazial übertieften Felsrinnen (Quartärmächtigkeit mindestens 100 m) zu.

Gemäss NTB 14-01, Tabelle 2.3-2, werden für den Indikator 4 OA bei der Abgrenzung der Lagerperimeter angewendet. Das ENSI erkennt in den Unterlagen der Nagra jedoch keine weiteren Anforderungen bzgl. dieses Indikators, welche sich von den verschärften Anforderungen aus Etappe 1 SGT unterscheiden. Wie in Nagra 2015b ersichtlich wird, wurde für die Ermittlung der Lagerperimeter immer mit einer minimalen Tiefenlage der Oberkante Opalinuston von 200 m unter Fels für die SMA- und 400 m unter Fels für die HAA-Lagerperimeter gearbeitet, was den VA im Bereich ausserhalb übertiefter Felsrinnen entspricht. Eine darüber hinausgehende Optimierung, d. h. eine Verschärfung der Abgrenzungsanforderungen über die MA/VA hinaus fand bzgl. des Indikators 4 somit nicht statt. Da die minimale Tiefenlage im Wesentlichen durch die Tiefenlage der Oberkante Wirtgestein unter Terrain (Indikator 2) und unter lokaler Erosionsbasis (Indikator 3) bestimmt wird, hat das Vorgehen der Nagra nach Ansicht des ENSI keine Auswirkungen auf die Abgrenzung der Lagerperimeter. Die Auswirkungen auf die qualitative Bewertung der abgegrenzten Lagerperimeter werden in Kapitel 5.3 und auf die Bewertung der Standortgebiete anhand entscheidrelevanter Merkmale und eindeutiger Nachteile in Kapitel 6.1.2 dargelegt.

Unter Berücksichtigung der bestehenden Ungewissheiten bzgl. der Tiefe und der Geometrie von glazial übertieften Rinnen erachtet das ENSI das Vorgehen der Nagra, keine weiteren Szenarien für alternative Lagerperimeter heranzuziehen, als stufengerecht. Eine Ausnahme von diesem Vorgehen stellt der LP HAA-ZNO-aL506-r dar. Dieser wurde auf Nachfrage des ENSI (NAB 17-01, Frage 81) nachträglich durch die Nagra abgegrenzt und

berücksichtigt glazial übertiefte Felsrinnen ohne Verwendung eines Schwellenwerts (NTB 14-01, Fussnote 118) im Standortgebiet Zürich Nordost.

Eine Abgrenzung bzgl. der Tiefenlage unter Fels (Indikator 4) erfolgt für das Standortgebiet Wellenberg nicht. Das ENSI beurteilt dies als plausibel, da das Tal der Engelberger Aa als ganzes übertieft ist und das Szenario von 200 m glazialer Tiefenerosion des Indikators 3 als sicherheitstechnisch abdeckend beurteilt wird.

Für den Indikator 4 «Tiefenlage unter Fels im Hinblick auf glaziale Tiefenerosion» werden keine Optimierungen über die MA und VA hinaus vorgenommen. Somit besteht kein Potenzial für zusätzliche Flächen.

Indikator 5: Mächtigkeit

Angaben der Nagra

Gemäss NTB 14-01, Tabelle 2.3-5 wird die Mächtigkeit der Wirt- und Rahmengesteine im GIS-Schneideprozess berücksichtigt. Aus der Beschreibung der GIS-Analyse (Nagra 2015b) geht hervor, dass bei der Abgrenzung der Lagerperimeter für den Opalinuston zur Berücksichtigung der Mindesttiefe von Top Wirtgestein eine Mächtigkeit von einheitlich 100 m verwendet wurde. Im Gegensatz zum Opalinuston werden für die Abgrenzung der Lagerperimeter für die Wirtgesteine 'Brauner Dogger' und Effinger Schichten die standortspezifischen Referenzwerte für die Mächtigkeiten berücksichtigt (NAB 17-01, Frage 47). Für die Bewertung der Lagerperimeter werden hingegen für alle Wirtgesteine die Referenzwerte für die Mächtigkeiten berücksichtigt.

Das aktualisierte 3D-Modell des Wirtgesteinskörpers im Standortgebiet Wellenberg ist auch im GIS erfasst und wird wie bei den Standortgebieten der Nordschweiz für den Schneideprozess verwendet (NTB 14-01).

Beurteilung des ENSI

In Kapitel 2.5 beurteilt das ENSI die Herleitung und Verwendung der Informationen zur Mächtigkeit der Wirt- und Rahmengesteine. Das ENSI erachtet es als zielführend, die Angaben zu den Mächtigkeiten (insbesondere für die Wirt- und Rahmengesteine) wie von der Nagra vorgeschlagen hauptsächlich auf belastbare Bohrungs- und Aufschlussdaten abzustützen. Vorliegende Tiefenkarten und die daraus hergeleiteten Mächtigkeitkarten im NTB 14-02-II zeigen eine räumliche Auflösung, die durch grosse Ungewissheiten gekennzeichnet ist (Kapitel 2.5). Entsprechend ist das ENSI grundsätzlich mit dem Vorgehen einverstanden, einheitlich eine Mächtigkeit des Opalinustons von 100 m für die Abgrenzung der Lagerperimeter zu verwenden. Das ENSI hält jedoch fest, dass mit der einheitlichen Verwendung von 100 m die Mächtigkeit des Opalinustons im Standortgebiet Jura-Südfuss nachweislich überschätzt wird (die Bohrung Gösgen SB-4 (NAB 14-101) wurde erst im September 2014, d. h. kurz vor dem finalen Einreichen des Vorschlags der Nagra abgeteuft). Dies wird vom ENSI in der Bewertung des Indikators 5 «Mächtigkeit» berücksichtigt (Kapitel 5.3 bzw. Kapitel 2.5).

Des Weiteren hält das ENSI fest, dass die geringe Mächtigkeit des, 'Braunen Doggers' (SMA-ZNO-BD und SMA-NL-BD) bzw. der Effinger Schichten (SMA-JS-EFF) aufgrund der nicht-reduzierbaren Ungewissheiten hinsichtlich der Barrierenwirksamkeit der «harten Bänke» grundsätzlich einen Einfluss auf die Abgrenzung der Lagerperimeter für diese Wirtgesteine hat. Um jedoch einen Vergleich zwischen den Lagerperimetern zu ermöglichen, berücksichtigt das ENSI die geringe Mächtigkeit des Opalinustons und der Effinger Schichten im Standortgebiet Jura-Südfuss sowie jene des Wirtgesteins 'Brauner Dogger' nicht für die Abgrenzung der Lagerperimeter. Stattdessen wird die reduzierte Mächtigkeit dieser Wirtgesteine bei der Bewertung der Indikatoren 5 «Mächtigkeit» und 19 «Länge des massgebenden Freisetzungspfades» berücksichtigt (Kapitel 5.3 bzw. Kapitel 2.5).

Indikator 6: Regionale tektonische Elemente

Angaben der Nagra

Die Gliederung des Grossraums der Standortgebiete in der Nordschweiz in unterschiedliche tektonische Regimes sowie die gebietsbegrenzenden regionalen tektonischen Elementen (regionale Störungszonen, zu meidende tektonische Zonen) sind als Übersicht im NTB 14-01, Fig. 4.4-1 dargestellt. Die Abgrenzung der Lagerperimeter erfolgt auf Basis einer Karte aller Störungszonen (Abbildung 14).

Als zu meidende tektonische Zonen werden Bereiche bezeichnet, welche aus Sicht der Nagra in erster Linie aufgrund von Modellvorstellungen zur Geodynamik sowie Erfahrungen aus früheren 3D-seismischen Untersuchungen der Nagra zur Optimierung von untertägigen Lagerperimetern gemieden werden sollten (z. B. Einflussbereiche von reaktivierten Grundgebirgsverwerfungen und Antiklinalstrukturen; NTB 14-02-II). Die Randzonen des Nordschweizer Permkarbons werden bei der Abgrenzung der Lagerperimeter als zu meidende tektonische Zonen behandelt, sodass diesen bei der Abgrenzung der Lagerperimeter ausgewichen wird. Die verfolgte Optimierungsstrategie besteht darin, die betreffenden Zonen zu meiden (NTB 14-01).

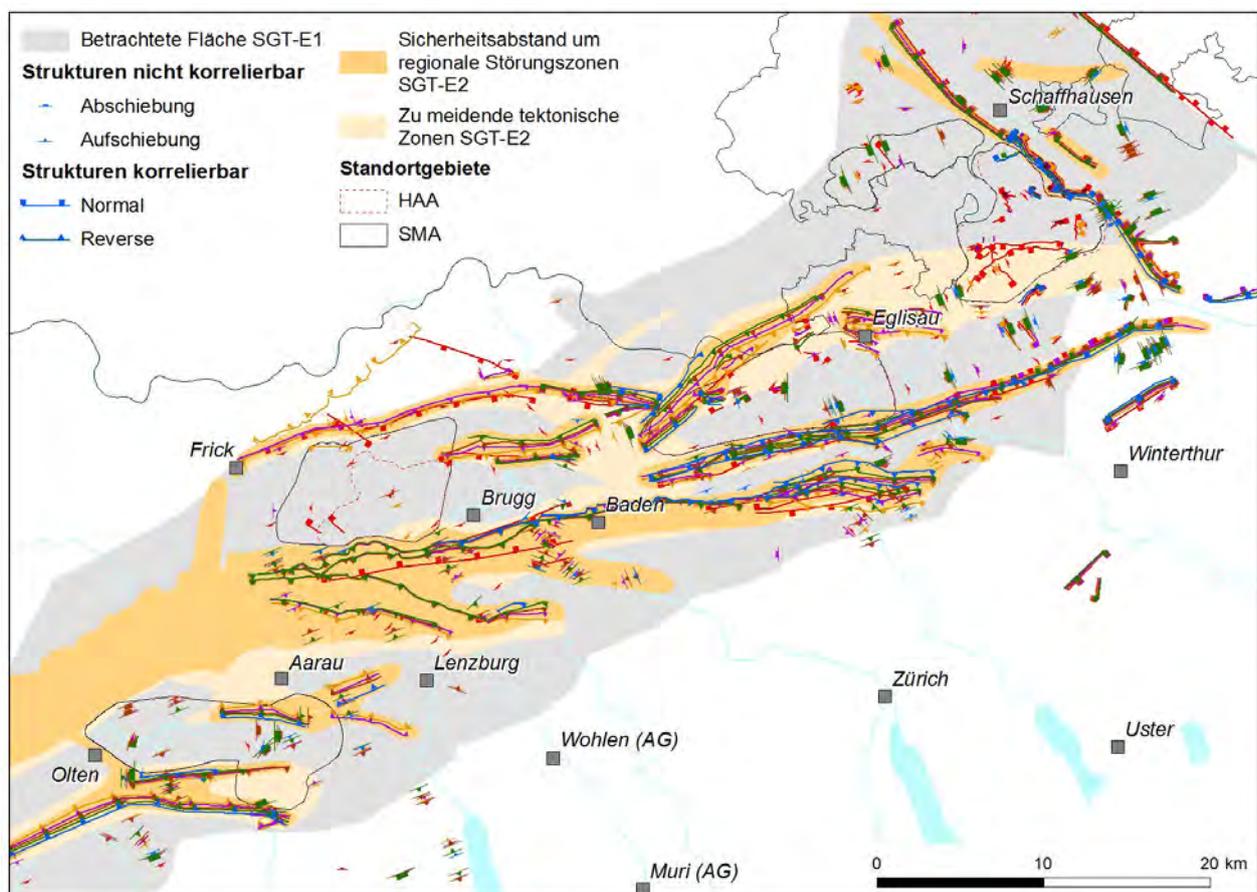


Abbildung 14: Seismische Interpretation von Störungszonen und einzelnen Störungselementen (NAB 14-34) mit der daraus resultierenden Abgrenzung regionaler tektonischer Elemente. Zur Nachvollziehbarkeit der Abgrenzung von regionalen Störungszonen sind die Störungen auf dem Niveau der verschiedenen seismischen Markerhorizonte dargestellt (blau: Basis Tertiär, grün: Basis Malm, orange: Near Top Opalinuston; violett: Top Lias, gelb: Top Muschelkalk, rot: Basis Mesozoikum) (NAB 17-01, Frage 35).

Innerhalb aller geologischen Standortgebiete in der Nordschweiz, mit Ausnahme des Standortgebiets Südranden, existieren zu meidende tektonische Zonen. Die Lagerperimeter SMA-ZNO-OPA und HAA-ZNO werden geologisch durch die Neuhausen-Störung (im Nordosten) sowie eine zu meidende tektonische Zone (im Süden) begrenzt. Die Lagerperimeter SMA-NL-OPA und HAA-NL werden geographisch durch die zu meidende tektonische Zone (im Norden) begrenzt. Die Lagerperimeter SMA-JO-OPA und HAA-JO werden geologisch durch die Jura-Hauptüberschiebung bzw. durch eine zu meidende tektonische Zone (im Süden und Nordosten) begrenzt. Der Lagerperimeter SMA-JS-EFF wird geologisch durch regionale Störungszonen (im Nordwesten, Südwesten und Süden) begrenzt. Für die SMA- und HAA-Lager werden im Standortgebiet Zürich Nordost zur weiteren Optimierung ausgehend von den massgebenden Lagerperimetern unter Berücksichtigung des detaillierten Störungsinventars aus der 3D-Seismik im Zürcher Weinland (NTB 00-03) modellhaft modifizierte Lagerperimeter gebildet.

Im Rahmen der Nachforderungen wurden in den geologischen Standortgebieten Jura Ost und Nördlich Lägern zusätzliche alternative Lagerperimeter betrachtet, welche die zu meidende tektonische Zone nicht berücksichtigen (NAB 16-42).

Das Wirtgestein im geologischen Standortgebiet Wellenberg wurde im Vergleich zur mesozoischen Schichtabfolge der Nordschweiz im Zuge seiner geologisch-tektonischen Entwicklungsgeschichte viel stärker deformiert. Die Beschreibung der kleinräumigen tektonischen Strukturen im Wirtgesteinskörper basiert mehrheitlich auf der Kartierung von Bohrkernen und Geländeaufschlüssen. Der genaue Verlauf regionaler Störungszonen innerhalb des Standortgebiets Wellenberg ist aufgrund der komplexen tektonischen Verhältnisse und den schwierigen Explorationsbedingungen (NTB 14-02-VIII) nicht eindeutig erfassbar. Wie bereits in Etappe 1 SGT können also im Standortgebiet Wellenberg aufgrund des komplexen Deformationsstils diskrete regionale Störungszonen nicht systematisch kartiert und gemieden werden.

Beurteilung des ENSI

Der Indikator 6 «Regionale tektonische Elemente: a) Abstand zu regionalen Störungszonen, b) zu meidende tektonische Zonen» umfasst regionale Störungszonen und zu meidende tektonische Zonen und wird ausschliesslich zur Abgrenzung der Lagerperimeter verwendet. Das ENSI sieht es als sicherheitsgerichtet an, neben den kartierbaren regionalen Störungszonen auch tektonischen Elementen im Einflussbereich von post-paläozoisch reaktivierten Grundgebirgsstörungen, insbesondere den Randbruchzonen des Nordschweizer Permokarbons, bei der Abgrenzung der Lagerperimeter auszuweichen.

Das ENSI und seine Experten (ENSI 33/464) kommen zum Schluss, dass die Lokationen und die Verläufe der regionalen Störungszonen mit der vorliegenden 2D-Seismik vollständig erfasst wurden (Kapitel 2.4). Das ENSI erachtet es als sicherheitstechnisch nachvollziehbar, dass im Standortgebiet Jura-Südfuss für die West-Fortsetzung der Schönenwerd-Eppenbergs-Antiklinale eine zu meidende tektonische Zone eingesetzt wird. Die Meidung des Gebiets in der zentralen Zone der östlichen Fortsetzung der Born-Engelberg-Antiklinalstruktur ist aus geologisch-tektonischem Verständnis plausibel, da das Gebiet nördlich der Born-Engelberg-Antiklinalstruktur einen grösseren Lagerperimeter in tektonisch weniger beanspruchtem Gebiet zulässt (Optimierung). Eine West-Fortsetzung der Siggenthal-Antiklinale im Standortgebiet Jura Ost hält das ENSI für möglich, obwohl deren vertikaler Versatz gegen Westen hin abnimmt. Aufgrund der grossen Platzreserven hätte eine mögliche Verlängerung jedoch keine Auswirkungen auf den Standortgebietsentscheid.

Die von der Nagra ausgewiesenen zu meidenden tektonischen Zonen sind bis auf diejenige im Norden des Standortgebiets Nördlich Lägern nachvollziehbar und lateral korrekt abgegrenzt (Abbildung 6). Die Abgrenzung dieser zu meidenden tektonischen Zone durch die Nagra stellt nach Ansicht des ENSI eine mögliche, jedoch keine zwingende Abgrenzung dar. Das ENSI vermutet wie die Nagra, dass der Bereich aufgrund der langsam gegen Norden aufsteigenden Schichtpakete zur Siglistorf-Antiklinale stärker geneigte Schichten besitzt und vermutlich stärker tektonisiert ist. Aus Sicht des ENSI können jedoch die zu meidende tektonische Zone im Norden aufgrund der vorliegenden Daten nicht exakt abgegrenzt (räumlichen Ausdehnung) und der Grad der tektonischen Zergliederung (und somit die Bedeutung für die geologische Langzeitstabilität) nicht belastbar belegt werden. Eine 3D-Seismik in Etappe 3 SGT würde bezüglich des Grads und der räumlichen Ausdehnung der Tektonisierung in Nördlich Lägern erlauben, die vorhandenen Modellvorstellungen zu präzisieren (analog

zum Vorgehen in Zürich Nordost). Aufgrund dieser Einschätzung des Indikators 6 «Regionale tektonische Elemente: a) Abstand zu regionalen Störungszonen, b) zu meidende tektonische Zonen» identifiziert das ENSI für die Lagerperimeter im Standortgebiet Nördlich Lägern eine potenziell zusätzlich nutzbare Fläche gegen Norden (im Bereich der zu meidenden tektonischen Zone).

Das ENSI beurteilt die modellhaft modifizierten (d. h. manuell angepassten) Lagerperimeter für SMA- und HAA im Standortgebiet Zürich Nordost auf Basis des detaillierten Störungsinventars als plausibel und nachvollziehbar.

Das ENSI beurteilt es als nachvollziehbar, dass in den Standortgebieten bzgl. regionaler tektonischer Elemente keine weiteren alternativen Lagerperimeter ausgewiesen wurden.

Das ENSI kann die Einschätzung der Nagra fachlich nachvollziehen, dass im Standortgebiet Wellenberg aufgrund des komplexen Deformationsstils diskrete regionale Störungszonen nicht systematisch kartiert und gemieden werden können. Die komplexe Tektonisierung in diesem Standortgebiet wird über die Indikatoren 23 «Modellvorstellungen zur Langzeitentwicklung (Geodynamik und Neotektonik)», 24 «Seismizität» und 43 «Explorationsverhältnisse im geologischen Untergrund» bewertet.

Indikator 8: Platzangebot untertags

Angaben der Nagra

Der Indikator 8 «Platzangebot untertags» wird über den Vergleich zwischen der zur Verfügung stehenden Fläche des mLE (NTB 14-01) und dem standortspezifischen Platzbedarf (NAB 14-99) definiert. Die zur Verfügung stehende Fläche ergibt sich aus der Abgrenzung der Lagerperimeter. Der erforderliche Platzbedarf leitet sich ab aus dem Platzbedarf für eine ideale Geometrie ohne anordnungsbestimmende geologische Elemente, dem gewählten Kavernentyp für SMA-Lager und aus den erforderlichen Flächenzuschlägen zur Berücksichtigung von anordnungsbestimmenden geologischen Elementen, ungünstiger Geometrie der Lagerfelder und geomechanischen Gründen (NTB 14-01).

Für die Optimierung der Lagerperimeter bezeichnet die Nagra die relativ hohe Dichte der anordnungs- und einlagerungsbestimmenden geologischen Elemente als möglichen Schwachpunkt. Entsprechend werden diese bei der Anordnung der Lagerkammern des SMA- und HAA-Lagers bzw. bei der Einlagerung der BE/HAA-Endlagerbehälter gemieden. Die Optimierung geschieht indirekt, indem die Anforderungen bei den Indikatoren zur minimalen und maximalen Tiefenlage sowie bzgl. des Abstands zu den regionalen tektonischen Elementen nur soweit angepasst werden, dass ein Platzangebot mit genügenden Reserven verbleibt (NTB 14-01).

Das Ziel bei der Abgrenzung optimierter Lagerperimeter ist es, ein genügendes Platzangebot zur Anordnung der untertägigen Lagerbauten bereit zu stellen. Für die Abgrenzung der Lagerperimeter wurde deshalb ein umhüllendes Abfallinventar (200 000 m³ SMA, 7500 m³ LMA und 20 000 m³ BE/HAA; NAB 16-41) verwendet, welches dem Doppelten des effektiv anfallenden Abfallvolumens entspricht. Unter Berücksichtigung der erwarteten Dichte der anordnungsbestimmenden geologischen Elemente, der erwarteten geotechnischen Bedingungen (Tiefe der Lagerebene, tektonische Überprägung) und der Mächtigkeit und Neigung des Opalinustons ergeben sich als Richtwerte für den Platzbedarf folgende Werte (NAB 14-99): Südranden: 3 – 4 km², Zürich Nordost: ca. 6 km² (HAA-Lager) und ca. 3 km² (SMA-Lager), Nördlich Lägern: 8 – 12 km² (HAA-Lager) und 4 – 5 km² (SMA-Lager), Jura Ost: 6 – 9 km² (HAA-Lager) und 3 – 4 km² (SMA-Lager); Jura-Südfuss: 6 – 8 km², Wellenberg: ca. 3 km² (auf mehrere Lagerebenen verteilt). Zur Prüfung der Robustheit wurde auch geprüft, ob der Einengungsvorschlag sich ändern würde, wenn für alle Standortgebiete der gleiche Platzbedarf angenommen würde – die Analyse hat gezeigt, dass dies zu keinem anderen Entscheid führt (NAB 17-01, Frage 25).

Beurteilung des ENSI

Das ENSI sieht es als zielführend an, den Indikator «Platzangebot untertags» bei der Abgrenzung der Lagerperimeter zu berücksichtigen. Das Optimierungsziel der Nagra, ein genügendes Platzangebot zur Anordnung der untertägigen Lagerbauten für das umhüllende Abfallinventar bereit zu stellen, ist richtigerweise ein zentrales Element bei der Optimierung der Lagerperimeter. Die indirekte Optimierung hinsichtlich der Platzreserven über

die Erhöhung der Anforderungen bei den anderen Indikatoren ist ein plausibles und fachlich nachvollziehbares Vorgehen.

In Ergänzung zur Nagra untersucht das ENSI auch diejenigen Fälle, welche die Anforderungen hinsichtlich eines genügenden Platzangebots untertags erfüllen, wodurch aber möglicherweise andere Indikatoren nicht oder nur teilweise optimiert werden können. Das ENSI bezieht sich im Folgenden bei seiner Bewertung auf die von ihm betrachteten Lagerperimeter mit genügendem Platzangebot untertags.

Das ENSI begrüsst grundsätzlich die standortspezifische Abschätzung des Platzbedarfs durch die Nagra in Etappe 2 SGT. Es kommt jedoch zum Schluss, dass die Datenbasis und die Herleitung der Anzahl anordnungsbestimmender Störungen in den Standortgebieten, in welchen noch keine 3D-Seismik vorliegt, ungenügend und aus zwei Gründen nicht belastbar ist: Einerseits erlauben die vorliegende 2D-Seismik sowie Beobachtungen in den Aufschlüssen in der Nordschweiz (NAB 12-41) wegen der geringen Datendichte keine belastbare Abschätzung der Anzahl der standortspezifisch anordnungsbestimmenden Störungen. Andererseits bezieht die Nagra für diese Abschätzungen u. a. anordnungsbestimmende Störungen (NAB 14-88) mit ein, welche über die abgegrenzten Lagerperimeter hinausgehen und somit nicht zwingend repräsentativ für die tektonischen Verhältnisse innerhalb der Lagerperimeter sind (Kapitel 2.4). Das ENSI verwendet daher in Anlehnung an den aus der vorliegenden 3D-Seismik für das Standortgebiet Zürich Nordost abgeleiteten Platzbedarf für alle Standortgebiete einen einheitlichen Platzbedarf von 6 km² (HAA) bzw. 3 – 4 km² (SMA).

Das ENSI unterstützt die im Rahmen der Zusatzdokumentation zu den Nachforderungen (NAB 16-41) durchgeführte Anpassung bei der Wahl des Lagerperimeters für die Lagertypen SMA und HAA im Standortgebiet Nördlich Lägern, welche ursprünglich eine ungenügend grosse Fläche zur Verfügung stellten und somit die Optimierungsziele nicht erfüllten. Das ENSI stützt seine eigene Bewertung ebenfalls auf diejenigen alternativen Lagerperimeter ab, welche eine genügend grosse Fläche aufweisen (HAA-NL-aL1-r und SMA-NL-aL1-r). Da für das ENSI die von der Nagra ausgewiesene zu meidende tektonische Zone im Norden des Standortgebiets Nördlich Lägern nicht belastbar ist, berücksichtigt das ENSI diese potenziell zusätzliche Fläche ebenfalls in seiner Bewertung (Kapitel 5.3).

Aufgrund der Neuhauserwald-Rinne wird das Standortgebiet Südranden in zwei Lagerperimeter geteilt. Die mit 2.7 km² etwas kleinere östliche Teilfläche wird bei der Bewertung sowie beim späteren sicherheitstechnischen Vergleich der Standortgebiete nicht berücksichtigt. Das ENSI hält die Priorisierung der westlichen, grösseren Fläche von 3.7 km² (SMA-SR-mLE-r) im Hinblick auf die spätere Erschliessung für sicherheitsgerichtet, kritisiert jedoch die fehlende sicherheitsorientierte Begründung durch die Nagra. Ein in mehrere Lagerperimeter räumlich untergliedertes Standortgebiet benötigt zusätzliche Bauwerke (Zugangsbauwerke und/oder Verbindungsbauwerke). Jedes zusätzliche und nicht der Betriebssicherheit dienende Bauwerk stellt aus Sicht des ENSI ein potenzielles bau- und betriebssicherheitstechnisches Risiko dar, welches es im Sinne einer sicherheitstechnischen Optimierung zu vermeiden gilt. Ein in mehrere getrennte Lagerperimeter aufgeteiltes Lager erachtet das ENSI daher als nicht sicherheitsgerichtet.

Im Standortgebiet Wellenberg kann bei Einhaltung der von der Nagra gestellten Optimierungsanforderungen bzgl. Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf Gesteins-Dekompaktion (Indikator 2) das Ziel eines genügenden Platzangebotes nur erreicht werden, wenn gleichzeitig die maximale Tiefenlage im Hinblick auf bautechnische Machbarkeit überschritten würde. Das ENSI erachtet es als zweckmässig, im Standortgebiet Wellenberg Lagerperimeter aufgrund der grundsätzlichen bautechnischen Machbarkeit in grösserer Tiefe als 800 m u. T. (MA) zuzulassen (Kapitel 2.10.3).

5.1.3 Methodisches Vorgehen und resultierende Lagerperimeter

Angaben der Nagra

Bei der Umsetzung der Optimierungsstrategie werden in jedem geologischen Standortgebiet bei Bedarf verschiedene Konzeptualisierungen betrachtet (getrennt für das SMA-Lager und das HAA-Lager), nämlich eine Referenz-Konzeptualisierung und alternative (ungünstige und/oder günstige) Konzeptualisierungen (NTB 14-01). Zur Untersuchung der Sensitivität der Entscheide bezüglich der verschiedenen Optimierungsmöglichkeiten

werden für jedes geologische Standortgebiet mehrere Lagerperimeter abgegrenzt, wobei der als «massgebender Lagerperimeter für die Einengung» bezeichnete Lagerperimeter (mLE; alternativ auch als «massgeblicher Lagerperimeter für die Einengung» bezeichnet) den Ausgangspunkt für die Bewertung bildet (NTB 14-01, Anhang B).

Im Rahmen der Dokumentation zur Nachforderung des ENSI wurde die Abgrenzung von Lagerperimetern, wo sinnvoll möglich, erweitert. Zusätzlich werden ergänzend zu den bestehenden Lagerperimetern zusätzliche Lagerperimeter im Sinne einer Sensitivitätsanalyse abgegrenzt (NAB 16-41). Für das Standortgebiet Nördlich Lägern war es unter Einhaltung der zu optimierenden Indikatoren nicht möglich, einen Lagerperimeter abzugrenzen, welcher die Optimierungsanforderungen sowohl bezüglich genügendem Platzangebot als auch bezüglich maximaler Tiefenlage einhält. Für den Vergleich der Standortgebiete werden für das Gebiet Nördlich Lägern daher die im NTB 14-01 abgegrenzten Lagerperimeter HAA-NL-aL1-r bzw. SMA-NL-aL1-r verwendet (NAB 16-41).

Das methodische Vorgehen zur Berechnung einzelner Lagerperimeter (GIS-Schneideprozesses) im Opalinuston, im 'Braunen Dogger', in den Effinger Schichten bzw. in den Mergel-Formationen des Helvetikums ist in Nagra 2015b, Nagra 2015a sowie NAB 17-01 (Fragen 30 und 47) vertieft beschrieben.

Beurteilung des ENSI

Das ENSI und seine Experten haben den von der Nagra in Etappe 2 SGT gewählte Schnittprozess zur Berechnung der Lagerperimeter überprüft (ENSI 33/452). Dabei wurde die Herleitung der Lagerperimeter nach den Angaben in Nagra 2015b, NTB 14-01, NTB 14-02-II und NAB 17-01 (Fragen 30 und 47) hinsichtlich dem methodischen Vorgehen analysiert, eigene Lagerperimeter bzw. Umhüllende aller möglichen Lagerperimeter methodisch unabhängig berechnet und mit den Ergebnissen der Nagra verglichen (Abbildung 15, Abbildung 16 und Abbildung 17).

Der Vergleich der im Detail nachgerechneten massgebenden Lagerperimeter mLE bzw. den alternativen Lagerperimeter HAA-NL-OPA-aL1-r und SMA-NL-OPA-aL1-r mit den Daten der Nagra zeigt für die Lagerperimeter des Opalinustons und der Effinger Schichten in den meisten Fällen eine gute Übereinstimmung (ENSI 33/452, Tabelle 2). Die beobachteten Differenzen sind geringfügig und liegen innerhalb der Genauigkeit der Grundlagedaten. Aufgrund des Ansatzes der ENSI-Experten ergeben sich in einzelnen Standortgebieten teilweise zusätzliche SMA-Lagerperimeter, welche die Kriterien (Mindest- und verschärften Anforderungen bzw. Optimierungsanforderungen) erfüllen, die von der Nagra jedoch, aus Sicht des ENSI korrekterweise, nicht weiter verfolgt wurden.

Bei der Überprüfung der massgebenden Lagerperimeter des 'Braunen Doggers' (SMA-ZNO-BD-mLE-r und SMA-NL-BD-mLE-r), auf Basis der im NTB 14-01 angegebenen standortspezifischen Referenzmächtigkeiten für Opalinuston und 'Brauner Dogger', treten Differenzen zu den Ergebnissen der Nagra auf (ENSI 33/452, Figuren 4.8 und 4.9). Im Standortgebiet Zürich Nordost verwendet die Nagra beispielweise für den SMA-Lagerperimeter des 'Braunen Doggers' den massgebenden HAA-Lagerperimeter mit den entsprechend abweichenden Optimierungsanforderungen bzgl. minimaler und maximaler Tiefenlage. Das ENSI ist mit dem Vorgehen der Nagra nicht einverstanden, hält jedoch gleichzeitig fest, dass die BD-Lagerperimeter der Nagra innerhalb der durch die Experten des ENSI ausgeschiedenen Lagerperimeter liegen und ein ausreichendes Platzangebot bieten.

Die meisten von der Nagra ausgewiesenen Lagerperimeter im Standortgebiet Wellenberg lassen sich mit geringen Abweichungen methodisch nachvollziehen. Es zeigt sich, dass bei der Alternative ohne tertiäre Schiefer als Wirtgestein (SMA-WLB-aL1-r und SMA-WLB-aL1-re200) die Lagerperimeter an der Grenze der Palfris-Formation zu den tertiären Schiefen nicht den geforderten 200-m-Abstand zu den tertiären Schiefen einhalten, sondern nur 50 m (siehe ENSI 33/452). Die Nagra rechtfertigt diesen reduzierten Abstand damit, dass die tertiären Schiefer auch in diesem Fall noch wesentlich bessere Barriereneigenschaften haben als die übrigen Nebengesteine (NAB 17-01, Frage 55). Das ENSI ist mit dieser Begründung einverstanden.

Zur Robustheit der Abgrenzung der Lagerperimeter hält das ENSI fest, dass sich die aus der Nachrechnung der

Experten resultierende Umhüllende der möglichen Lagerperimeter gut mit den von der Nagra abgegrenzten Lagerperimetern (massgebende und alternative) deckt. Abweichungen lassen sich im Detail durch einzelne Flächen erklären, welche infolge Rundungsdifferenzen eine der Tiefenvorgaben knapp nicht erfüllen.

Zusammenfassend beurteilt das ENSI das Vorgehen der Nagra zur Abgrenzung der Lagerperimeter als allgemein methodisch nachvollziehbar. Das Vorgehen bzgl. der Lagerperimeter im Wirtgestein 'Brauner Dogger' ist nicht plausibel. Entsprechende Auswirkungen werden weiter unten diskutiert. Aufgrund der Beurteilung der Optimierungsanforderungen (Kapitel) und der eigenen Überprüfungen der GIS-Schneideprozesse beurteilt das ENSI die resultierenden optimierten untertägigen Lagerperimeter (Abbildung 15, Abbildung 16 und Abbildung 17), welche die Basis für die qualitativen Bewertung der Standortgebiete bilden, wie folgt:

Südranden

Das ENSI erachtet die für das Standortgebiet Südranden durchgeführte Optimierung der räumlichen Konfiguration des Wirtgesteins Opalinuston als sicherheitsgerichtet und verwendet ebenfalls den von der Nagra ausgewiesenen Lagerperimeter SMA-SR-mLE-r, resp. dessen prioritäre Teilfläche West, als Basis für die qualitative Bewertung des Standortgebiets. Das ENSI betrachtet diesen Lagerperimeter nachfolgend als massgebenden Lagerperimeter und bezeichnet ihn vereinfachend als **SMA-SR-OPA** (Abbildung 15a). Aus Sicht des ENSI ist die Auswahl der gewählten alternativen Lagerperimeter sinnvoll, um bestehende Ungewissheiten in der räumlichen Konfiguration zweckmässig zu berücksichtigen. Diese alternativen Lagerperimeter werden in der Bewertung des Standortgebiets ebenfalls berücksichtigt.

Zürich Nordost

Das ENSI erachtet die für das Standortgebiet Zürich Nordost durchgeführte Optimierung der räumlichen Konfiguration des Wirtgesteins Opalinuston als grundsätzlich sicherheitsgerichtet und verwendet ebenfalls den von der Nagra ausgewiesenen Lagerperimeter SMA-ZNO-mLE-r, resp. dessen prioritäre Teilfläche Nord, als Basis für die qualitative Bewertung. Nachfolgend wird dieser Lagerperimeter vom ENSI als massgebender Lagerperimeter betrachtet und vereinfachend als **SMA-ZNO-OPA** bezeichnet (Abbildung 15c). Wie in Kapitel 5.1.1 erwähnt, erfüllt der von der Nagra als massgebend bezeichnete Lagerperimeter HAA-ZNO-mLE-r die verschärften Anforderungen des Indikators 4 «Tiefenlage unter Fels im Hinblick auf glaziale Tiefenerosion» aus Sicht des ENSI nicht. Das ENSI betrachtet daher im Unterschied zur Nagra den alternativen Lagerperimeter HAA-ZNO-aL506-r (NAB 17-01, Frage 81) resp. dessen südliche Teilfläche (Abbildung 17a) als massgebenden Lagerperimeter (nachfolgend vereinfacht als **HAA-ZNO** bezeichnet).

Der von der Nagra als massgebender Lagerperimeter des Wirtgesteins 'Brauner Dogger' bezeichnete Lagerperimeter SMA-ZNO-BD-mLE-r wird ebenfalls vom ENSI für die qualitative Bewertung verwendet. Nachfolgend wird dieser als **SMA-ZNO-BD** bezeichnet (Abbildung 15d). Aufgrund der Beurteilung der Unterlagen zur Nachforderung identifiziert das ENSI bezüglich der Optimierung des Indikators 1 «Tiefenlage im Hinblick auf bautechnische Machbarkeit (unter Berücksichtigung von Gesteinsfestigkeiten und Verformungseigenschaften)» gegen Südosten zusätzliche, potenziell nutzbare Flächen. Bei Anwendung der teilweise weniger strengen Optimierungsanforderungen des ENSI bzgl. minimaler Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf Gesteins-Dekompaktion (Indikator 2) ergeben sich für SMA-ZNO-BD gegen Norden zusätzliche, potenziell nutzbare Flächen. Aus Sicht des ENSI ist die Auswahl der gewählten alternativen Lagerperimeter sinnvoll, um bestehende Ungewissheiten in der räumlichen Konfiguration zweckmässig zu berücksichtigen. Diese alternativen Lagerperimeter werden in den Bewertungen des Standortgebiets ebenfalls berücksichtigt.

Nördlich Lägern

Das ENSI beurteilt die Optimierung der Lagerperimeter im Standortgebiet Nördlich Lägern aufgrund der vorliegenden Datenlage als teilweise nicht belastbar (Kapitel 5.1.2). Bezüglich der Optimierung der Indikatoren 1 und 6 identifiziert das ENSI im Südosten (Indikator 1) sowie im Norden des Standortgebiets (Indikator 6) zusätzliche,

potenziell nutzbare Flächen. Als Basis für die qualitativen Bewertungen des Standortgebiets berücksichtigt das ENSI für das Wirtgestein Opalinuston ebenfalls die von der Nagra ausgewiesenen alternativen Lagerperimeter HAA-NL-aL1-r und SMA-NL-aL1-r. Nachfolgend werden diese Lagerperimeter vom ENSI als massgebende Lagerperimeter betrachtet und vereinfachend als **HAA-NL** und **SMA-NL-OPA** bezeichnet (Abbildung 15e und Abbildung 17b). Obwohl der von der Nagra verwendete massgebende Lagerperimeter des Wirtgesteins 'Brauner Dogger' SMA-NL-BD-mLE-r, welcher auf dem Lagerperimeter SMA-NL-OPA-aL1-r basiert, nach Ansicht des ENSI nicht plausibel abgegrenzt wurde, wird er trotzdem vom ENSI für die qualitative Bewertung verwendet, da aufgrund der Beurteilung der Unterlagen zur Nachforderung bei der maximale Tiefenlage für ein SMA-Lager von den Mindestanforderungen von 800 m u. T. ausgegangen werden muss und der Lagerperimeter somit über ein genügend grosses Platzangebot verfügt. Nachfolgend wird dieser als **SMA-NL-BD** bezeichnet (Abbildung 15f). Aus Sicht des ENSI ist die Auswahl der gewählten alternativen Lagerperimeter sinnvoll, um bestehende Ungewissheiten in der räumlichen Konfiguration zweckmässig zu berücksichtigen. Diese alternativen Lagerperimeter werden in den Bewertungen des Standortgebiets ebenfalls berücksichtigt.

Jura Ost

Das ENSI erachtet die für das Standortgebiet Jura Ost durchgeführte Optimierung der räumlichen Konfiguration des Wirtgesteins Opalinuston als sicherheitsgerichtet und verwendet ebenfalls die von der Nagra ausgewiesenen Lagerperimeter HAA-JO-mLE-r und SMA-JO-mLE-r als Basis für die qualitativen Bewertungen des Standortgebiets. Nachfolgend werden diese Lagerperimeter vom ENSI als massgebende Lagerperimeter betrachtet und vereinfachend als **HAA-JO** und **SMA-JO-OPA** bezeichnet (Abbildung 15b und Abbildung 17c). Aus Sicht des ENSI ist die Auswahl der gewählten alternativen Lagerperimeter sinnvoll, um bestehende Ungewissheiten in der räumlichen Konfiguration zweckmässig zu berücksichtigen. Diese alternativen Lagerperimeter werden in den Bewertungen des Standortgebiets ebenfalls berücksichtigt.

Jura-Südfuss

Aufgrund der Beurteilung der Unterlagen zur Nachforderung identifiziert das ENSI bezüglich der Optimierung des Indikators 1 «Tiefenlage im Hinblick auf bautechnische Machbarkeit (unter Berücksichtigung von Gesteinsfestigkeiten und Verformungseigenschaften)» gegen Südosten für das Wirtgestein Opalinuston und gegen Osten für das Wirtgestein Effinger Schichten zusätzliche, potenziell nutzbare Flächen. Bei Anwendung der teilweise weniger strengen Optimierungsanforderungen des ENSI bzgl. Indikator 2 ergeben sich für das Wirtgestein Effinger Schichten gegen Westen zusätzliche, potenziell nutzbare Flächen. Das ENSI verwendet ebenfalls den von der Nagra für das Wirtgestein Opalinuston ausgewiesenen Lagerperimeter SMA-JS-mLE-r als Basis für die qualitative Bewertung des Standortgebiets. Nachfolgend wird dieser Lagerperimeter vom ENSI als massgebender Lagerperimeter betrachtet und vereinfachend als **SMA-JS-OPA** bezeichnet (Abbildung 15g). Der massgebende Lagerperimeter des Wirtgesteins Effinger Schichten SMA-JS-EFF-mLE-r wird ebenfalls vom ENSI für die qualitative Bewertung verwendet. Nachfolgend wird dieser als **SMA-JS-EFF** bezeichnet (Abbildung 15h). Aus Sicht des ENSI ist die Auswahl der gewählten alternativen Lagerperimeter sinnvoll, um bestehende Ungewissheiten in der räumlichen Konfiguration zweckmässig zu berücksichtigen. Diese alternativen Lagerperimeter werden in den Bewertungen des Standortgebiets ebenfalls berücksichtigt.

Wellenberg

Das ENSI verwendet abweichend von der Nagra nicht den Lagerperimeter SMA-WLB-mLE-r sondern den Fall SMA-WLB-mLE-re200 als Basis für die qualitative Bewertung des Standortgebiets (ENSI 33/539). Nachfolgend wird dieser Lagerperimeter vom ENSI als massgebender Lagerperimeter betrachtet und vereinfachend als **SMA-WLB-MGL** bezeichnet (Abbildung 16a bis c). Im Standortgebiet Wellenberg kann bei Einhaltung der MA bzgl. Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf Gesteins-Dekompaktion (Indikator 2), das Ziel eines genügenden Platzangebotes nur erreicht werden, wenn gleichzeitig die maximale Tiefenlage im Hinblick auf bautechnische Machbarkeit (Indikator 1) überschritten würde (Kapitel 2.10.3). Das ENSI erachtet es als zweckmässig, im

Standortgebiet Wellenberg Lagerperimeter unterhalb der Mindestanforderung von 800 m u. T. abzugrenzen, da die Erstellung der Lagerkammer in den Mergel-Formationen des Helvetikums auch in grösseren Tiefen grundsätzlich bautechnisch machbar ist (Kapitel 6.1.4 und 2.10.3). Der Lagerperimeter SMA-WLB-MGL wird im Norden und im Süden durch die Palfries-Formation bzw. die Axen-Decke abgegrenzt. Aufgrund der begrenzten horizontalen Ausdehnung sind mehrere Lagerebenen notwendig. Aus Sicht des ENSI ist die Auswahl der gewählten alternativen Lagerperimeter sinnvoll, um bestehende Ungewissheiten in der räumlichen Konfiguration zweckmässig zu berücksichtigen. Diese alternativen Lagerperimeter werden in der Bewertung des Standortgebiets ebenfalls berücksichtigt.

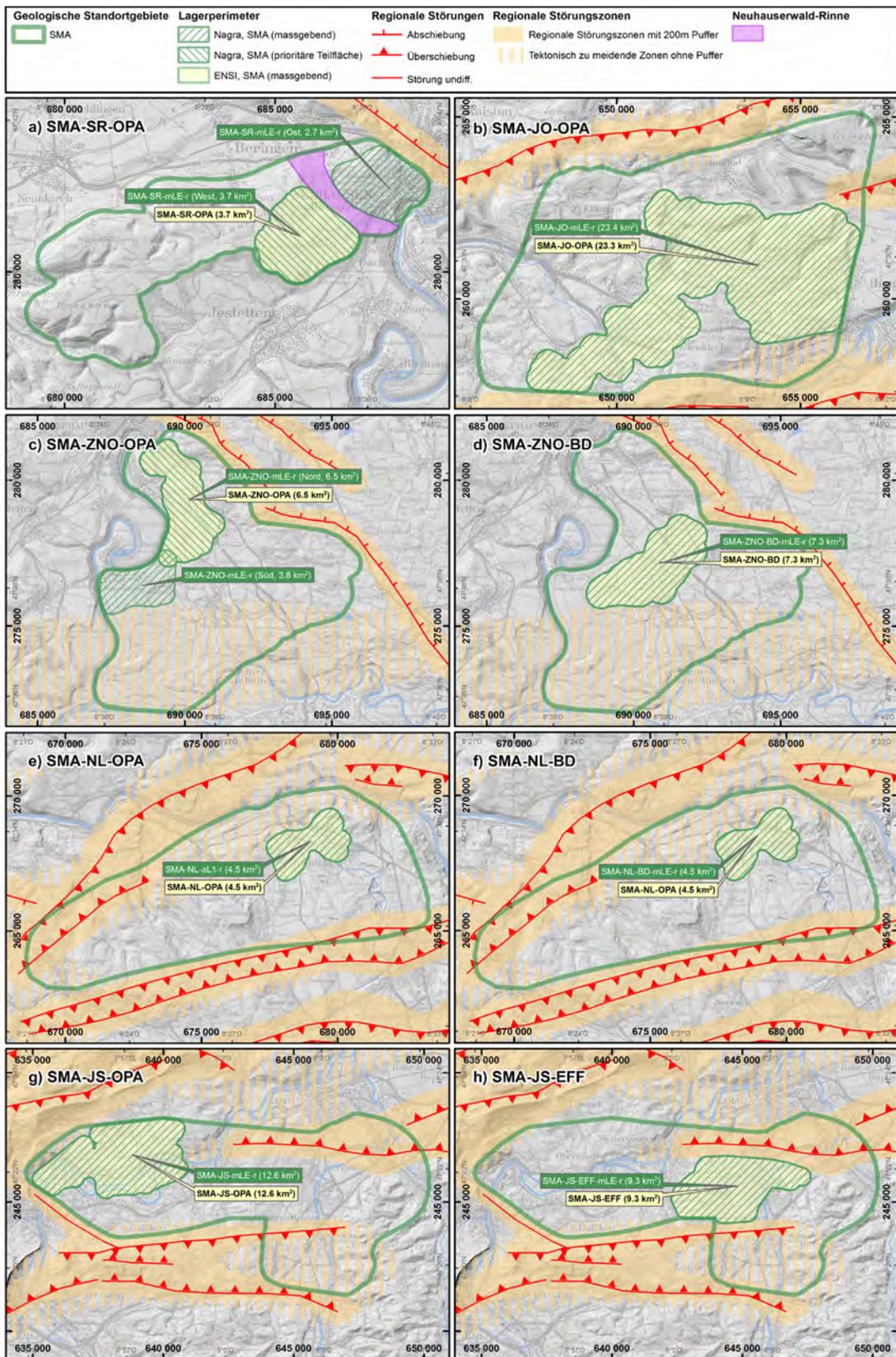


Abbildung 15: Vergleich der massgebenden SMA-Lagerperimeter der Nagra (grün schraffiert) mit denjenigen des ENSI (gelb) in den geologischen Standortgebieten der Nordschweiz: a) Südranden (Opalinuston), b) Jura Ost (Opalinuston), c) Zürich Nordost (Opalinuston), d) Zürich Nordost ('Brauner Dogger'), e) Nördlich Lägern (Opalinuston), f) Nördlich Lägern ('Brauner Dogger'), g) Jura-Südfuss (Opalinuston) und h) Jura-Südfuss (Effinger Schichten).

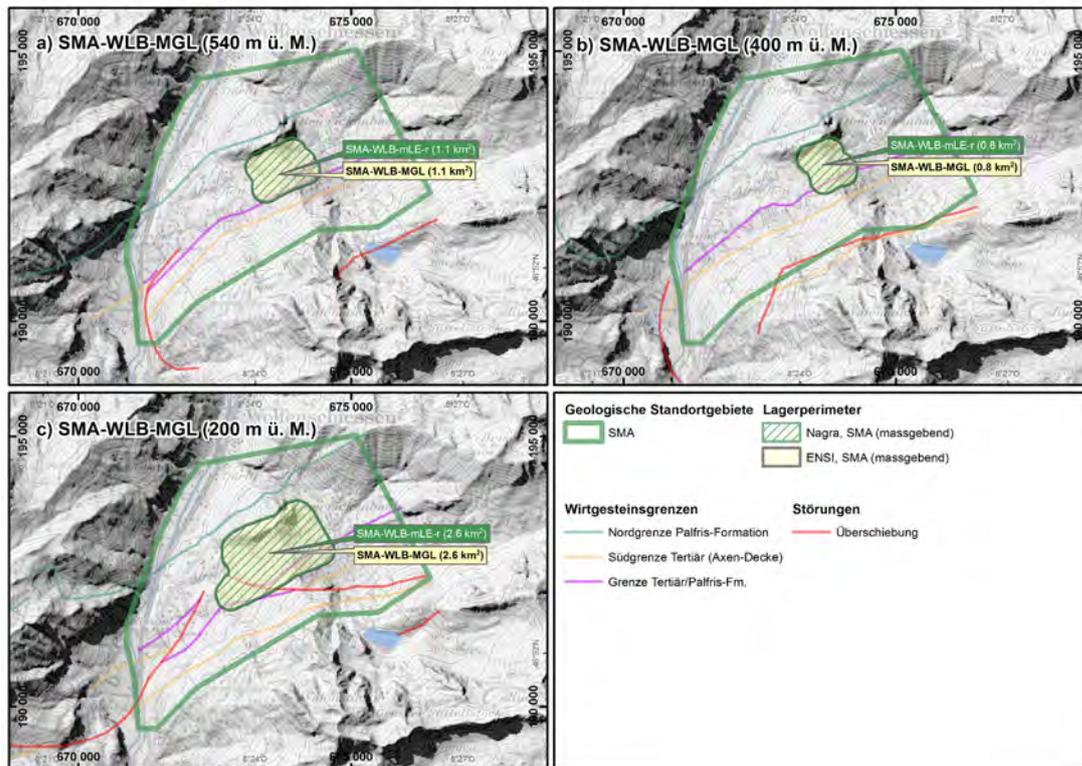


Abbildung 16: Vergleich der massgebenden SMA-Lagerperimeter der Nagra (SMA-WLB-mLE-r, grün schraffiert) mit denjenigen des ENSI (gelb) im geologischen Standortgebiet Wellenberg auf den drei Lagerebenen 540 (a), 400 (b) und 200 m ü. M. (c). Die vom ENSI als massgebend betrachtenden Lagerperimeter basieren auf dem Fall SMA-WLB-mLE-re200 und sind flächenmässig deckungsgleich mit denjenigen der Nagra.

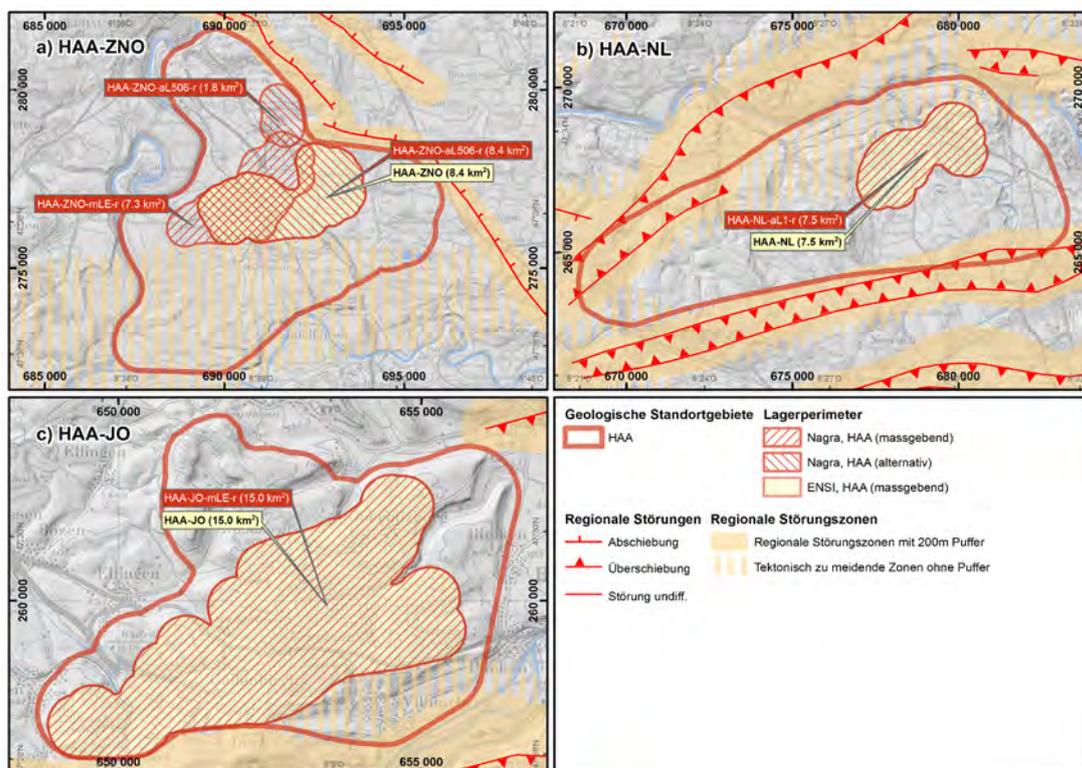


Abbildung 17: Vergleich der massgebenden HAA-Lagerperimeter der Nagra (rot schraffiert) mit denjenigen des ENSI (gelb) in den geologischen Standortgebieten: a) Zürich Nordost, b) Nördlich Lägern und c) Jura Ost.

5.2 Dosisberechnungen für die optimierten Lagerperimeter in den geologischen Standortgebieten

Die Nagra hat in Etappe 2 SGT für alle geologischen Standortgebiete provisorische Sicherheitsanalysen und einen sicherheitstechnischen Vergleich durchzuführen (Kapitel 1 und 4). Der quantitative Teil der provisorischen Sicherheitsanalysen besteht aus Dosisberechnungen für jedes Standortgebiet. Dazu ist die aus der realistischerweise zu erwartende Entwicklung des Tiefenlagers (Referenzfall für die Dosisberechnungen, RF) resultierende zeitabhängige Dosiskurve zu berechnen. Um die Robustheit des Referenzszenariums sowie den Einfluss von Ungewissheiten und Variabilitäten zu beurteilen, ist ein auf den RF aufbauendes, standardisiertes Parameter variationsverfahren durchzuführen. Aus den Dosismaxima des RF und des Parameter variationsverfahrens ergibt sich für jedes Standortgebiet im Betrachtungszeitraum ein charakteristisches Dosisintervall (Abbildung 18) als eine Grundlage für die sicherheitstechnische Bewertung in Etappe 2 SGT. Folgende Rechenfälle sind gemäss ENSI 33/075 im Rahmen dieses Parameter variationsverfahrens mindestens zu betrachten:

- ENSI-Fall a: Berechnungen mit einem gegenüber dem Referenzfall erhöhten Wasserfluss durch den Tiefenlagerbereich (oberer Eckwert).
- ENSI-Fall b: Berechnungen mit gegenüber dem Referenzfall ungünstigen nuklidspezifischen Diffusionskoeffizienten (obere Eckwerte für homogen-poröse Wirtgesteine, untere Eckwerte für geklüftete Wirtgesteine) in der Geosphäre.
- ENSI-Fall c: Berechnungen mit gegenüber dem Referenzfall erhöhten nuklidspezifischen Löslichkeitslimiten (obere Eckwerte) im Nahfeld.
- ENSI-Fall d: Berechnungen mit gegenüber dem Referenzfall verringerten Sorptionskoeffizienten (untere Eckwerte für K_d) im Nah- und Fernfeld. Falls der K_d -Referenzwert eines Nuklids weniger als $0.001 \text{ m}^3/\text{kg}$ beträgt, ist in den Berechnungen ein K_d -Wert von $0 \text{ m}^3/\text{kg}$ zu verwenden.
- ENSI-Fall e: Ausgehend vom Referenzfall ist der Einfluss von möglichen alternativen Klimavarianten im Betrachtungszeitraum für das SMA- resp. HAA-Lager aufzuzeigen. (ENSI-Fall e1 entspricht hier einer Klimavariante mit wärmerem und trockenerem Klima, ENSI-Fall e2 einer eiszeitlichen Klimavariante).

Zusätzlich für HAA-Lager:

- ENSI-Fall f: Berechnungen mit einer gegenüber dem Referenzfall hundertfach erhöhten Auflösungsrate der einzulagernden abgebrannten Brennelemente (Brennstoffmatrix und Brennelementhüllrohre).
- ENSI-Fall g: Berechnungen mit Annahme einer auf 1000 Jahre begrenzten Behälterlebensdauer.

Der zu berücksichtigende Betrachtungszeitraum beträgt 100 000 Jahre für ein SMA-Lager und 1 000 000 Jahre für ein HAA-Lager (ENSI 33/075).

Für den Vergleich von Standortgebieten werden die Resultate der quantitativen provisorischen Sicherheitsanalyse herangezogen und die berechneten Dosisintervalle anhand von zwei radiologischen Kriterien bewertet (ENSI 33/075). Das erste Kriterium ist das in der Richtlinie ENSI-G03 festgelegte Schutzkriterium von $0.1 \text{ mSv}/\text{Jahr}$, unterhalb welchem alle Standortgebiete als sicherheitstechnisch geeignet in Bezug auf die Dosisberechnungen in Etappe 2 SGT sind. Das zweite Kriterium ist der aus der Strahlenschutzverordnung (StSV) abgeleitete Wert von $0.01 \text{ mSv}/\text{Jahr}$, unterhalb welchem alle Standortgebiete als sicherheitstechnisch gleichwertig in Bezug auf die Dosisberechnungen in Etappe 2 SGT betrachtet werden.

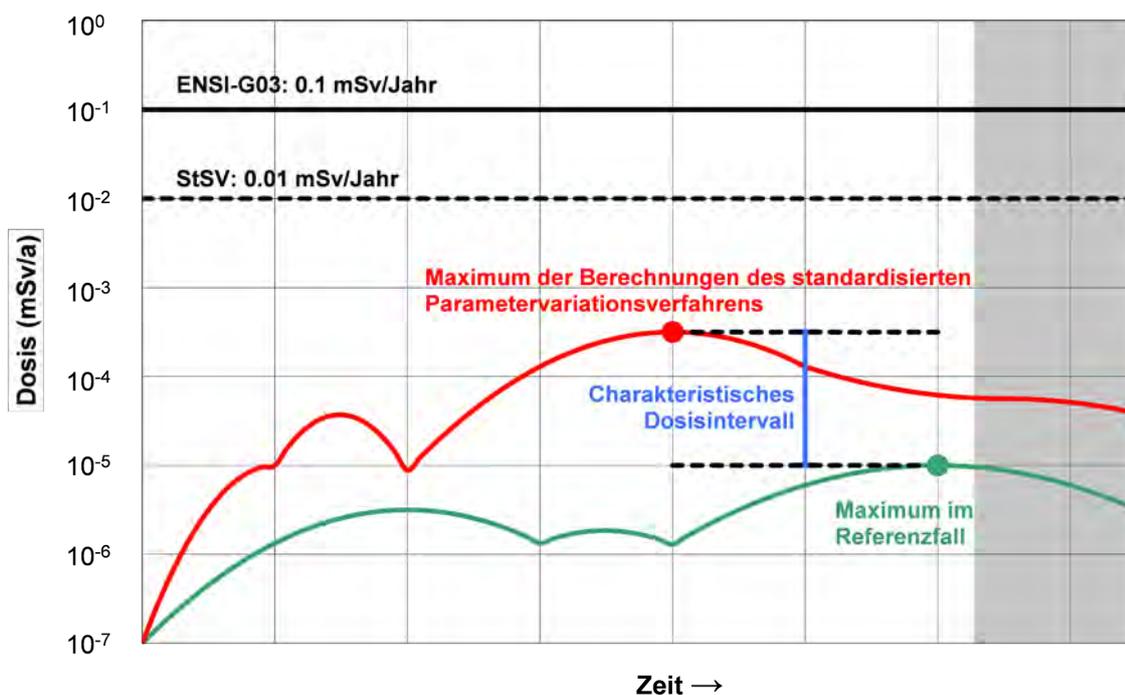


Abbildung 18: Ermittlung des in der Vergleichsmethode verwendeten charakteristischen Dosisintervalls für ein Tiefenlagerstandortgebiet: Der zeitliche Verlauf der berechneten Dosen wird für den Referenzfall (grün) und für die mit dem Parameter variationsverfahren definierten Fälle (rot) berechnet. Die jeweiligen Dosismaxima sind eingezeichnet (gefüllte Kreise), sie legen das Dosisintervall (blau) fest. Anmerkung: Die eingezeichneten Dosiscurven sind hypothetische Beispiele (ENSI 33/075).

5.2.1 Methodisches Vorgehen

Angaben der Nagra

Die Nagra hat, zusätzlich zu den vom ENSI geforderten Fällen, für jedes Standortgebiet einen sogenannten massgebenden Fall für die Einengung (mFE) betrachtet und diesen für die Ermittlung des charakteristischen Dosisintervalls ebenfalls herangezogen (Kapitel 3.3.1). Den massgebenden Fall für die Einengung (mFE) definiert die Nagra als einen Fall, der auf einer ungünstigen Situation beruht, die aufgrund einzelner Evidenzen oder allgemeiner lithologischer Überlegungen für die Dauer des Betrachtungszeitraums nicht auszuschliessen ist und die auch nach zusätzlichen Untersuchungen im Zuge der Lagerrealisierung voraussichtlich nicht ausgeschlossen werden kann (NTB 14-03).

Mit alternativen Fällen hat die Nagra, zusätzlich zu den ENSI-Fällen und dem mFE, weitere Ungewissheiten erfasst und die Wirksamkeit der Barriersysteme bezüglich ausgewählter Prozesse und Parameter bzw. Indikatoren untersucht (NTB 14-03; NAB 14-36). Die Resultate dieser alternativen Fälle fliessen nicht in das charakteristische Dosisintervall ein.

Beurteilung des ENSI

Das ENSI hat für die Überprüfung der Dosisberechnungen der Nagra eigene Modellberechnungen durchgeführt. Dabei hat es die folgenden dosisdominierenden Radionuklide berücksichtigt: $^{14}\text{C}_{\text{org}}$ und $^{14}\text{C}_{\text{org-c}}$ (organischer Kohlenstoff aus verschiedenen Quellen), ^{36}Cl , ^{40}K , ^{79}Se , $^{108\text{m}}\text{Ag}$ und ^{129}I . Der Beitrag der einzelnen Radionuklide zur Gesamtdosis variiert je nach betrachtetem Rechenfall. Das ENSI beurteilt den von der Nagra berücksichtigten mFE jeweils als plausibel (Kapitel 3.3.1). Für jedes Standortgebiet und jedes Wirtgestein hat das ENSI eigene Berechnungen jeweils für den RF, den mFE sowie den Fall, der im Rahmen des Parameter variationsverfahrens zum höchsten Dosismaximum führte, dokumentiert. Bei den letzteren handelt es sich meist um die ENSI-Fälle a,

b und e1. Die Ergebnisse der Berechnungen des ENSI und der Nagra für die betrachteten Fälle werden in diesem Teilkapitel einander gegenübergestellt.

Im Rahmen der Überprüfung der Dosisberechnungen hat das ENSI auch die Konzeptualisierung und Parametrisierung der Ausbreitungsmodelle der Nagra überprüft (Kapitel 3.3.1). Sofern das ENSI zu abweichenden Schlussfolgerungen für die Konzeptualisierung und die Parametrisierung gekommen ist, wurden diese in den eigenen Berechnungen berücksichtigt. Das ENSI hat für alle Standortgebiete zusätzliche Rechenfälle mit ungünstigeren Werten der effektiven Diffusionskoeffizienten (im Folgenden als ENSI-Fall b* bezeichnet, Kapitel 3.3.3) betrachtet. Für das Standortgebiet Wellenberg hat das ENSI einen zusätzlichen Rechenfall mit einem höheren oberen Eckwert der hydraulischen Durchlässigkeit (im Folgenden ENSI-Fall a*) durchgeführt. Für das Standortgebiet Jura-Südfuss hat das ENSI sicherheitsgerichtet in seinen Berechnungen die standortspezifische Mächtigkeit des Opalinustons von 90 m (Bohrung Gösgen SB-4 (NAB 14-101)) verwendet, anstatt des von der Nagra verwendeten einheitlichen Referenzwerts der Mächtigkeit von 100 m. Für das Standortgebiet Jura-Südfuss mit dem Wirtgestein Effinger Schichten hat das ENSI ungünstigere Referenzwerte für die Sorptionskoeffizienten im Zementnahfeld in seinen Berechnungen für den Fall mit den ungünstigen effektiven Diffusionskoeffizienten, ENSI-Fall b*, verwendet (im Folgenden ENSI-Fall b**, Kapitel 3.3.4).

5.2.2 SMA-Standortgebiet Südranden

Angaben der Nagra

Die Nagra hat für den Fall eines SMA-Lagers im Standortgebiet Südranden Dosisberechnungen mit dem Wirtgestein Opalinuston durchgeführt (NTB 14-03; NAB 14-36). Im RF werden für die Berechnungen Freisetzungspunkte am oberen Rand des Opalinustons und im Arietenkalk unterhalb des Tonigen Lias angenommen, während sie sich beim mFE am oberen und unteren Rand des Opalinustons befinden (Abbildung 7). Die dosisdominierenden Radionuklide sind $^{14}\text{C}_{\text{org-c}}$, ^{36}Cl , ^{40}K , ^{79}Se und ^{129}I . Das von der Nagra ermittelte charakteristische Dosisintervall wird durch den RF und den vom ENSI geforderten Fall b bestimmt (NTB 14-03) und liegt sowohl unterhalb des Schutzkriteriums von 0.1 mSv/Jahr (Richtlinie ENSI-G03) als auch unterhalb des Schwellenwerts von 0.01 mSv/Jahr (StSV).

Beurteilung des ENSI

Das ENSI hat die Resultate der Nagra mit eigenen Berechnungen überprüft. Der Vergleich der Dosiskurven der dosisdominierenden Radionuklide für die Rechenfälle RF, mFE, ENSI-Fall b sowie ENSI-Fall b* ist in Abbildung 19 dargestellt.

Die von der Nagra für die Ermittlung des charakteristischen Dosisintervalls für das SMA-Standortgebiet Südranden mit dem Wirtgestein Opalinuston durchgeführten Modellberechnungen entsprechen den methodischen Vorgaben des ENSI. Das ENSI kommt mit eigenen Berechnungen für ausgewählte Rechenfälle zu vergleichbaren Ergebnissen. Das resultierende charakteristische Dosisintervall des ENSI wird durch den RF und den ENSI-Fall b* bestimmt und liegt sowohl unterhalb des Schutzkriteriums von 0.1 mSv/Jahr (Richtlinie ENSI-G03) als auch unterhalb des Schwellenwerts von 0.01 mSv/Jahr (StSV).

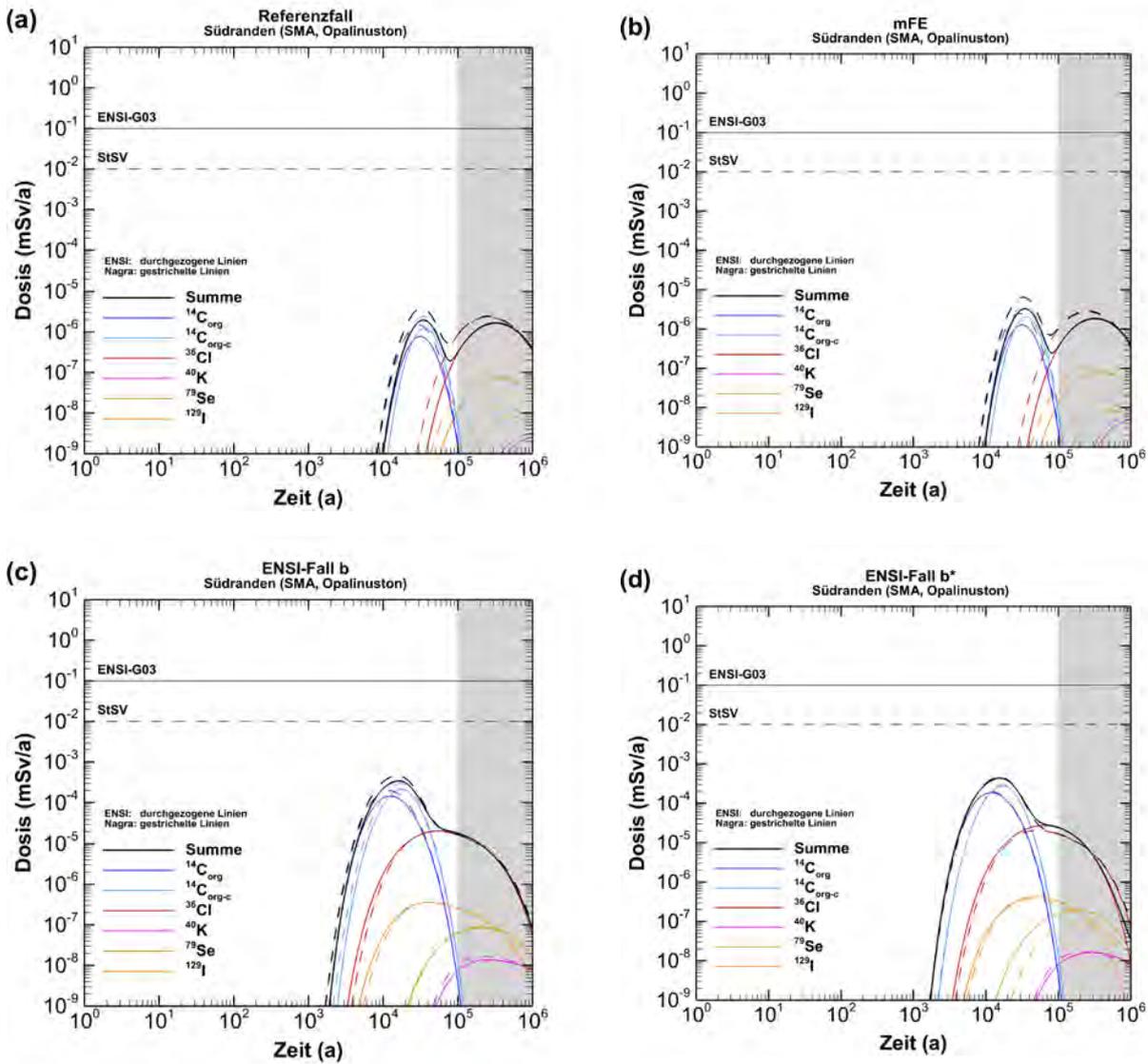


Abbildung 19: Vergleich der von Nagra (gestrichelte Linien) und ENSI (durchgezogene Linien) berechneten Dosiskurven für die dosisdominierenden Radionuklide für (a) den RF, (b) den mFE, (c) den ENSI-Fall b und (d) den vom ENSI zusätzlich betrachteten ENSI-Fall b* (zum Vergleich sind die Ergebnisse der Nagra für den ENSI-Fall b dargestellt) für ein SMA-Lager im Standortgebiet Südranden mit dem Wirtgestein Opalinuston. Der grau gefärbte Bereich markiert die Zeit jenseits des Betrachtungszeitraums.

5.2.3 SMA-Standortgebiet Zürich Nordost mit Wirtgestein 'Brauner Dogger'

Angaben der Nagra

Die Nagra hat für den Fall eines SMA-Lagers im Standortgebiet Zürich Nordost Dosisberechnungen mit dem Wirtgestein 'Brauner Dogger' durchgeführt (NTB 14-03, NAB 14-36). Im RF werden für die Berechnungen Freisetzungspunkte am oberen Rand der Effinger Schichten und im Arietenkalk angenommen, während sie sich beim mFE in SKA-4 und SKA-5 befinden (Abbildung 7). Die dosisdominierenden Radionuklide sind $^{14}\text{C}_{\text{org}}$, $^{14}\text{C}_{\text{org-c}}$, ^{36}Cl , ^{40}K , ^{79}Se , ^{129}I und $^{108\text{m}}\text{Ag}$. Das von der Nagra ermittelte charakteristische Dosisintervall wird durch den RF und durch den mFE bestimmt (NTB 14-03) und liegt sowohl unterhalb des Schutzniveaus von 0.1 mSv/Jahr (Richtlinie ENSI-G03) als auch unterhalb des Schwellenwerts von 0.01 mSv/Jahr (StSV).

Beurteilung des ENSI

Das ENSI hat die Resultate der Nagra mit eigenen Berechnungen überprüft. Der Vergleich der Dosiskurven der dosisdominierenden Radionuklide für die Rechenfälle RF, mFE, ENSI-Fall b und ENSI-Fall b* ist in Abbildung 20 dargestellt.

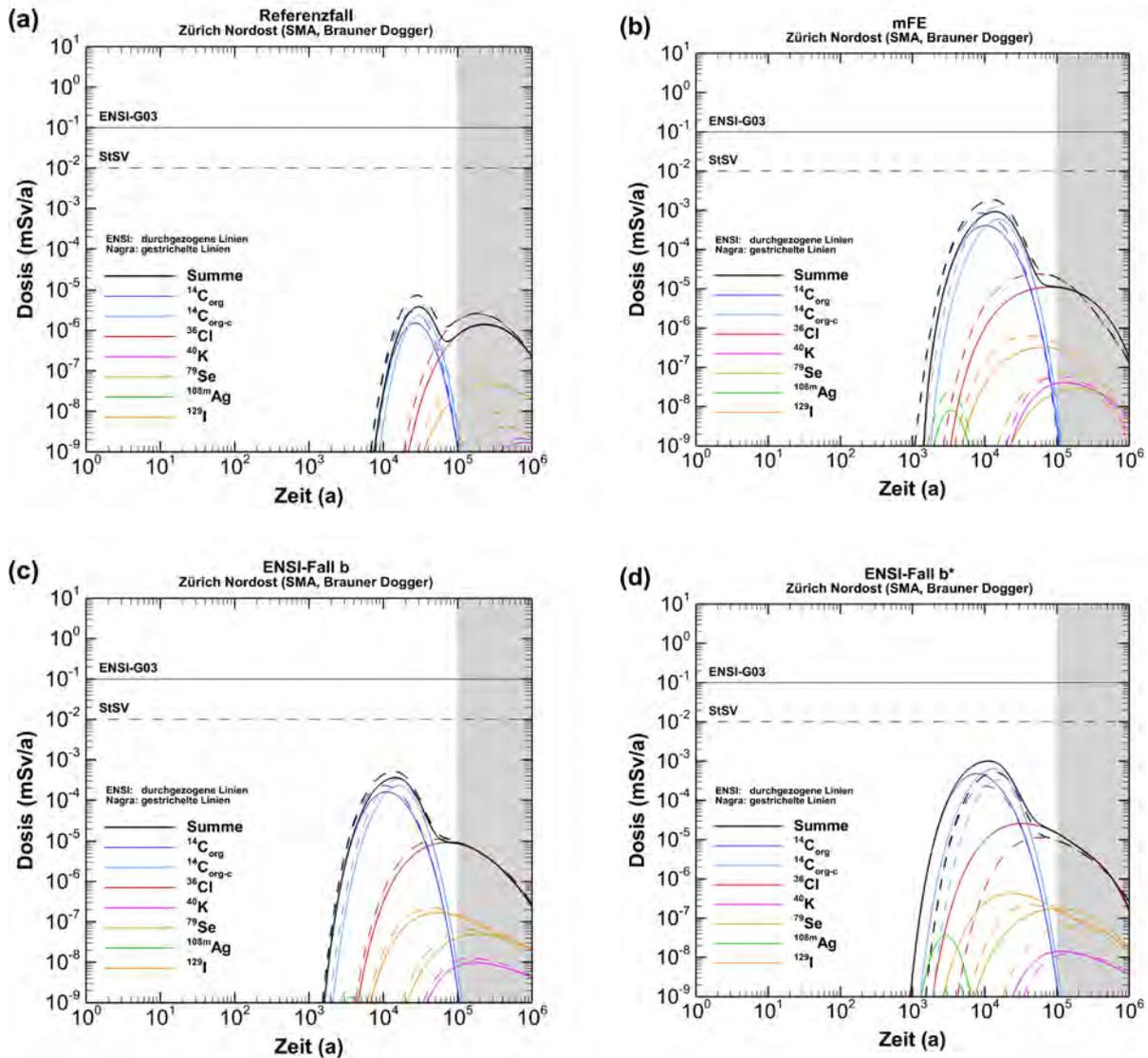


Abbildung 20: Vergleich der von Nagra (gestrichelte Linien) und ENSI (durchgezogene Linien) berechneten Dosiskurven für die dosisdominierenden Radionuklide für (a) den RF, (b) den mFE, (c) den ENSI-Fall b und (d) den vom ENSI zusätzlich betrachteten ENSI-Fall b* (zum Vergleich sind die Ergebnisse der Nagra für den ENSI-Fall b dargestellt) für ein SMA Lager im Standortgebiet Zürich Nordost mit dem Wirtgestein 'Brauner Dogger'. Der grau gefärbte Bereich markiert die Zeit jenseits des Betrachtungszeitraums.

Die von der Nagra für die Ermittlung des charakteristischen Dosisintervalls für das SMA-Standortgebiet Zürich Nordost mit dem Wirtgestein 'Brauner Dogger' durchgeführten Modellberechnungen entsprechen den methodischen Vorgaben des ENSI. Das ENSI kommt mit eigenen Berechnungen für ausgewählte Rechenfälle zu vergleichbaren Ergebnissen. Im Gegensatz zur Nagra wird das resultierende charakteristische Dosisintervall des ENSI durch den RF und den ENSI-Fall b* bestimmt und liegt sowohl unterhalb des Schutzkriteriums von 0.1 mSv/Jahr (Richtlinie ENSI-G03) als auch unterhalb des Schwellenwerts von 0.01 mSv/Jahr (StSV).

5.2.4 SMA-Standortgebiet Zürich Nordost mit Wirtgestein Opalinuston

Angaben der Nagra

Die Nagra hat für den Fall eines SMA-Lagers im Standortgebiet Zürich Nordost Dosisberechnungen mit dem Wirtgestein Opalinuston durchgeführt (NTB 14-03; NAB 14-36). Im RF werden für die Berechnungen Freisetzungspunkte am oberen Rand der Effinger Schichten und im Arietenkalk angenommen, während sie sich beim mFE direkt ober- und unterhalb des Opalinustons befinden (Abbildung 7). Die dosisdominierenden Radionuklide sind $^{14}\text{C}_{\text{org}}$, $^{14}\text{C}_{\text{org-c}}$, ^{36}Cl , ^{40}K , ^{79}Se und ^{129}I . Das von der Nagra ermittelte charakteristische Dosisintervall wird durch den RF und in diesem Fall durch den vom ENSI geforderten Fall b bestimmt (NTB 14-03) und liegt sowohl unterhalb des Schutzkriteriums von 0.1 mSv/Jahr (Richtlinie ENSI-G03) als auch unterhalb des Schwellenwerts von 0.01 mSv/Jahr (StSV).

Beurteilung des ENSI

Das ENSI hat die Resultate der Nagra mit eigenen Berechnungen überprüft. Der Vergleich der Dosiskurven der dosisdominierenden Radionuklide für die Rechenfälle RF, mFE, ENSI-Fall b sowie ENSI-Fall b* ist in Abbildung 21 dargestellt.

Die von der Nagra für die Ermittlung des charakteristischen Dosisintervalls für das SMA-Standortgebiet Zürich Nordost mit dem Wirtgestein Opalinuston durchgeführten Modellberechnungen entsprechen den methodischen Vorgaben des ENSI. Das ENSI kommt mit eigenen Berechnungen für ausgewählte Rechenfälle zu vergleichbaren Ergebnissen. Das resultierende charakteristische Dosisintervall des ENSI wird durch den RF und den ENSI-Fall b* bestimmt. Der ENSI-Fall b* führt in diesem Fall zu einem deutlich höheren Wert für die Obergrenze des charakteristischen Dosisintervalls, der jedoch sowohl unterhalb des Schutzkriteriums von 0.1 mSv/Jahr (Richtlinie ENSI-G03) als auch unterhalb des Schwellenwerts von 0.01 mSv/Jahr (StSV) liegt.

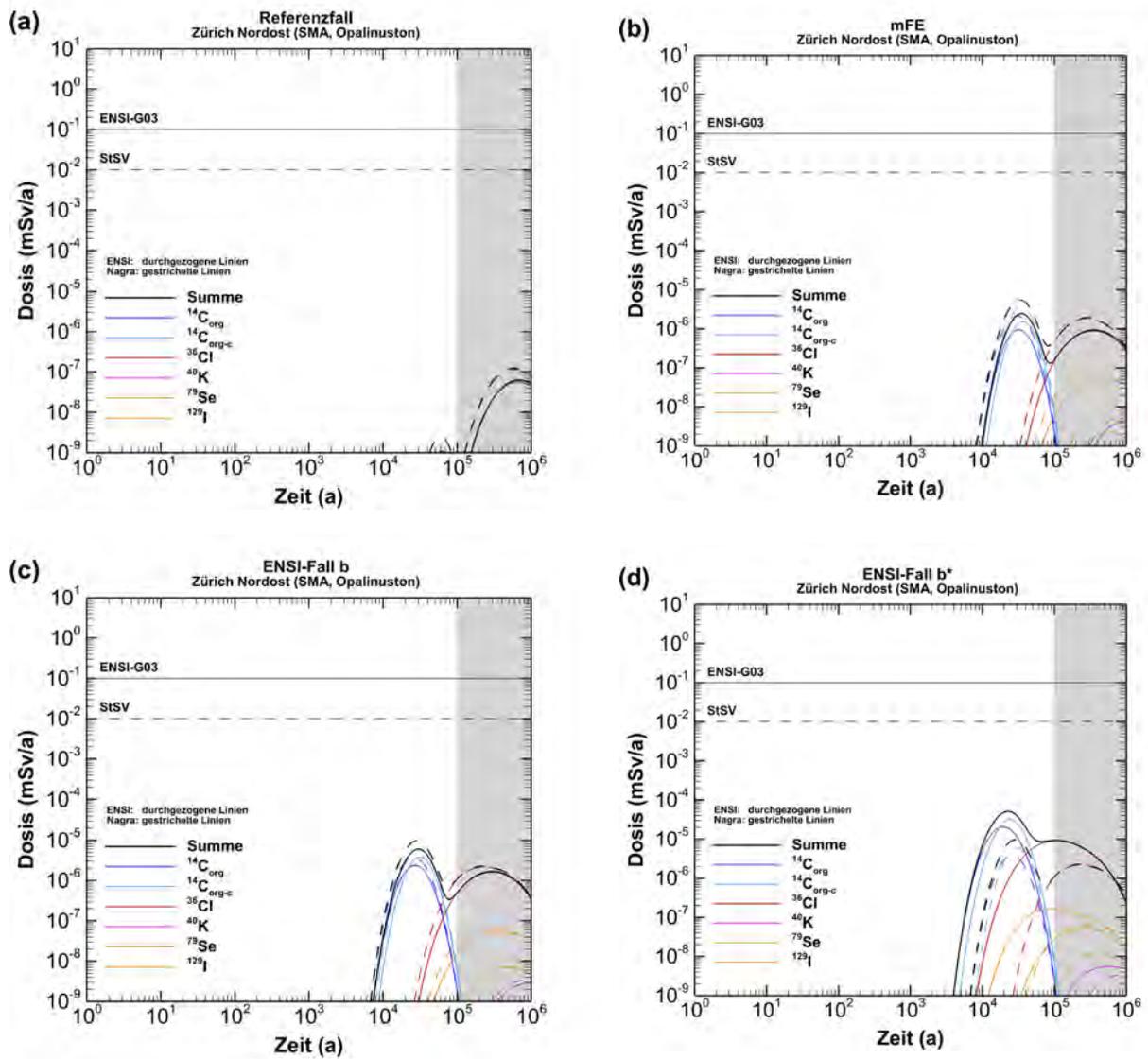


Abbildung 21: Vergleich der von Nagra (gestrichelte Linien) und ENSI (durchgezogene Linien) berechneten Dosiskurven für die dosisdominierenden Radionuklide für (a) den RF, (b) den mFE, (c) den ENSI-Fall b und (d) den vom ENSI zusätzlich betrachteten ENSI-Fall b* (zum Vergleich sind die Ergebnisse der Nagra für den ENSI-Fall b dargestellt) für ein SMA Lager im Standortgebiet Zürich Nordost mit dem Wirtgestein Opalinuston. Der grau gefärbte Bereich markiert die Zeit jenseits des Betrachtungszeitraums.

5.2.5 SMA-Standortgebiet Nördlich Lägern mit Wirtgestein 'Brauner Dogger'

Angaben der Nagra

Die Nagra hat für den Fall eines SMA-Lagers im Standortgebiet Nördlich Lägern Dosisberechnungen mit dem Wirtgestein 'Brauner Dogger' durchgeführt (NTB 14-03; NAB 14-36). Im RF werden für die Berechnungen Freisetzungspunkte am oberen Rand der Effinger Schichten und im Arietenkalk angenommen, während sie sich beim mFE in der jeweils ersten Kalkbank des 'Braunen Doggers' ober- und unterhalb der Lagerkammern befinden (Abbildung 7). Die dosisdominierenden Radionuklide sind $^{14}\text{C}_{\text{org}}$, $^{14}\text{C}_{\text{org-c}}$, ^{36}Cl , ^{40}K , ^{79}Se , $^{108\text{m}}\text{Ag}$ und ^{129}I . Das von der Nagra ermittelte charakteristische Dosisintervall wird durch den RF und den mFE bestimmt (NTB 14-03) und liegt sowohl unterhalb des Schutzkriteriums von 0.1 mSv/Jahr (Richtlinie ENSI-G03) als auch unterhalb des Schwellenwerts von 0.01 mSv/Jahr (StSV).

Beurteilung des ENSI

Das ENSI hat die Resultate der Nagra mit eigenen Berechnungen überprüft. Der Vergleich der Dosiskurven der dosisdominierenden Radionuklide für die Rechenfälle RF, mFE, ENSI-Fall b sowie ENSI-Fall b* ist in Abbildung 22 dargestellt.

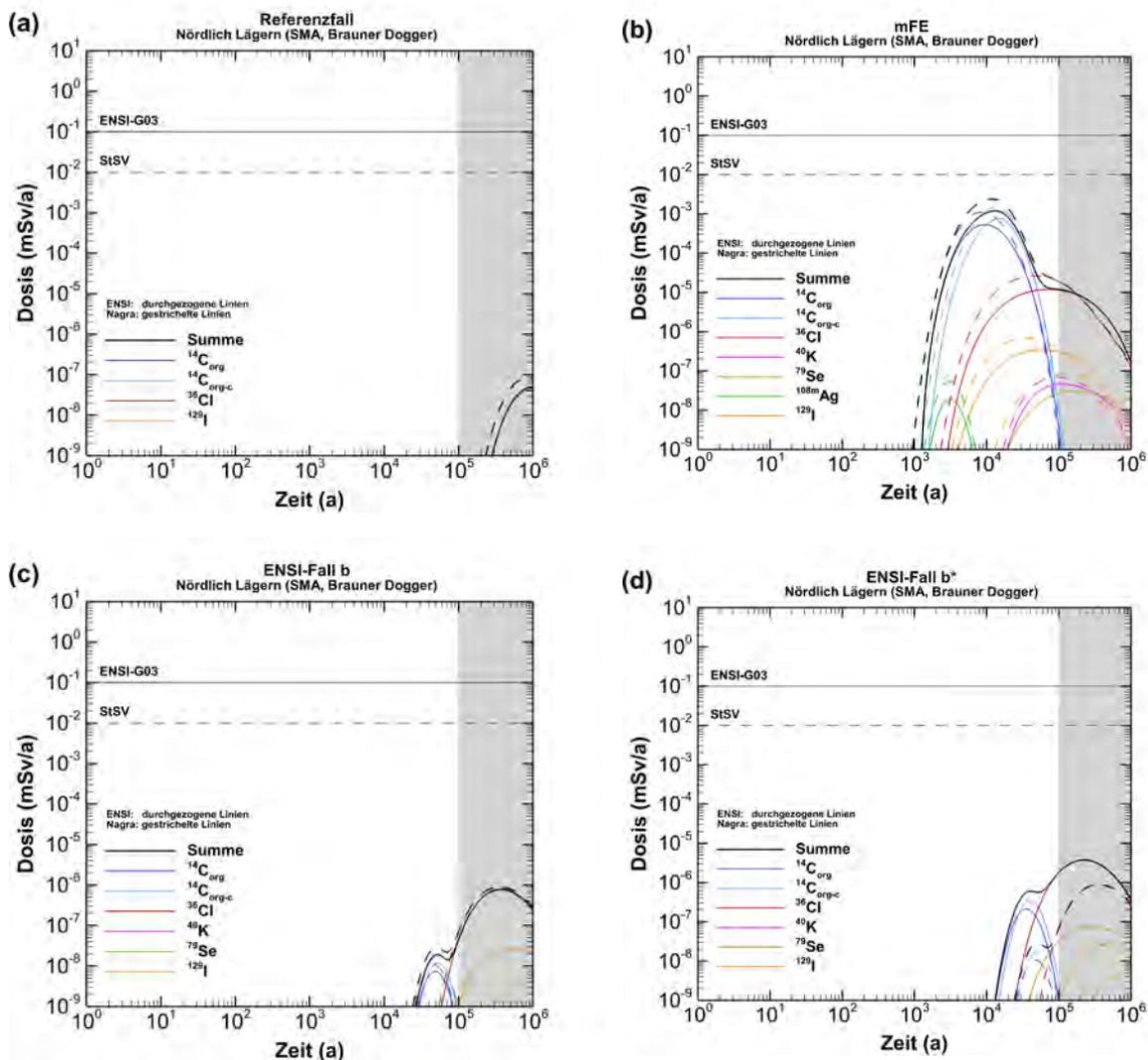


Abbildung 22: Vergleich der von Nagra (gestrichelte Linien) und ENSI (durchgezogene Linien) berechneten Dosiskurven für die dosisdominierenden Radionuklide für (a) den RF, (b) den mFE, (c) den ENSI-Fall b und (d) den vom ENSI zusätzlich betrachteten ENSI-Fall b* (zum Vergleich sind die Ergebnisse der Nagra für den ENSI-Fall b dargestellt) für ein SMA Lager im Standortgebiet Nördlich Lägern mit dem Wirtgestein 'Brauner Dogger'. Der grau gefärbte Bereich markiert die Zeit jenseits des Betrachtungszeitraums.

Die von der Nagra für die Ermittlung des charakteristischen Dosisintervalls für das SMA-Standortgebiet Nördlich Lägern mit dem Wirtgestein 'Brauner Dogger' durchgeführten Modellberechnungen entsprechen den methodischen Vorgaben des ENSI. Das ENSI kommt mit eigenen Berechnungen für ausgewählte Rechenfälle zu vergleichbaren Ergebnissen. Das resultierende charakteristische Dosisintervall des ENSI wird durch den RF und den mFE bestimmt und liegt sowohl unterhalb des Schutzkriteriums von 0.1 mSv/Jahr (Richtlinie ENSI-G03) als auch unterhalb des Schwellenwerts von 0.01 mSv/Jahr (StSV).

5.2.6 SMA-Standortgebiet Nördlich Lägern mit Wirtgestein Opalinuston

Angaben der Nagra

Die Nagra hat für den Fall eines SMA-Lagers im Standortgebiet Nördlich Lägern Dosisberechnungen mit dem Wirtgestein Opalinuston durchgeführt (NTB 14-03; NAB 14-36). Im RF werden für die Berechnungen Freisetzungspunkte am oberen Rand der Effinger Schichten und im Arietenkalk angenommen, während sie sich beim mFE direkt ober- und unterhalb des Opalinustons befinden (Abbildung 7). Die dosisdominierenden Radionuklide sind $^{14}\text{C}_{\text{org}}$, $^{14}\text{C}_{\text{org-c}}$, ^{36}Cl , ^{40}K , ^{79}Se und ^{129}I . Das von der Nagra ermittelte charakteristische Dosisintervall wird durch den RF und dem vom ENSI geforderten Fall b bestimmt (NTB 14-03) und liegt sowohl unterhalb des Schutzkriteriums von 0.1 mSv/Jahr (Richtlinie ENSI-G03) als auch unterhalb des Schwellenwerts von 0.01 mSv/Jahr (StSV).

Beurteilung des ENSI

Das ENSI hat die Resultate der Nagra mit eigenen Berechnungen überprüft. Der Vergleich der Dosiskurven der dosisdominierenden Radionuklide für die Rechenfälle RF, mFE, ENSI-Fall b sowie ENSI-Fall b* ist in Abbildung 23 dargestellt.

Die von der Nagra für die Ermittlung des charakteristischen Dosisintervalls für das SMA-Standortgebiet Nördlich Lägern mit dem Wirtgestein Opalinuston durchgeführten Modellberechnungen entsprechen den methodischen Vorgaben des ENSI. Das ENSI kommt mit eigenen Berechnungen für ausgewählte Rechenfälle zu vergleichbaren Ergebnissen. Das resultierende charakteristische Dosisintervall des ENSI wird durch den RF und den ENSI-Fall b* bestimmt. Der ENSI-Fall b* führt in diesem Fall zu einem deutlich höheren Wert für die Obergrenze des charakteristischen Dosisintervalls, der jedoch sowohl unterhalb des Schutzkriteriums von 0.1 mSv/Jahr (Richtlinie ENSI-G03) als auch unterhalb des Schwellenwerts von 0.01 mSv/Jahr (StSV) liegt.

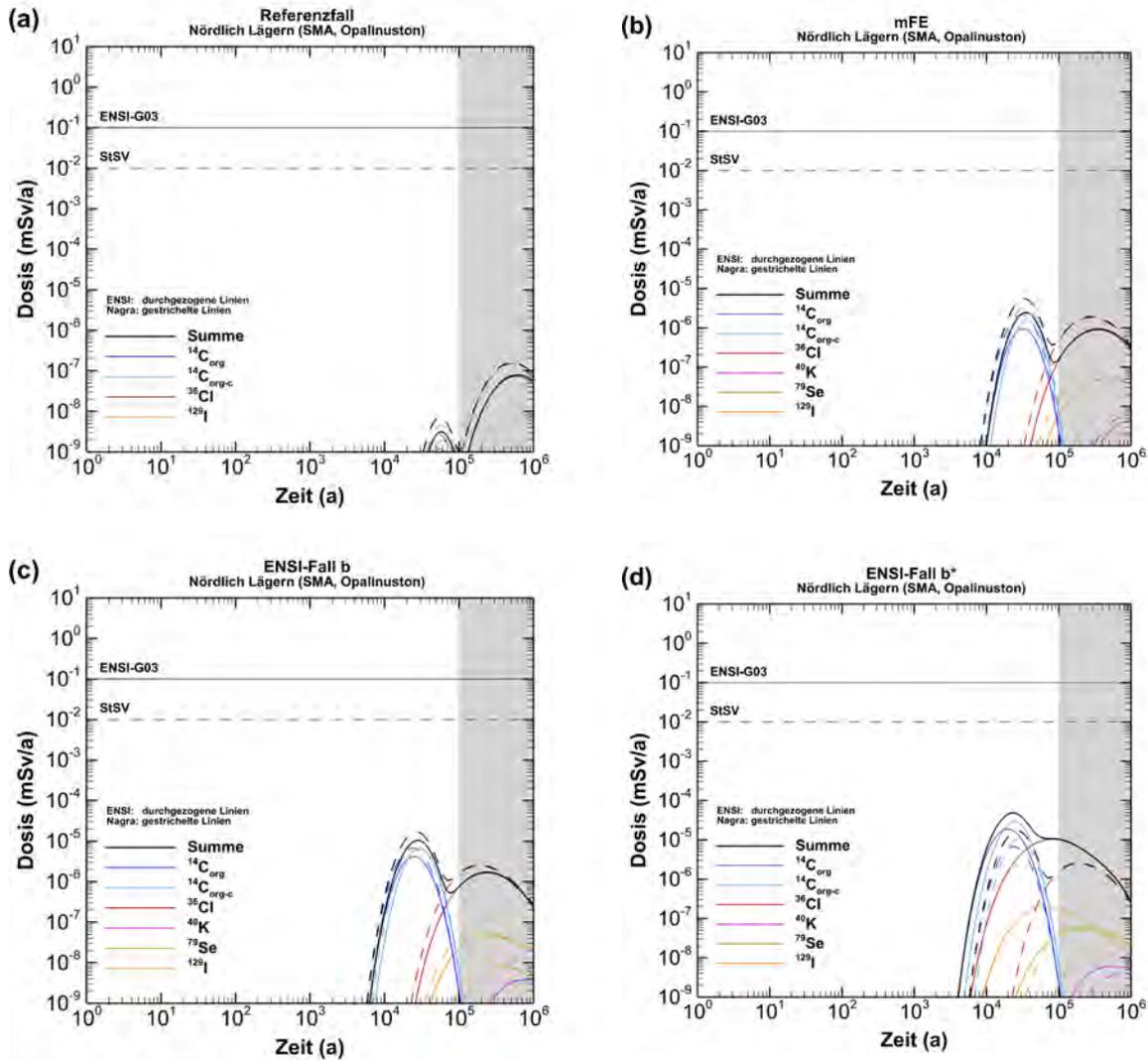


Abbildung 23: Vergleich der von Nagra (gestrichelte Linien) und ENSI (durchgezogene Linien) berechneten Dosiscurven für die dosisdominierenden Radionuklide für (a) den RF, (b) den mFE, (c) den ENSI-Fall b und (d) den vom ENSI zusätzlich betrachteten ENSI-Fall b* (zum Vergleich sind die Ergebnisse der Nagra für den ENSI-Fall b dargestellt) für ein SMA Lager im Standortgebiet Nördlich Lägern mit dem Wirtgestein Opalinuston. Der grau gefärbte Bereich markiert die Zeit jenseits des Betrachtungszeitraums.

5.2.7 SMA-Standortgebiet Jura Ost

Angaben der Nagra

Die Nagra hat für den Fall eines SMA-Lagers im Standortgebiet Jura Ost Dosisberechnungen mit dem Wirtgestein Opalinuston durchgeführt (NTB 14-03; NAB 14-36). Im RF werden für die Berechnungen Freisetzungspunkte am oberen Rand des Opalinustons und im Arietenkalk angenommen, während sie sich beim mFE direkt ober- und unterhalb des Opalinustons befinden (Abbildung 7). Die dosisdominierenden Radionuklide sind $^{14}\text{C}_{\text{org}}$, $^{14}\text{C}_{\text{org-c}}$, ^{36}Cl , ^{40}K , ^{79}Se und ^{129}I . Das von der Nagra ermittelte charakteristische Dosisintervall wird durch den RF und in diesem Fall den vom ENSI geforderten Fall b bestimmt (NTB 14-03) und liegt sowohl unterhalb des Schutzkriteriums von 0.1 mSv/Jahr (Richtlinie ENSI-G03) als auch unterhalb des Schwellenwerts von 0.01 mSv/Jahr (StSV).

Beurteilung des ENSI

Das ENSI hat die Resultate der Nagra mit eigenen Berechnungen überprüft. Der Vergleich der Dosiskurven der dosisdominierenden Radionuklide für die Rechenfälle RF, mFE, ENSI-Fall b sowie ENSI-Fall b* ist in Abbildung 24 dargestellt.

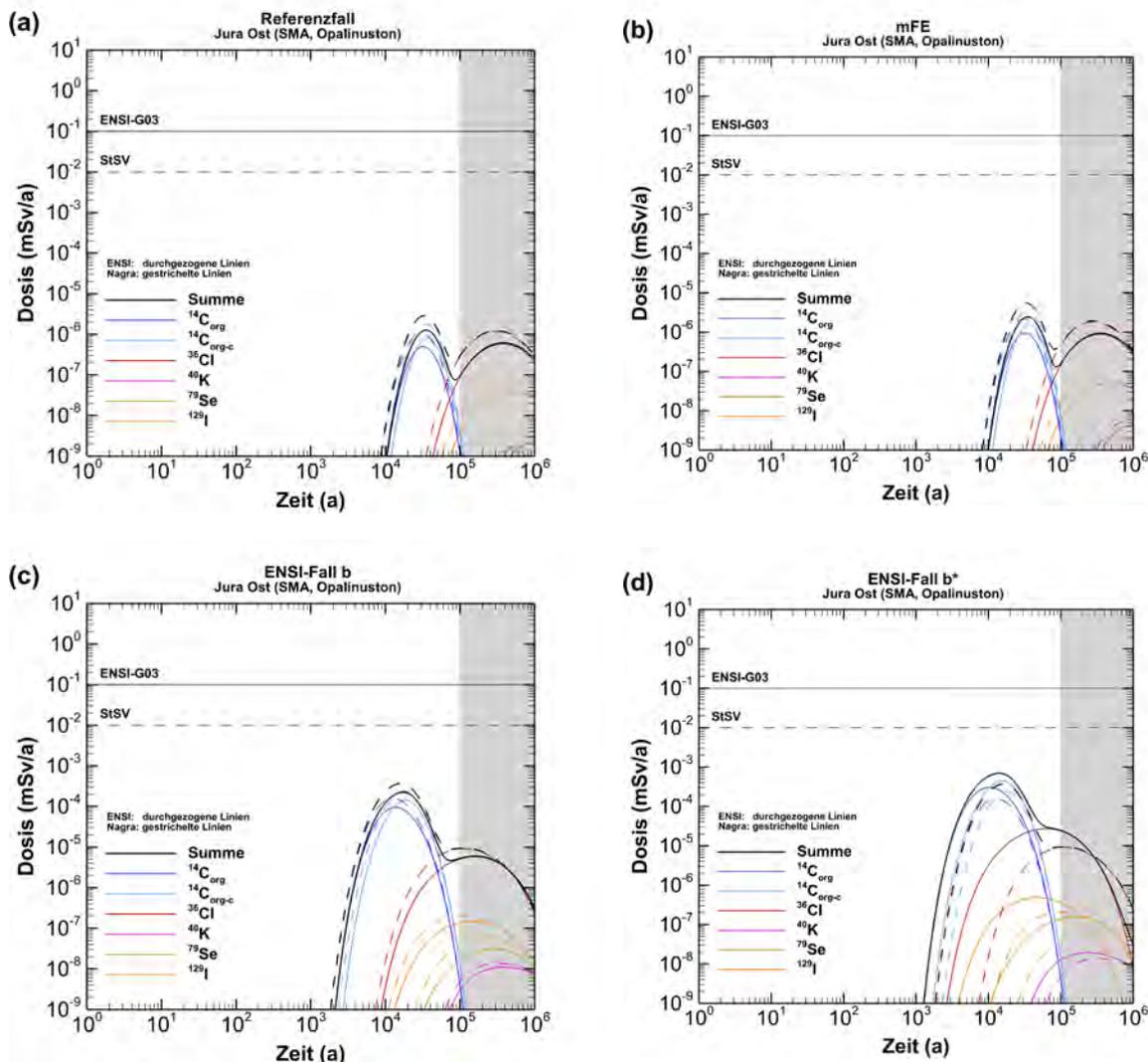


Abbildung 24: Vergleich der von Nagra (gestrichelte Linien) und ENSI (durchgezogene Linien) berechneten Dosiskurven für die dosisdominierenden Radionuklide für (a) den RF, (b) den mFE, (c) den ENSI-Fall b und (d) den vom ENSI zusätzlich betrachteten ENSI-Fall b* (zum Vergleich sind die Ergebnisse der Nagra für den ENSI-Fall b dargestellt) für ein SMA Lager im Standortgebiet Jura Ost mit dem Wirtgestein Opalinuston. Der grau gefärbte Bereich markiert die Zeit jenseits des Betrachtungszeitraums.

Die von der Nagra für die Ermittlung des charakteristischen Dosisintervalls für das SMA-Standortgebiet Jura Ost mit dem Wirtgestein Opalinuston durchgeführten Modellberechnungen entsprechen den methodischen Vorgaben des ENSI. Das ENSI kommt mit eigenen Berechnungen für ausgewählte Rechenfälle zu vergleichbaren Ergebnissen. Das resultierende charakteristische Dosisintervall des ENSI wird durch den RF und den ENSI-Fall b* bestimmt und liegt sowohl unterhalb des Schutzkriteriums von 0.1 mSv/Jahr (Richtlinie ENSI-G03) als auch unterhalb des Schwellenwerts von 0.01 mSv/Jahr (StSV).

5.2.8 SMA-Standortgebiet Jura-Südfuss mit Wirtgestein Opalinuston

Angaben der Nagra

Die Nagra hat für den Fall eines SMA-Lagers im Standortgebiet Jura-Südfuss Dosisberechnungen mit dem Wirtgestein Opalinuston durchgeführt (NTB 14-03; NAB 14-36). Im RF und mFE werden für die Berechnungen Freisetzungspunkte je am oberen und unteren Rand des Opalinuston angenommen (Abbildung 7). Die dosisdominierenden Radionuklide sind $^{14}\text{C}_{\text{org}}$, $^{14}\text{C}_{\text{org-c}}$, ^{36}Cl , ^{40}K , ^{79}Se und ^{129}I . Das von der Nagra ermittelte charakteristische Dosisintervall wird durch den RF und in diesem Fall durch den vom ENSI geforderten Fall ENSI-Fall b bestimmt (NTB 14-03) und liegt sowohl unterhalb des Schutzkriteriums von 0.1 mSv/Jahr (Richtlinie ENSI-G03) als auch unterhalb des Schwellenwerts von 0.01 mSv/Jahr (StSV).

Beurteilung des ENSI

Das ENSI hat die Resultate der Nagra mit eigenen Berechnungen überprüft. Der Vergleich der Dosiskurven der dosisdominierenden Radionuklide für die Rechenfälle RF, mFE, ENSI-Fall b sowie ENSI-Fall b* ist in Abbildung 25 dargestellt.

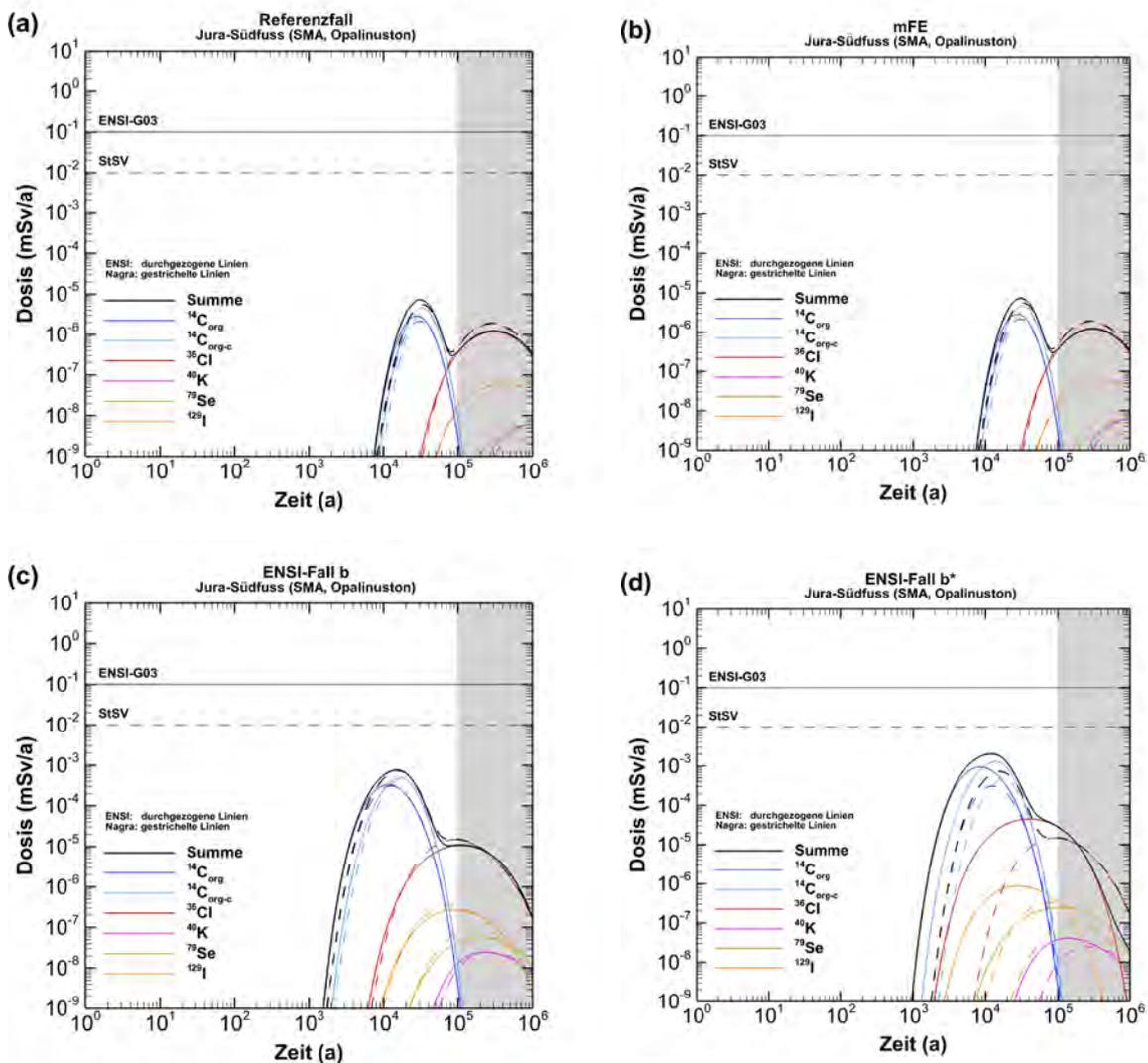


Abbildung 25: Vergleich der von Nagra (gestrichelte Linien) und ENSI (durchgezogene Linien) berechneten Dosiskurven für die dosisdominierenden Radionuklide für (a) den RF, (b) den mFE, (c) den ENSI-Fall b und (d) den vom ENSI zusätzlich betrachteten ENSI-Fall b* (zum Vergleich sind die Ergebnisse der Nagra für den ENSI-Fall b dargestellt) für ein SMA-Lager im Standortgebiet Jura-Südfuss mit dem Wirtgestein Opalinuston. Der grau gefärbte Bereich markiert die Zeit jenseits des Betrachtungszeitraums.

Die von der Nagra für die Ermittlung des charakteristischen Dosisintervalls für das SMA-Standortgebiet Jura-Südfuss mit dem Wirtgestein Opalinuston durchgeführten Modellberechnungen entsprechen den methodischen Vorgaben des ENSI. Das ENSI kommt mit eigenen Berechnungen für ausgewählte Rechenfälle zu vergleichbaren Ergebnissen. Das resultierende charakteristische Dosisintervall des ENSI wird durch den RF und den ENSI-Fall b* bestimmt und liegt sowohl unterhalb des Schutzkriteriums von 0.1 mSv/Jahr (Richtlinie ENSI-G03) als auch unterhalb des Schwellenwerts von 0.01 mSv/Jahr (StSV).

5.2.9 SMA-Standortgebiet Jura-Südfuss mit Wirtgestein Effinger Schichten

Angaben der Nagra

Die Nagra hat für den Fall eines SMA-Lagers im Standortgebiet Jura-Südfuss Dosisberechnungen mit dem Wirtgestein Effinger Schichten durchgeführt (NTB 14-03; NAB 14-36). Im RF werden für die Berechnungen Freisetzungspunkte je am oberen und unteren Rand der lithofaziellen Einheit KMA-5 angenommen (Abbildung 7). Beim mFE werden zusätzlich Störungen, die das Wirtgestein vertikal durchschlagen und somit als vertikale Transportpfade wirksam sind, angenommen. Die dosisdominierenden Radionuklide sind $^{14}\text{C}_{\text{org}}$, $^{14}\text{C}_{\text{org-c}}$, ^{36}Cl , ^{40}K , ^{79}Se , $^{108\text{m}}\text{Ag}$ und ^{129}I . Das von der Nagra ermittelte charakteristische Dosisintervall wird durch den RF und in diesem Fall durch den geforderten ENSI-Fall b bestimmt (NTB 14-03) und liegt sowohl unterhalb des Schutzkriteriums von 0.1 mSv/Jahr (Richtlinie ENSI-G03) als auch unterhalb des Schwellenwerts von 0.01 mSv/Jahr (StSV).

Beurteilung des ENSI

Das ENSI hat die Resultate der Nagra mit eigenen Berechnungen überprüft. Der Vergleich der Dosiskurven der dosisdominierenden Radionuklide für die Rechenfälle RF, mFE, ENSI-Fall b sowie ENSI-Fall b** ist in Abbildung 26 dargestellt.

Die von der Nagra für die Ermittlung des charakteristischen Dosisintervalls für das SMA-Standortgebiet Jura-Südfuss mit dem Wirtgestein Effinger Schichten durchgeführten Modellberechnungen entsprechen den methodischen Vorgaben des ENSI. Das ENSI kommt mit eigenen Berechnungen für ausgewählte Rechenfälle zu vergleichbaren Ergebnissen. Das resultierende charakteristische Dosisintervall des ENSI wird durch den RF und den ENSI-Fall b** bestimmt und liegt sowohl unterhalb des Schutzkriteriums von 0.1 mSv/Jahr (Richtlinie ENSI-G03) als auch knapp unterhalb des Schwellenwerts von 0.01 mSv/Jahr (StSV).

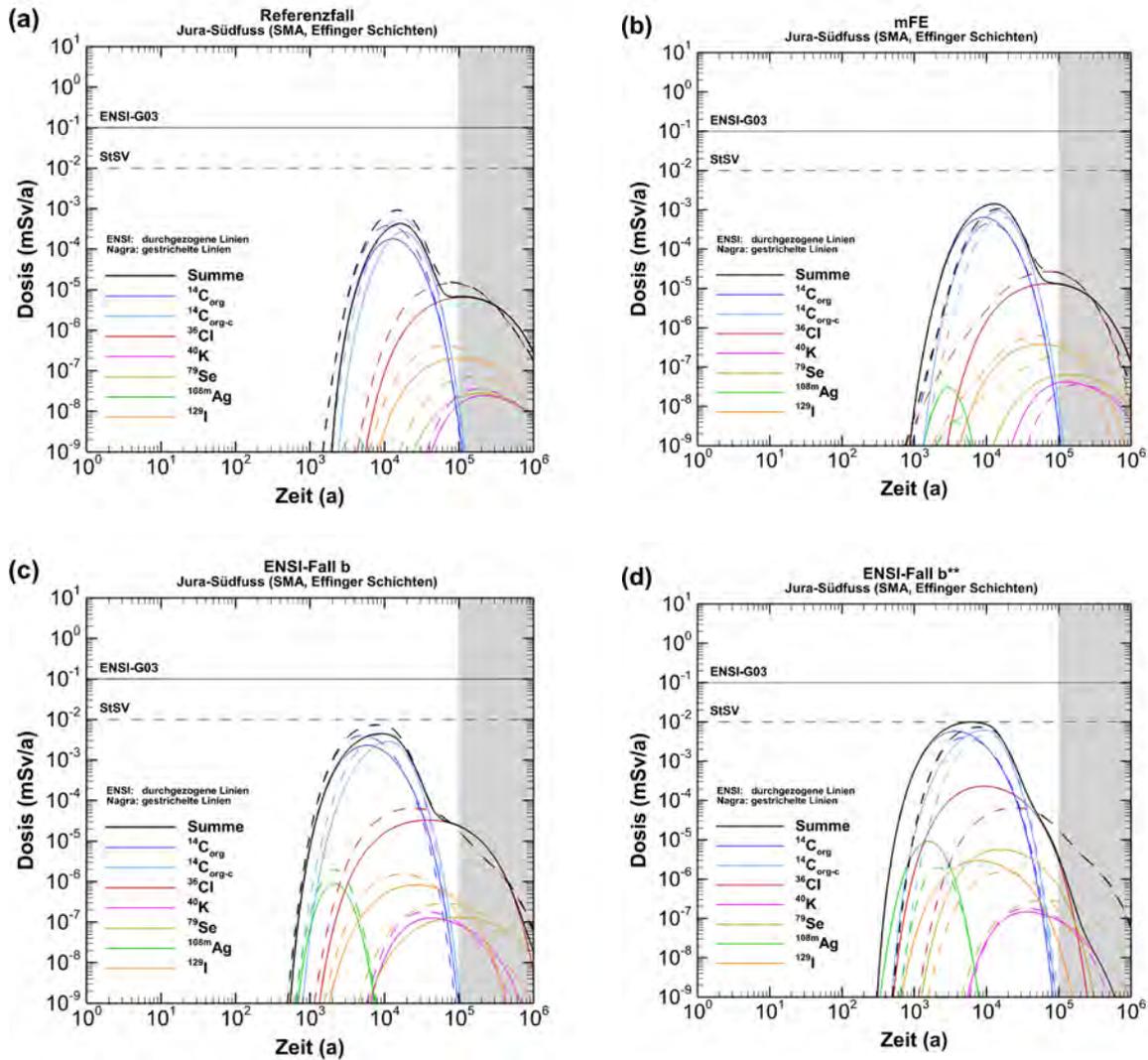


Abbildung 26: Vergleich der von Nagra (gestrichelte Linien) und ENSI (durchgezogene Linien) berechneten Dosiskurven für die dosisdominierenden Radionuklide für (a) den RF, (b) den mFE, (c) den ENSI-Fall b und (d) den vom ENSI zusätzlich betrachteten ENSI-Fall b** (zum Vergleich sind die Ergebnisse der Nagra für den ENSI-Fall b dargestellt) für ein SMA-Lager im Standortgebiet Jura-Südfuss mit dem Wirtgestein Effinger Schichten. Der grau gefärbte Bereich markiert die Zeit jenseits des Betrachtungszeitraums.

5.2.10 SMA-Standortgebiet Wellenberg

Angaben der Nagra

Die Nagra hat für den Fall eines SMA-Lagers im Standortgebiet Wellenberg Dosisberechnungen mit dem Wirtgestein Mergel-Formationen des Helvetikums durchgeführt (NTB 14-03; NAB 14-36). Im RF (identisch mit dem mFE,) erfolgt der Radionuklidtransport entlang von Verschiebungsflächen und/oder Klüften mit einer mittleren Frequenz von 1 pro Meter. Die Länge des Transportpfads beträgt 100 m je in Richtung des grossräumigen Wasserflusses und in die entgegengesetzte Richtung. Die dosisdominierenden Radionuklide sind $^{14}\text{C}_{\text{org}}$, $^{14}\text{C}_{\text{org-c}}$, ^{36}Cl , ^{40}K , ^{79}Se , $^{108\text{m}}\text{Ag}$ und ^{129}I . Das von der Nagra ermittelte charakteristische Dosisintervall wird durch den RF und in diesem Fall durch den vom ENSI geforderten Fall a bestimmt (NTB 14-03) und liegt sowohl unterhalb des Schutzkriteriums von 0.1 mSv/Jahr (Richtlinie ENSI-G03) als auch unterhalb des Schwellenwerts von 0.01 mSv/Jahr (StSV).

Beurteilung des ENSI

Das ENSI hat die Resultate der Nagra mit eigenen Berechnungen überprüft. Der Vergleich der Dosiskurven der dosisdominierenden Radionuklide für die Rechenfälle RF, mFE, ENSI-Fall b, ENSI-Fall b*, ENSI-Fall a sowie ENSI-Fall a* ist in Abbildung 27 dargestellt.

Die von der Nagra für die Ermittlung des charakteristischen Dosisintervalls für das SMA-Standortgebiet Wellenberg mit dem Wirtgestein Mergel-Formationen des Helvetikums durchgeführten Modellberechnungen entsprechen den methodischen Vorgaben des ENSI. Das ENSI kommt mit eigenen Berechnungen für ausgewählte Rechenfälle zu vergleichbaren Ergebnissen, sofern dieselben Parameterwerte verwendet werden. Wie in Kapitel 3.1.5 diskutiert, hält das ENSI jedoch einen höheren oberen Eckwert der hydraulischen Durchlässigkeit (ENSI-Fall a*) für angemessen. Wird dieser Wert verwendet, so ergibt sich die in Abbildung 27 (f) dargestellte Dosis. Das Dosis-Schutzkriterium (Richtlinie ENSI-G03) wird eingehalten, jedoch wird der Schwellenwert von 0.01 mSv/Jahr (StSV) überschritten.

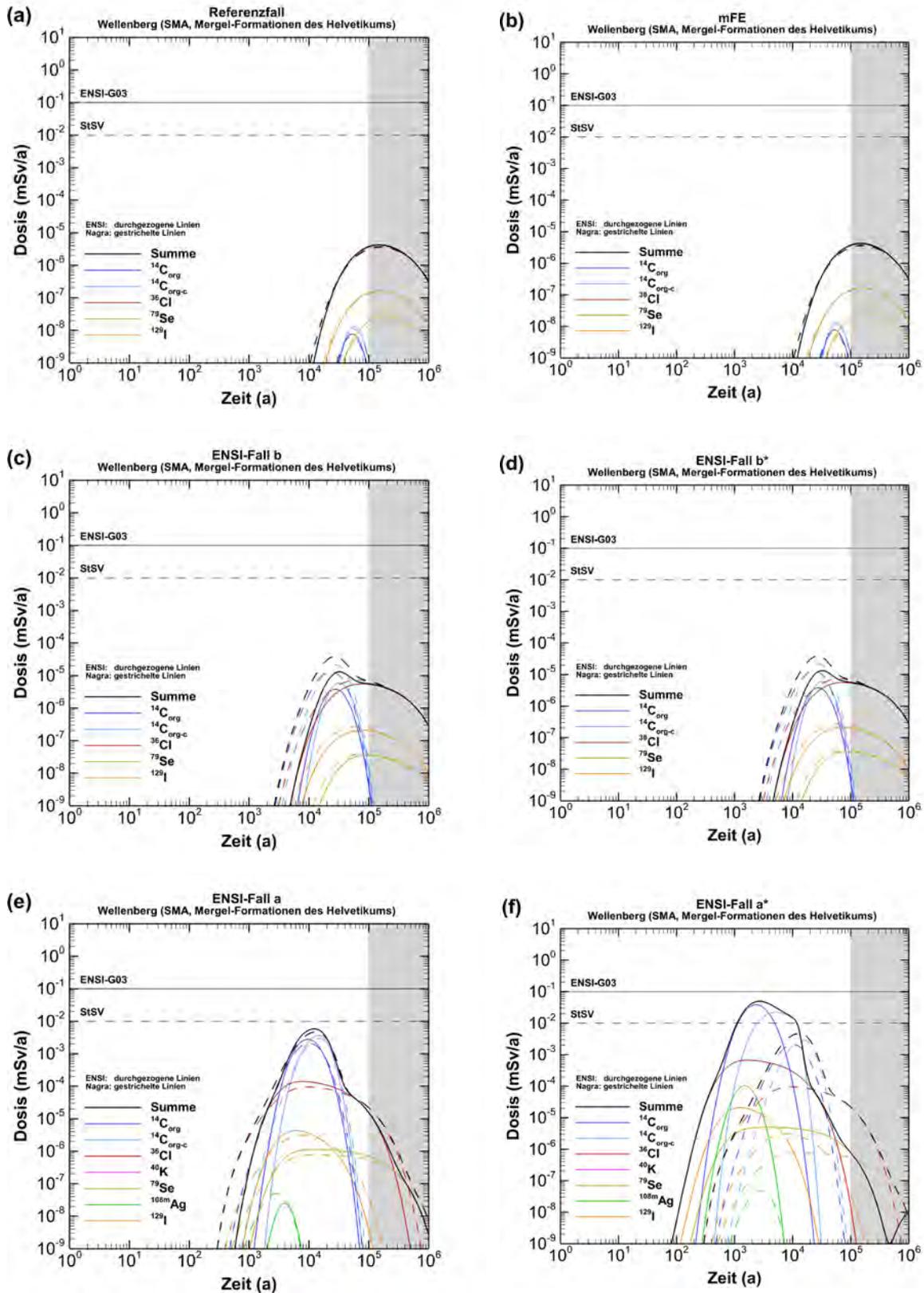


Abbildung 27: Vergleich der von Nagra (gestrichelte Linien) und ENSI (durchgezogene Linien) berechneten Dosiskurven für die dosisdominierenden Radionuklide für (a) den RF, (b) den mFE, (c) den ENSI-Fall b, (d) den vom ENSI zusätzlich betrachteten ENSI-Fall b* (zum Vergleich sind die Ergebnisse der Nagra für den ENSI-Fall b dargestellt), (e) den ENSI-Fall a und (f) den ENSI-Fall a* (zum Vergleich sind die Ergebnisse der Nagra für den ENSI-Fall a dargestellt) für ein SMA-Lager im Standortgebiet Wellenberg mit dem Wirtgestein Mergel-Formationen des Helvetikums. Der grau gefärbte Bereich markiert die Zeit jenseits des Betrachtungszeitraums.

5.2.11 HAA-Standortgebiet Zürich Nordost

Angaben der Nagra

Die Nagra hat für den Fall des HAA-Lagers im Standortgebiet Zürich Nordost Dosisberechnungen mit dem Wirtgestein Opalinuston durchgeführt (NTB 14-03; NAB 14-36). Im RF werden für die Berechnungen Freisetzungspunkte am oberen Rand der Effinger Schichten sowie im Arietenkalk angenommen, während sie sich beim mFE direkt ober- und unterhalb des Opalinustons befinden (Abbildung 7). Die dosisdominierenden Radionuklide sind $^{14}\text{C}_{\text{org}}$, $^{14}\text{C}_{\text{org-c}}$, ^{36}Cl , ^{40}K , ^{79}Se und ^{129}I . Das von der Nagra ermittelte charakteristische Dosisintervall wird durch den RF und durch den vom ENSI geforderten Fall e1 («wärmeres und trockeneres Klima») bestimmt (NTB 14-03) und liegt sowohl unterhalb des Schutzkriteriums von 0.1 mSv/Jahr (Richtlinie ENSI-G03) als auch unterhalb des Schwellenwerts von 0.01 mSv/Jahr (StSV).

Beurteilung des ENSI

Das ENSI hat die Resultate der Nagra mit eigenen Berechnungen überprüft. Der Vergleich der Dosiskurven der dosisdominierenden Radionuklide für die Rechenfälle RF, mFE, ENSI-Fall b, ENSI-Fall b* sowie ENSI-Fall e1 ist in Abbildung 28 dargestellt.

Die von der Nagra für die Ermittlung des charakteristischen Dosisintervalls für ein HAA-Standortgebiet Zürich Nordost mit dem Wirtgestein Opalinuston durchgeführten Modellberechnungen entsprechen den methodischen Vorgaben des ENSI. Das ENSI kommt mit eigenen Berechnungen für ausgewählte Rechenfälle zu vergleichbaren Ergebnissen. Im Gegensatz zur Nagra wird das resultierende charakteristische Dosisintervall des ENSI durch den RF und den ENSI-Fall b* bestimmt. Der ENSI-Fall b* führt in diesem Fall zu einem deutlich höheren Wert für die Obergrenze des charakteristischen Dosisintervalls, der jedoch sowohl unterhalb des Schutzkriteriums von 0.1 mSv/Jahr (Richtlinie ENSI-G03) als auch unterhalb des Schwellenwerts von 0.01 mSv/Jahr (StSV) liegt.

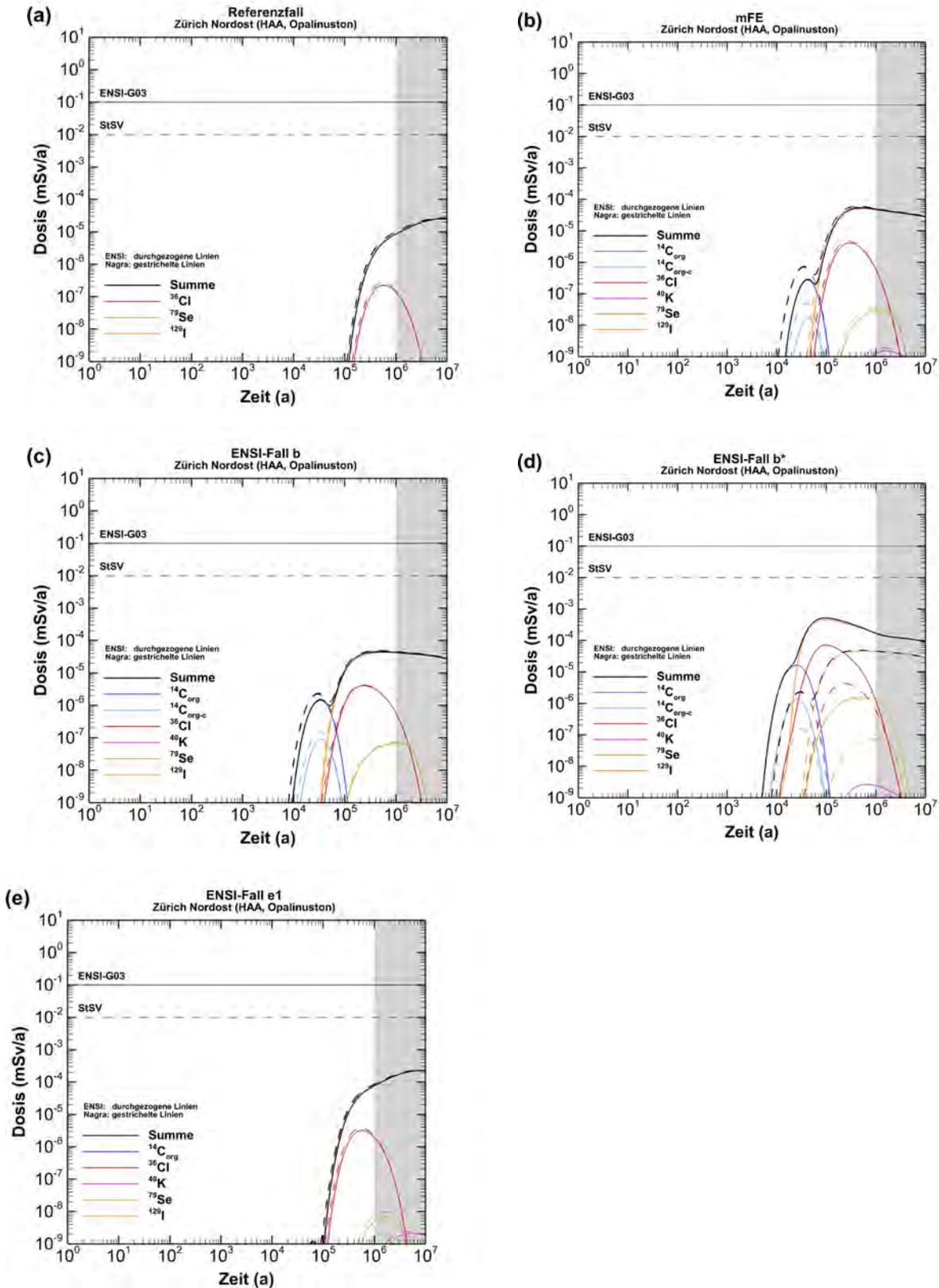


Abbildung 28: Vergleich der von Nagra (gestrichelte Linien) und ENSI (durchgezogene Linien) berechneten Dosiskurven für die dosisdominierenden Radionuklide für (a) den RF, (b) den mFE, (c) den ENSI-Fall b, (d) den vom ENSI zusätzlich betrachteten ENSI-Fall b* (zum Vergleich sind die Ergebnisse der Nagra für den ENSI-Fall b dargestellt) sowie (e) den ENSI-Fall e1 für ein HAA-Lager im Standortgebiet Zürich Nordost mit dem Wirtgestein Opalinuston. Der grau gefärbte Bereich markiert die Zeit jenseits des Betrachtungszeitraums.

5.2.12 HAA-Standortgebiet Nördlich Lägern

Angaben der Nagra

Die Nagra hat für den Fall eines HAA-Lagers im Standortgebiet Nördlich Lägern Dosisberechnungen mit dem Wirtgestein Opalinuston durchgeführt (NTB 14-03; NAB 14-36). Im RF werden für die Berechnungen Freisetzungspunkte am oberen Rand der Effinger Schichten sowie im Arietenkalk angenommen, während sie sich beim mFE direkt ober- und unterhalb des Opalinustons befinden (Abbildung 7). Die dosisdominierenden Radionuklide sind $^{14}\text{C}_{\text{org}}$, $^{14}\text{C}_{\text{org-cl}}$, ^{36}Cl , ^{40}K , ^{79}Se und ^{129}I . Das von der Nagra ermittelte charakteristische Dosisintervall wird durch den RF und in diesem Fall durch den vom ENSI geforderten Fall e1 bestimmt (NTB 14-03) und liegt sowohl unterhalb des Schutzkriteriums von 0.1 mSv/Jahr (Richtlinie ENSI-G03) als auch unterhalb des Schwellenwerts von 0.01 mSv/Jahr (StSV).

Beurteilung des ENSI

Das ENSI hat die Resultate der Nagra mit eigenen Berechnungen überprüft. Der Vergleich der Dosiskurven der dosisdominierenden Radionuklide für die Rechenfälle RF, mFE, ENSI-Fall b, ENSI-Fall b* sowie ENSI-Fall e1 ist in Abbildung 29 dargestellt.

Die von der Nagra für die Ermittlung des charakteristischen Dosisintervalls für das HAA-Standortgebiet Nördlich Lägern durchgeführten Modellberechnungen entsprechen den methodischen Vorgaben des ENSI. Das ENSI kommt mit eigenen Berechnungen für ausgewählte Rechenfälle zu vergleichbaren Ergebnissen. Im Gegensatz zur Nagra wird das resultierende charakteristische Dosisintervall des ENSI durch den RF und den ENSI-Fall b* bestimmt. Der ENSI-Fall b* führt in diesem Fall zu einem deutlich höheren Wert für die Obergrenze des charakteristischen Dosisintervalls, der jedoch sowohl unterhalb des Schutzkriteriums von 0.1 mSv/Jahr (Richtlinie ENSI-G03) als auch unterhalb des Schwellenwerts von 0.01 mSv/Jahr (StSV) liegt.

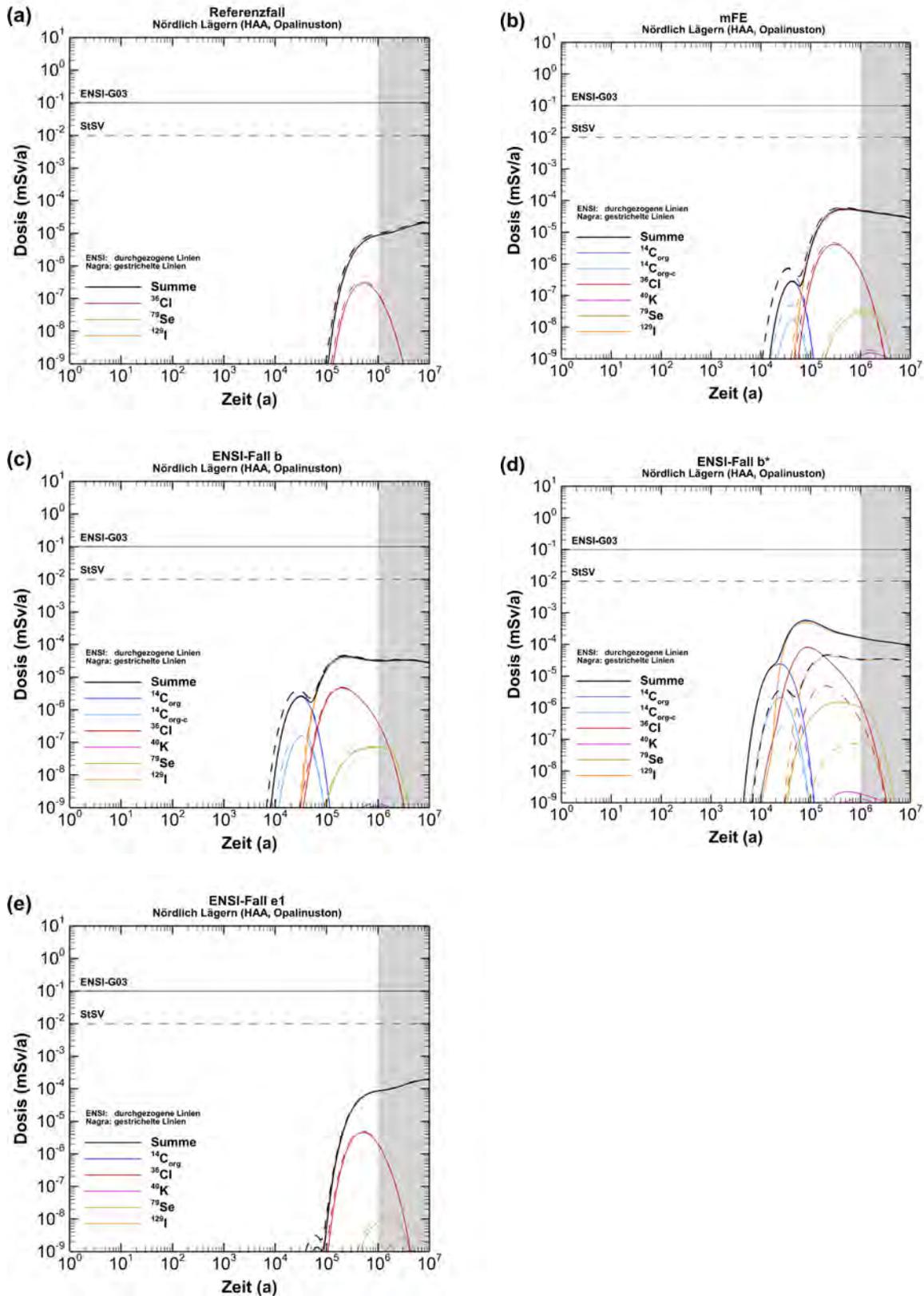


Abbildung 29: Vergleich der von Nagra (gestrichelte Linien) und ENSI (durchgezogene Linien) berechneten Dosiskurven für die dosisdominierenden Radionuklide für (a) den RF, (b) den mFE, (c) den ENSI-Fall b, (d) den vom ENSI zusätzlich betrachteten ENSI-Fall b* (zum Vergleich sind die Ergebnisse der Nagra für den ENSI-Fall b dargestellt) sowie (e) für den ENSI-Fall e1 für ein HAA-Lager im Standortgebiet Nördlich Lägern mit dem Wirtgestein Opalinuston. Der grau gefärbte Bereich markiert die Zeit jenseits des Betrachtungszeitraums.

5.2.13 HAA-Standortgebiet Jura Ost

Angaben der Nagra

Die Nagra hat für den Fall eines HAA-Lagers im Standortgebiet Jura Ost Dosisberechnungen mit dem Wirtgestein Opalinuston durchgeführt (NTB 14-03; NAB 14-36). Im RF werden für die Berechnungen Freisetzungspunkte am oberen Rand des Opalinustons und im Arietenkalk angenommen, während sie sich beim mFE direkt ober- und unterhalb des Opalinustons befinden (Abbildung 7). Die dosisdominierenden Radionuklide sind $^{14}\text{C}_{\text{org}}$, $^{14}\text{C}_{\text{org-cr}}$, ^{36}Cl , ^{40}K , ^{79}Se und ^{129}I . Das von der Nagra ermittelte charakteristische Dosisintervall wird durch den RF und in diesem Fall den vom ENSI geforderten Fall e1 bestimmt (NTB 14-03) und liegt sowohl unterhalb des Schutzkriteriums von 0.1 mSv/Jahr (Richtlinie ENSI-G03) als auch unterhalb des Schwellenwerts von 0.01 mSv/Jahr (StSV).

Beurteilung des ENSI

Das ENSI hat die Resultate der Nagra mit eigenen Berechnungen überprüft. Der Vergleich der Dosiskurven der dosisdominierenden Radionuklide für die Rechenfälle RF, mFE, ENSI-Fall b, ENSI-Fall b* sowie ENSI-Fall e1 ist in Abbildung 30 dargestellt.

Die von der Nagra für die Ermittlung des charakteristischen Dosisintervalls für das HAA-Standortgebiet Jura Ost mit dem Wirtgestein Opalinuston durchgeführten Modellberechnungen entsprechen den methodischen Vorgaben des ENSI. Das ENSI kommt mit eigenen Berechnungen für ausgewählte Rechenfälle zu vergleichbaren Ergebnissen. Im Gegensatz zur Nagra wird das resultierende charakteristische Dosisintervall des ENSI durch den RF und den ENSI-Fall b* bestimmt. Der ENSI-Fall b* führt in diesem Fall zu einem deutlich höheren Wert für die Obergrenze des charakteristischen Dosisintervalls, der jedoch sowohl unterhalb des Schutzkriteriums von 0.1 mSv/Jahr (Richtlinie ENSI-G03) als auch unterhalb des Schwellenwerts von 0.01 mSv/Jahr (StSV) liegt.

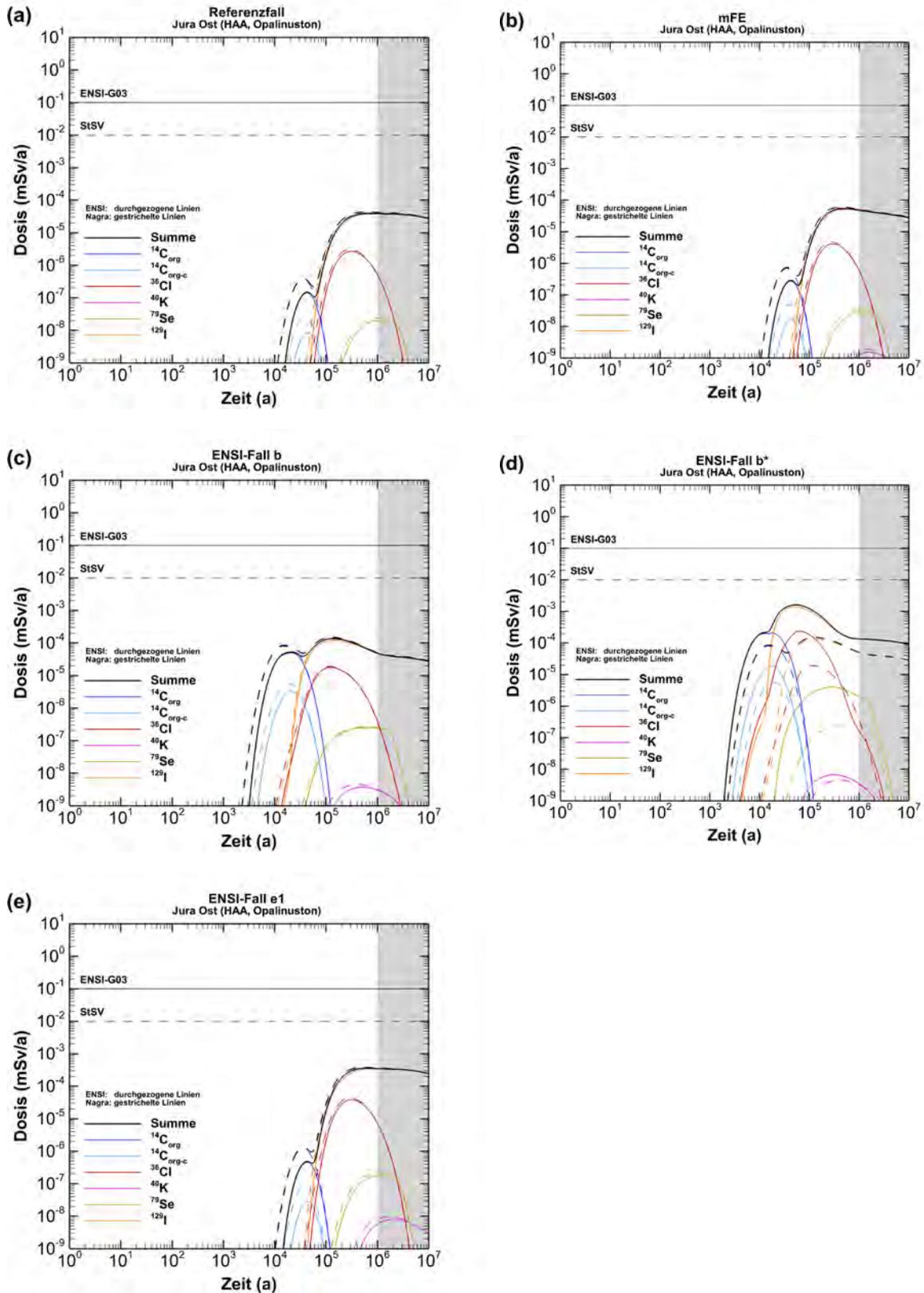


Abbildung 30: Vergleich der von Nagra (gestrichelte Linien) und ENSI (durchgezogene Linien) berechneten Dosiskurven für die dosisdominierenden Radionuklide für (a) den RF, (b) den mFE, (c) den ENSI-Fall b, (d) den vom ENSI zusätzlich betrachteten ENSI-Fall b* (zum Vergleich sind die Ergebnisse der Nagra für den ENSI-Fall b dargestellt) und (e) den ENSI-Fall e1 für ein HAA-Lager im Standortgebiet Jura Ost mit dem Wirtgestein Opalinuston. Der grau gefärbte Bereich markiert die Zeit jenseits des Betrachtungszeitraums.

5.2.14 Zusammenfassende Beurteilung der Dosisberechnungen

Die Nagra hat das standardisierte Parametervariationsverfahren zur Ermittlung der charakteristischen Dosisintervalle gemäss den behördlichen Vorgaben durchgeführt. Das ENSI hat im Rahmen der Beurteilung der quantitativen Sicherheitsanalyse die Ergebnisse der Nagra durch eigene Berechnungen überprüft. Abbildung 31 zeigt eine Übersicht der charakteristischen Dosisintervalle des ENSI im Vergleich zu denen der Nagra für alle geologischen Standortgebiete, Wirtgesteine und Lagerotypen.

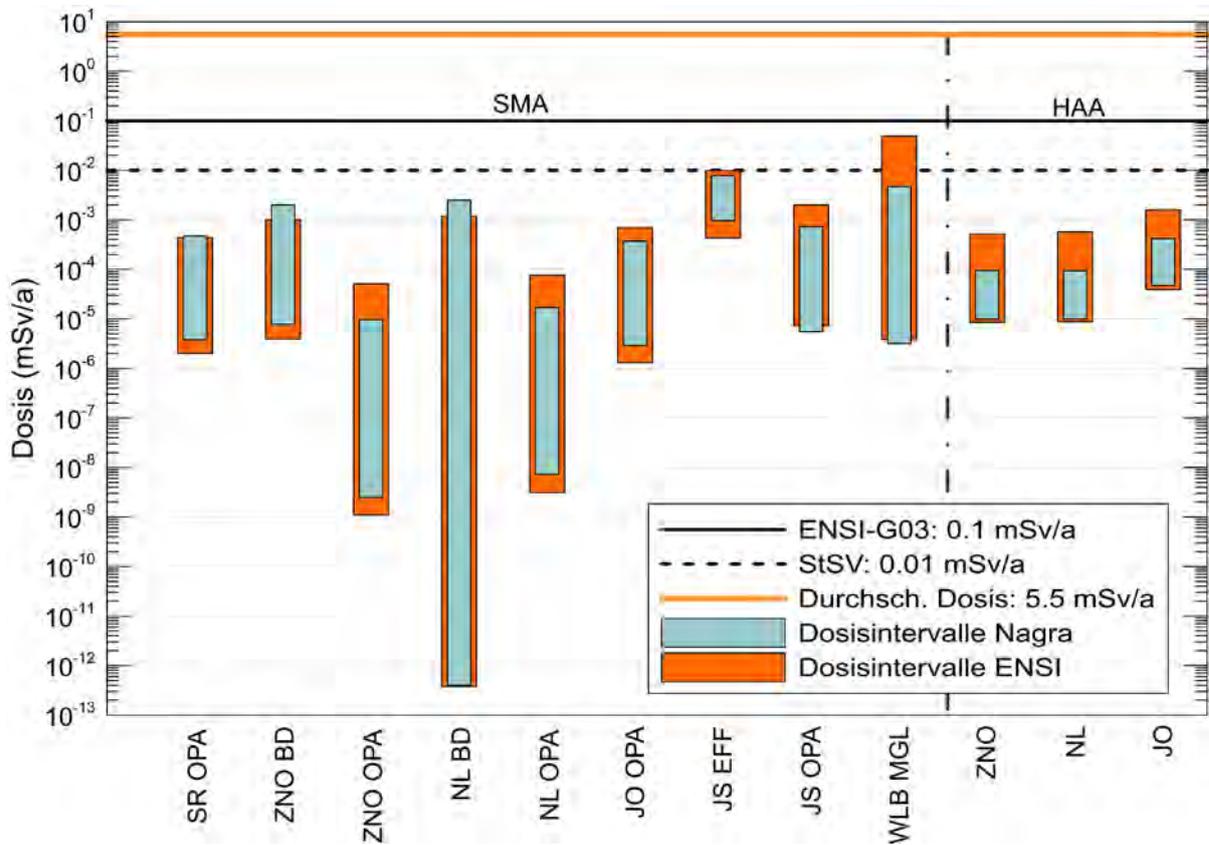


Abbildung 31: Vergleich der charakteristischen Dosisintervalle des ENSI und der Nagra im jeweiligen Betrachtungszeitraum für die SMA- und HAA Lagerperimeter (Durchsch. Dosis: Durchschnittliche jährliche Strahlendosen der Schweizer Bevölkerung).

Die ermittelten charakteristischen Dosisintervalle verdeutlichen die unterschiedliche Robustheit der verschiedenen Standortgebiete gegenüber Variabilitäten und Ungewissheiten. Generell kann das ENSI die Resultate der Nagra nachvollziehen (Abbildung 31). Die von der Nagra verwendeten Bandbreiten der Parameterwerte beurteilt das ENSI vereinzelt als nicht abdeckend und verwendet in den eigenen Berechnungen ungünstigere Werte. Dadurch liegen die oberen Grenzen der vom ENSI berechneten charakteristischen Dosisintervalle meist höher als diejenigen der Nagra. Häufig ist der Rechenfall mit den ungünstigeren Werten der effektiven Diffusionskoeffizienten (ENSI-Fall b*) bestimmend.

Die vom ENSI berechneten charakteristischen Dosisintervalle aller Standortgebiete liegen unterhalb des Dosischutzkriteriums von 0.1 mSv/Jahr (Richtlinie ENSI-G03). Ausser für das Standortgebiet Wellenberg liegen die charakteristischen Dosisintervalle aller Standortgebiete auch unterhalb des Schwellenwerts von 0.01 mSv/Jahr (StSV). Das Dosisintervall des Standortgebiets Wellenberg überlappt jedoch mit den Dosisintervallen aller Nordschweizer SMA-Standortgebiete. Im Rahmen von Etappe 2 SGT gelten damit alle Standortgebiete mit allen Wirtgesteinen - vorbehaltlich der qualitativen Bewertung - als sicherheitstechnisch geeignet. Alle Standortgebiete, mit Ausnahme des Wellenbergs, werden gemäss den Vorgaben für die provisorischen Sicherheitsanalysen (ENSI 33/075) als sicherheitstechnisch gleichwertig betrachtet.

5.3 Qualitative Bewertung der optimierten Lagerperimeter in den geologischen Standortgebieten

Die qualitative Bewertung der optimierten Lagerperimeter in den geologischen Standortgebieten erfolgt gemäss Vorgaben im Konzeptteil SGT (BFE 2011b) anhand der 13 Kriterien zu Sicherheit und technischer Machbarkeit (Abbildung 12). Die Kriterien umfassen wie in Etappe 1 SGT jeweils mehrere Indikatoren. Insgesamt werden von der Nagra 40 Indikatoren für die Bewertung verwendet. Die Bewertung der Kriterien erfolgt durch Mittelwertbildung ihrer Indikatorenbewertung, diejenige der Kriteriengruppen durch Mittelwertbildung der Kriterienbewertung. Aus der Mittelwertbildung der Bewertung der Kriteriengruppen ergibt sich die Gesamtbewertung der Standortgebiete bzw. Lagerperimeter. Sie erfolgt in den Stufen «sehr geeignet», «geeignet», «bedingt geeignet» und «weniger geeignet» (Kapitel 4).

Im Folgenden werden die Kriterien- und Indikatorenbewertungen des ENSI den Bewertungen der Nagra gegenübergestellt. Diese beziehen sich für jedes Standortgebiet auf den für die Bewertung massgebenden Lagerperimeter. Diese Gegenüberstellung erfolgt einzeln für jedes Kriterium und den zugehörigen Indikatoren in Form einer Tabelle, woraus die Abweichungen zur Bewertung der Nagra ersichtlich sind. Die Farbgebung in den Tabellen entspricht den Bewertungsstufen gemäss Konzeptteil «sehr günstig» (dunkelgrün), «günstig» (hellgrün), «bedingt günstig» (gelb), «ungünstig» (rosa) und «ungenügend» (rot).

Das ENSI stimmt in seiner Bewertung nicht allen von der Nagra vorgeschlagenen Bewertungsobjekten zu. In den folgenden Tabellen werden die von Nagra und ENSI verwendeten Bewertungsobjekte ausgewiesen. Die signifikanten Abweichungen der Bewertungen der Indikatoren werden kurz dargelegt und begründet.

Die ausführliche Diskussion der entscheiderelevanten Indikatoren erfolgt in Kapitel 6.1 und aller Indikatoren in einer separaten Aktennotiz (ENSI 33/539). Die tabellarische Gegenüberstellung aller Indikatoren, Kriterien und Kriteriengruppen ist im Anhang A eingefügt. Das ENSI verzichtet bei der Bewertung der Indikatoren auf eine Feinabstufung innerhalb einer Bewertungsstufe; die Indikatoren werden vom ENSI nur auf fünf Bewertungsstufen bewertet (Kapitel 4.4). Dies führt zu einzelnen Unterschieden in der aggregierten Bewertung, hat jedoch keinen Einfluss auf das Resultat des sicherheitstechnischen Vergleichs.

5.3.1 Kriteriengruppe 1 «Eigenschaften des WG/EG»

Kriterium 1.1 «Räumliche Ausdehnung»

*Tabelle 6: Bewertungen der Nagra (N) und des ENSI (E) zum Kriterium 1.1 «Räumliche Ausdehnung» sowie der dazugehörigen Indikatoren. Die Bewertung der Kriterien setzt sich, wie im Kapitel 4 erläutert, aus den arithmetisch gemittelten Bewertungen der Indikatoren zusammen. *Der Bewertung des ENSI liegt im Unterschied zur Nagra der alternative Lagerperimeter HAA-ZNO-aL506-r zugrunde.*

Kriterium / Indikator	Bewertungsobjekt		SMA-SR-OPA		SMA-ZNO-OPA		SMA-NL-OPA		SMA-JO-OPA		SMA-JS-OPA		SMA-ZNO-BD		SMA-NL-BD		SMA-JS-EFF		SMA-WLB-MGL			
	N	E	N	E	N	E	N	E	N	E	N	E	N	E	N	E	N	E	N	E		
1.1	Räumliche Ausdehnung				3.3	3.5	4.3	4.5	3.3	4.0	4.1	4.0	2.9	2.5	4.3	4.5	3.3	4.0	2.9	2.5	3.8	4.0
5	Mächtigkeit	EG/LP-min	EG		3.5	3.5	4.5	4.5	4.5	4.5	3.5	3.5	2.5	0.5	4.1	4.5	4.5	4.5	2.5	0.5	4.5	4.5
8	Platzangebot untertags	LP	LP		3.1	3.5	4.1	4.5	2.1	3.5	4.7	4.5	3.3	4.5	4.5	4.5	2.1	3.5	3.3	4.5	3.1	3.5

Kriterium / Indikator		Bewertungs- objekt		HAA-ZNO*		HAA-NL		HAA-JO		Kriterium/Merkmal/Indikator
				N	E	N	E	N	E	
		N	E	N	E	N	E	N	E	 sehr günstig (4 ≤ x ≤ 5)
1.1	Räumliche Ausdehnung			4.0	4.0	3.5	4.0	3.8	4.0	 günstig (3 ≤ x < 4)
5	Mächtigkeit	EG/ LPmin	EG	4.5	4.5	4.5	4.5	3.5	3.5	 bedingt günstig (2 ≤ x < 3)
8	Platzangebot untertags	LP	LP	3.5	3.5	2.5	3.5	4.1	4.5	 ungünstig (1 ≤ x < 2)
										 ungenügend (0 ≤ x < 1)

Das Kriterium **1.1 «Räumliche Ausdehnung»** setzt sich aus zwei Indikatoren zusammen.

Für den **Indikator 5 «Mächtigkeit»** stimmt die Bewertung des ENSI mit der Bewertung der Nagra mit Ausnahme der Lagerperimeter SMA-JS-EFF und SMA-JS-OPA überein. Diese abweichende Bewertung gegenüber Etappe 1 SGT erfolgt aufgrund neuer Daten (z. B. NAB 14-101; NAB 14-95; NAB 13-16; NAB 14-12) sowie der Neubeurteilung der umfassenden Datengrundlage im Hinblick auf den Vergleich der Standortgebiete in Etappe 2 SGT durch das ENSI. Für die Effinger Schichten stellen die «harten Bänke» nach Ansicht des ENSI auch bei einer günstigen Konzeptualisierung anzunehmende Freisetzungspunkte dar (Kapitel 3.2) und müssen deshalb ebenfalls als nicht barrierenwirksam angesehen werden. Der einschlusswirksame Gebirgsbereich reduziert sich somit auf KMA-5 (44 m). Die Äquivalente des 'Braunen Doggers' im Faziesraum West betrachtet das ENSI neu ebenfalls als nicht barrierenwirksam (Kapitel 3.1.2), womit sich die Mächtigkeit des nutzbaren einschlusswirksamen Gebirgsbereichs für das Wirtgestein Opalinuston im Lagerperimeter SMA-JS-OPA auf 90 m (Kapitel 3.1.1) reduziert. Für beide Lagerperimeter ist die Mächtigkeit des Wirtgesteins geringer als 100 m. Zudem sieht das ENSI die oberen Rahmengesteine als nicht barrierenwirksam an, wodurch insgesamt die Mindestanforderung an die Mächtigkeit nicht erfüllt wird. Dies führt für die Lagerperimeter SMA-JS-EFF und SMA-JS-OPA zur Bewertung «ungenügend».

Das ENSI erachtet die von der Nagra vorgeschlagene Differenzierung der Bewertung des **Indikators 8 «Platzangebot untertags»** aufgrund des standortspezifisch hergeleiteten Platzbedarfs als nicht belastbar. Entsprechend geht es für alle Lagerperimeter vom gleichen auf HAA-ZNO bzw. SMA-ZNO-OPA basierenden Platzbedarf aus (Kapitel 5.1). Dies führt für alle Lagerperimeter zur Bewertung «günstig» oder «sehr günstig». Die nördliche und südliche Abgrenzung der Lagerperimeter in Nördlich Lägern ist aufgrund der heutigen Datenlage nicht belastbar (zu meidende tektonische Zone im Norden und maximale Tiefenlage im Süden). Um ein ausreichendes «Platzangebot untertags» für Nördlich Lägern (SMA und HAA) zu erreichen, bezieht sich das ENSI auf jene alternativen Lagerperimeter (SMA-NL-aL1-r (Opalinuston: 800 m u. T., 'Brauner Dogger': 800 m u. T.), HAA-NL-aL1-r (850 m u. T.)), welche ein genügendes Platzangebot bieten. Dies führt für die Lagerperimeter SMA-NL-OPA, SMA-NL-BD und HAA-NL ebenfalls zur Bewertung «günstig».

Fazit: Für das **Kriterium 1.1 «Räumliche Ausdehnung»** stimmt die Bewertung des ENSI mit einigen Ausnahmen mit derjenigen der Nagra überein. Für die Lagerperimeter SMA-NL-OPA, SMA-NL-BD, SMA-WLB-MGL, HAA-NL und HAA-JO kommt das ENSI zu einer besseren Bewertung des Kriteriums (Tabelle 6). Im Falle der Lagerperimeter SMA-JS-OPA und SMA-JS-EFF hat das ENSI die sicherheitstechnische Bedeutung der geringeren Mächtigkeit und der fehlenden barrierenwirksamen Rahmengesteine mit Berechnungen untersucht. Die Dosisintervalle liegen für beide Lagerperimeter unterhalb des Schwellenwerts (Kapitel 5.2). Deshalb hat das ENSI das Kriterium 1.1 «Räumliche Ausdehnung» für die beiden Lagerperimeter bei der Aggregation mit «bedingt günstig» anstelle von «ungenügend» bewertet.

Kriterium 1.2 «Hydraulische Barrierenwirkung»

Table 7: Bewertungen der Nagra (N) und des ENSI (E) zum Kriterium 1.2 «Hydraulische Barrierenwirkung» sowie der dazugehörigen Indikatoren. Die Bewertung der Kriterien setzt sich, wie im Kapitel 4 erläutert, aus den arithmetisch gemittelten Bewertungen der Indikatoren zusammen. *Der Bewertung des ENSI liegt im Unterschied zur Nagra der alternative Lagerperimeter HAA-ZNO-aL506-r zugrunde.

Kriterium / Indikator	Bewertungsobjekt		SMA-SR-OPA		SMA-ZNO-OPA		SMA-NL-OPA		SMA-JO-OPA		SMA-JS-OPA		SMA-ZNO-BD		SMA-NL-BD		SMA-JS-EFF		SMA-WLB-MGL			
	N	E	N	E	N	E	N	E	N	E	N	E	N	E	N	E	N	E	N	E		
1.2	Hydraulische Barrierenwirkung				3.7	4.5	4.5	4.5	4.6	4.5	4.2	4.5	4.2	4.5	4.4	4.5	4.5	4.5	4.0	4.2	4.1	2.5
9	Hydraulische Durchlässigkeit	WG-ss/ LP	WG-ss		4.3	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.3	4.5	4.3	4.5	3.7	3.5	3.7	2.5
2	Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf Gesteins-Dekompektion	EG/ LPmin	WG-ss		2.7	4.5	4.5	4.5	4.7	4.5	4.1	4.5	4.1	4.5	4.5	4.5	4.7	4.5	4.3	4.5	4.1	2.5
10	Grundwasserstockwerke	EG/ LP	WG-ss		4.1	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.1	4.5	4.1	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.1	4.5	4.5	2.5

Kriterium / Indikator	Bewertungsobjekt		HAA-ZNO*		HAA-NL		HAA-JO			
	N	E	N	E	N	E	N	E		
1.2	Hydraulische Barrierenwirkung				4.5	4.5	4.6	4.5	3.9	4.5
9	Hydraulische Durchlässigkeit	WG-ss/ LP	WG-ss		4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5
2	Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf Gesteins-Dekompektion	EG/ LPmin	WG-ss		4.5	4.5	4.7	4.5	3.1	4.5
10	Grundwasserstockwerke	EG/ LP	WG-ss		4.5	4.5	4.5	4.5	4.1	4.5

Kriterium/Merkmal/Indikator

- sehr günstig ($4 \leq x \leq 5$)
- günstig ($3 \leq x < 4$)
- bedingt günstig ($2 \leq x < 3$)
- ungünstig ($1 \leq x < 2$)
- ungenügend ($0 \leq x < 1$)

Das Kriterium **1.2 «Hydraulische Barrierenwirkung»** setzt sich aus drei Indikatoren zusammen.

Für den **Indikator 9 «Hydraulische Leitfähigkeit»** stimmt die Bewertung des ENSI in den Standortgebieten der Nordschweiz mit der Bewertung der Nagra überein. Im Standortgebiet Wellenberg geht das ENSI für den oberen Eckwert von einem um eine Grössenordnung höheren Wert aus als die Nagra und kommt damit nur zu einer «bedingt günstigen» Bewertung.

Anders als die Nagra bewertet das ENSI den **Indikator 2 «Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf Gesteins-Dekompektion»** anhand des Bewertungsobjekts WG-ss und anhand einer anderen Bewertungsskala, die sich an der Zeit orientiert, ab welcher das WG-ss in den Einflussbereich der Dekompaktion geraten kann. Dadurch ändern sich die Bewertungen des Indikators für die Lagerperimeter HAA-JO und SMA-SR-OPA auf «sehr günstig» und für SMA-WLB-MGL auf «bedingt günstig». In den Lagerperimetern HAA-JO und SMA-SR-OPA führen auch pessimistische Annahmen für die flächenhafte Erosion nicht dazu, dass das WG-ss innerhalb der Betrachtungszeiträume (1 Mio Jahre bzw. 100 000 Jahre) in den Bereich der Dekompaktionszone gerät. Für den Lagerperimeter SMA-WLB-MGL befindet sich die oberste Lagerebene bereits heute im Bereich der Dekompaktionszone, und es ist auch für die tieferen Lagerebenen nicht auszuschliessen, dass diese in den Einflussbereich der Dekompaktionszone geraten.

Für den **Indikator 10 «Grundwasserstockwerke»** kommt das ENSI trotz unterschiedlicher Bewertungsskalen für alle Lagerperimeter zu derselben Bewertung «sehr günstig» wie die Nagra, mit Ausnahme des Lagerperimeters SMA-WLB-MGL («bedingt günstig»). Obwohl am Wellenberg unterschiedliche Grundwasserkörper ausgebildet sind (unterschiedliche gelöste Wasserinhaltsstoffe, langfristig vorhandener Unterdruck), liegt aus Sicht des ENSI wie auch der Nagra am Wellenberg kein klassischer Grundwasserstockwerkbau wie in den subhorizontal gelagerten sedimentären Schichtstapeln der Nordschweiz vor. Die fehlenden Anzeichen für in die Mergel-Formationen eingedrungene Grundwässer aus den Kalken im Liegenden sieht das ENSI beim Indikator «Unabhängige Evidenzen der Langzeitisolation» als ausreichend berücksichtigt.

Fazit: Für das Kriterium **1.2 «Hydraulische Barrierenwirkung»** stimmt die Bewertung des ENSI mit wenigen Ausnahmen mit derjenigen der Nagra überein. Für die Lagerperimeter SMA-SR-OPA und HAA-JO kommt das ENSI zu einer besseren und für den Lagerperimeter SMA-WLB-MGL zu einer schlechteren Bewertung des Kriteriums (Tabelle 7).

Kriterium 1.3 «Geochemische Bedingungen»

*Tabelle 8: Bewertungen der Nagra (N) und des ENSI (E) zum Kriterium 1.3 «Geochemische Bedingungen» sowie der dazugehörigen Indikatoren. Die Bewertung der Kriterien setzt sich, wie im Kapitel 4 erläutert, aus den arithmetisch gemittelten Bewertungen der Indikatoren zusammen. *Der Bewertung des ENSI liegt im Unterschied zur Nagra der alternative Lagerperimeter HAA-ZNO-aL506-r zugrunde.*

Kriterium / Indikator	Bewertungsobjekt		SMA-SR-OPA		SMA-ZNO-OPA		SMA-NL-OPA		SMA-JO-OPA		SMA-JS-OPA		SMA-ZNO-BD		SMA-NL-BD		SMA-JS-EFF		SMA-WLB-MGL		
	N	E	N	E	N	E	N	E	N	E	N	E	N	E	N	E	N	E	N	E	
1.3	Geochemische Bedingungen		4.3	4.3	4.3	4.3	4.3	4.3	4.3	4.3	4.3	4.3	4.3	4.2	4.3	4.2	3.6	3.3	3.6	3.5	
11	Mineralogie	WG-ss/LP	WG-ss	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	3.5	4.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5
12	pH	WG-ss/LP	WG-ss	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	3.5	4.5	4.5	4.5
13	Redox-Bedingungen	WG-ss/LP	WG-ss	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5
14	Salinität	WG-ss/LP	WG-ss	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5
15	Mikrobielle Prozesse	WG-ss/LP	WG-ss	4.1	4.5	4.1	4.5	4.1	4.5	4.1	4.5	4.1	4.5	4.1	4.5	4.1	4.5	3.3	2.5	3.3	2.5
16	Kolloide	WG-ss/LP	WG-ss	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5

Kriterium / Indikator	Bewertungsobjekt		HAA-ZNO*		HAA-NL		HAA-JO		
	N	E	N	E	N	E	N	E	
1.3	Geochemische Bedingungen		4.3	4.3	4.3	4.3	4.3	4.3	
11	Mineralogie	WG-ss/LP	WG-ss	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5
12	pH	WG-ss/LP	WG-ss	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5
13	Redox-Bedingungen	WG-ss/LP	WG-ss	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5
14	Salinität	WG-ss/LP	WG-ss	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5
15	Mikrobielle Prozesse	WG-ss/LP	WG-ss	4.1	4.5	4.1	4.5	4.1	4.5
16	Kolloide	WG-ss/LP	WG-ss	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5

Kriterium/Merkmal/Indikator

- sehr günstig ($4 \leq x \leq 5$)
- günstig ($3 \leq x < 4$)
- bedingt günstig ($2 \leq x < 3$)
- ungünstig ($1 \leq x < 2$)
- ungenügend ($0 \leq x < 1$)

Das Kriterium **1.3 «Geochemische Bedingungen»** setzt sich aus sechs Indikatoren zusammen, welche das jeweilige Wirtgestein in den Lagerperimetern beurteilen.

Für die Indikatoren **13 «Redox-Bedingungen»**, **14 «Salinität»** und **16 «Kolloide»** stimmen die Bewertungen des ENSI mit den Bewertungen der Nagra überein.

Für den **Indikator 11 «Mineralogie»** stimmt die Bewertung des ENSI mit der Bewertung der Nagra für die Lagerperimeter mit den Wirtgesteinen Opalinuston, Effinger Schichten und Mergel-Formationen des Helvetikums überein. Die Lagerperimeter mit Wirtgestein 'Brauner Dogger' bewertet das ENSI mit «günstig», da der untere Eckwert des Tonmineralgehaltes mit berücksichtigt wird.

Für den **Indikator 12 «pH»** stimmt die Bewertung des ENSI mit der Bewertung der Nagra für die Lagerperimeter mit Wirtgesteinen Opalinuston, 'Brauner Dogger' und Mergel-Formationen des Helvetikums überein. Auf Grund der Porenwasservarianten mit einem pH zwischen 6.8 und 7.3 wird der Indikator für den Lagerperimeter mit dem Wirtgestein Effinger Schichten abweichend von der Nagra nur mit «günstig» bewertet.

Für den Indikator **15 «Mikrobielle Prozesse»** stimmt die Bewertung des ENSI mit der Bewertung der Nagra für die Lagerperimeter mit den Wirtgesteinen Opalinuston und 'Brauner Dogger' überein. Die Lagerperimeter mit den Wirtgesteinen Effinger Schichten und Mergel-Formationen des Helvetikums bewertet das ENSI im Unterschied zur Nagra lediglich mit «bedingt günstig», da es grössere Poren und vor allem Diskontinuitäten (Klüfte) gibt, denen beim Bau nicht ausgewichen werden kann (vgl. Indikatoren «Kolloide» und «Art der Transportpfade und Ausbildung des Porenraums»).

Fazit: Für das **Kriterium 1.3 «Geochemische Bedingungen»** stimmt die Bewertung des ENSI für alle Lagerperimeter mit derjenigen der Nagra überein (Tabelle 8).

Kriterium 1.4 «Freisetzungspfade»

Tabelle 9: Bewertungen der Nagra (N) und des ENSI (E) zum Kriterium 1.4 «Freisetzungspfade» sowie der dazugehörigen Indikatoren. Die Bewertung der Kriterien setzt sich, wie im Kapitel 4 erläutert, aus den arithmetisch gemittelten Bewertungen der Indikatoren zusammen. *Der Bewertung des ENSI liegt im Unterschied zur Nagra der alternative Lagerperimeter HAA-ZNO-aL506-r zugrunde.

Kriterium / Indikator	Bewertungsobjekt		SMA-SR-OPA		SMA-ZNO-OPA		SMA-NL-OPA		SMA-JO-OPA		SMA-JS-OPA		SMA-ZNO-BD		SMA-NL-BD		SMA-JS-EFF		SMA-WLB-MGL			
	N	E	N	E	N	E	N	E	N	E	N	E	N	E	N	E	N	E	N	E		
1.4	Freisetzungspfade				4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	3.4	3.7	3.4	3.7	2.7	2.7	3.2	3.1
17	Art der Transportpfade und Ausbildung des Porenraums	WG-ss/ LP	WG-ss		4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.3	4.5	4.3	4.5	3.3	2.5	3.1	2.5	
20	Transmissivität präferenzierter Freisetzungspfade	WG-ss/ LP	WG-ss		4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.3	4.5	4.3	4.5	3.1	3.5	3.1	3.5	
22	Selbstabdichtungsvermögen	WG-ss/ LP	WG-ss		4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.3	4.5	4.3	4.5	3.1	3.5	2.5	2.5	
18	Homogenität des Gesteinsaufbaus	WG/LP	WG		4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	2.5	3.5	2.5	3.5	2.5	2.5	2.7	2.5	
19	Länge der massgebenden Freisetzungspfade	WG-ss/ LP	WG-ss		4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	4.5	4.5	

Kriterium / Indikator	Bewertungs- objekt	HAA- ZNO*		HAA-NL		HAA-JO			
		N	E	N	E	N	E		
1.4	Freisetzungspfade			4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5
17	Art der Transportpfade und Ausbildung des Porenraums	WG-ss/ LP	WG-ss	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5
20	Transmissivität präferenzierter Freisetzungspfade	WG-ss/ LP	WG-ss	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5
22	Selbstabdichtungsvermögen	WG-ss/ LP	WG-ss	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5
18	Homogenität des Gesteinsaufbaus	WG/LP	WG	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5
19	Länge der massgebenden Freisetzungspfade	WG-ss/ LP	WG-ss	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5

Kriterium/Merkmal/Indikator

-  sehr günstig ($4 \leq x \leq 5$)
-  günstig ($3 \leq x < 4$)
-  bedingt günstig ($2 \leq x < 3$)
-  ungünstig ($1 \leq x < 2$)
-  ungenügend ($0 \leq x < 1$)

Das Kriterium **1.4 «Freisetzungspfade»** setzt sich aus fünf Indikatoren zusammen.

Die Bewertungen des ENSI für die **Indikatoren 19 «Länge des massgebenden Freisetzungspfad»**, **20 «Transmissivität präferenzierter Freisetzungspfade»** und **22 «Selbstabdichtungsvermögen»** stimmen mit den Bewertungen der Nagra überein.

Für die Lagerperimeter mit Ausnahme SMA-JS-EFF und SMA-WLB-MGL stimmt die Bewertung des ENSI für den **Indikator 17 «Art der Transportpfade und Ausbildung des Porenraums»** mit der Bewertung der Nagra überein. In den Kalkbänken der Effinger Schichten ist die Entstehung wasserführender Systeme, ähnlich wie in den Kalkbankabfolgen, nicht auszuschliessen. Dies gilt insbesondere im tektonisch überprägten Lagerperimeter SMA-JS-EFF, woraus sich für das ENSI eine «bedingt günstige» Bewertung ergibt. In den Mergel-Formationen des Helvetikums existieren hydraulisch wirksame Trennflächen, in denen der Wasserfluss in lokalen Fließpfaden konzentriert sein kann (Channeling). Daraus resultiert seitens ENSI eine nur «bedingt günstige» Bewertung.

Für den **Indikator 18 «Homogenität des Gesteinsaufbaus»** stimmt die Bewertung des ENSI für die Lagerperimeter mit Wirtgesteinen Opalinuston, Effinger Schichten und Mergel-Formationen des Helvetikums mit der Bewertung der Nagra überein. Das ENSI beurteilt aufgrund einer differenzierteren Betrachtung der Sandkalkabfolgen (SKA) die Lagerperimeter mit Wirtgestein 'Brauner Dogger' abweichend (Kapitel 3.1.2). Unter dem Begriff SKA fasst die Nagra die Sandkalkbänke und die eisenoolithischen Horizonte als eine gemeinsame lithofazielle Einheit mit Tonmineralgehalten < 20 Gew.-% zusammen, was aus Sicht des ENSI eine konservative, aber in den meisten Fällen nur bedingt korrekte Vereinfachung ist. Gemäss NAB 12-51 weisen lediglich die Eisenoolithe in den Bohrungen Weiach, Benken und Schlattingen-1 eine – für die Bewertung des Indikators 18 relevante – Mächtigkeit im Meter-Bereich auf. Aufgrund des mittleren Tonmineralgehalts von 20 bis 40 Gew.-% erachtet das ENSI die Barrierenwirksamkeit dieser Eisenoolithe nicht als signifikant reduziert, woraus die Bewertung «günstig» für die Lagerperimeter mit Wirtgestein 'Brauner Dogger' resultiert.

Fazit: Trotz unterschiedlicher Bewertungen einzelner Indikatoren stimmt die Bewertung des ENSI für das **Kriterium 1.4 «Freisetzungspfade»** für alle Lagerperimeter mit derjenigen der Nagra überein (Tabelle 9).

Für die **Kriteriengruppe 1 «Eigenschaften des WG/EG»** stimmt die Bewertung des ENSI mit zwei Ausnahmen mit derjenigen der Nagra überein. Für die Lagerperimeter SMA-SR-OPA und SMA-NL-BD kommt das ENSI zu einer besseren Bewertung der Kriteriengruppe (Tabelle 19).

5.3.2 Kriteriengruppe 2 «Langzeitstabilität»

Kriterium 2.1 «Beständigkeit der Standort- und Gesteinseigenschaften»

*Tabelle 10: Bewertungen der Nagra (N) und des ENSI (E) zum Kriterium 2.1 «Beständigkeit der Standort- und Gesteinseigenschaften» sowie der dazugehörigen Indikatoren. Die Bewertung der Kriterien setzt sich, wie im Kapitel 4 erläutert, aus den arithmetisch gemittelten Bewertungen der Indikatoren zusammen. *Der Bewertung des ENSI liegt im Unterschied zur Nagra der alternative Lagerperimeter HAA-ZNO-aL506-r zugrunde.*

Kriterium / Indikator	Bewertungs- objekt	SMA-SR-OPA		SMA-ZNO-OPA		SMA-NL-OPA		SMA-JO-OPA		SMA-JS-OPA		SMA-ZNO-BD		SMA-NL-BD		SMA-JS-EFF		SMA-WLB-MGL			
		N	E	N	E	N	E	N	E	N	E	N	E	N	E	N	E	N	E		
2.1	Beständigkeit der Standort- und Gesteinseigenschaften			3.7	4.2	4.2	4.2	4.2	4.2	4.2	4.2	4.0	3.8	4.2	4.2	4.1	4.2	3.3	3.2	3.3	2.8
23	Modellvorstellungen zur Langzeitentwicklung (Geodynamik und Neotektonik)	EG/LP	EG	2.9	4.5	4.5	4.5	4.3	4.5	4.3	4.5	3.7	3.5	4.5	4.5	4.3	4.5	3.7	3.5	2.9	2.5
24	Seismizität	EG/LP	EG/LP	3.7	3.5	3.7	3.5	3.7	3.5	3.7	3.5	3.7	3.5	3.7	3.5	3.7	3.5	3.7	3.5	2.7	2.5
27	Potenzial zur Bildung neuer Wasserwegsamkeiten (Verkarstung)	WG/LP	WG	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.3	4.5	4.3	4.5	2.5	2.5	4.3	3.5

Kriterium / Indikator	Bewertungs- objekt	HAA-ZNO*		HAA-NL		HAA-JO			
		N	E	N	E	N	E		
2.1	Beständigkeit der Standort- und Gesteinseigenschaften			4.1	4.2	3.8	3.8	3.7	3.8
23	Modellvorstellungen zur Langzeitentwicklung (Geodynamik und Neotektonik)	EG/LP	EG	4.3	4.5	3.5	3.5	3.1	3.5
24	Seismizität	EG/LP	EG/LP	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5
27	Potenzial zur Bildung neuer Wasserwegsamkeiten (Verkarstung)	WG/LP	WG	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5

Kriterium/Merkmal/Indikator

- sehr günstig ($4 \leq x \leq 5$)
- günstig ($3 \leq x < 4$)
- bedingt günstig ($2 \leq x < 3$)
- ungünstig ($1 \leq x < 2$)
- ungenügend ($0 \leq x < 1$)

Das Kriterium **2.1 «Beständigkeit der Gesteinseigenschaften»** setzt sich aus drei Indikatoren zusammen.

Die Bewertung des ENSI für den **Indikator 24 «Seismizität»** stimmt mit der Bewertung der Nagra überein.

Das ENSI kann die Bewertung des **Indikators 23 «Modellvorstellungen zur Langzeitentwicklung (Geodynamik und Neotektonik; weitere Prozesse)»** durch die Nagra weitgehend nachvollziehen und stimmt mit dieser überein, obwohl das ENSI bei der Bewertung explizit keine «weiteren Prozesse» (Rinnenbildung) berücksichtigt, da diese Prozesse bereits im Rahmen der Indikatoren 3 und 4 bewertet werden. Aufgrund dieser Betrachtung des Indikators bewertet das ENSI den Lagerperimeter SMA-SR-OPA abweichend von der Nagra mit «sehr günstig».

Die Bewertung des **Indikators 27 «Potenzial zur Bildung neuer Wasserwegsamkeiten (Verkarstung)»** erfolgt wirtgesteins-, nicht standortgebietsspezifisch. Die Bewertungen des ENSI stimmen mit einer Ausnahme mit denjenigen der Nagra überein: Das ENSI bewertet den Lagerperimeter SMA-WLB-MGL nur mit «günstig». Die verkarstbaren Anteile der Mergel-Formationen des Helvetikums sind durch die Tektonik hydraulisch isoliert. Durch Zusammenwirkung der in den Alpen verstärkt auftretenden tektonischen Bewegungen und Erosionsprozesse kann jedoch der heute noch dichte Wirtgesteinskörper im Verlauf des Betrachtungszeitraums nachhaltig

geschwächt werden. Langfristig können aufgrund des in den Mergeln grundsätzlich beschränkten Selbstabdichtungsvermögens die heute isolierten, verkarstbaren Anteile des Wirtgesteines sukzessive verbunden und damit tiefer greifende Verkarstungsprozesse verursacht werden.

Fazit: Für das **Kriterium 2.1 «Beständigkeit der Gesteinseigenschaften»** stimmt die Bewertung des ENSI mit wenigen Ausnahmen mit derjenigen der Nagra überein. Für den Lagerperimeter SMA-SR-OPA kommt das ENSI zu einer besseren und für die Lagerperimeter SMA-JS-OPA und SMA-WLB-MGL zu einer schlechteren Bewertung des Kriteriums (Tabelle 10).

Kriterium 2.2 «Erosion»

Tabelle 11: Bewertungen der Nagra (N) und des ENSI (E) zum Kriterium 2.2 «Erosion» sowie der dazugehörigen Indikatoren. Die Bewertung der Kriterien setzt sich, wie im Kapitel 4 erläutert, aus den arithmetisch gemittelten Bewertungen der Indikatoren zusammen. *Der Bewertung des ENSI liegt im Unterschied zur Nagra der alternative Lagerperimeter HAA-ZNO-aL506-r zugrunde.

Kriterium / Indikator	Bewertungsobjekt		SMA-SR-OPA		SMA-ZNO-OPA		SMA-NL-OPA		SMA-JO-OPA		SMA-JS-OPA		SMA-ZNO-BD		SMA-NL-BD		SMA-JS-EFF		SMA-WLB-MGL	
	N	E	N	E	N	E	N	E	N	E	N	E	N	E	N	E	N	E	N	E
2.2 Erosion			3.4	3.8	4.5	4.5	4.6	4.5	4.5	4.2	4.4	4.5	4.5	4.5	4.6	4.5	4.5	4.5	4.0	3.5
28 Erosion im Betrachtungszeitraum	EG/LP	EG	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	3.5	3.5
3 Tiefenlage unter lokaler Erosionsbasis im Hinblick auf die Bildung neuer Rinnen	WG	WG	3.1	3.5	4.5	4.5	4.7	4.5	4.5	3.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.7	4.5	4.5	4.5	4.1	2.5
4 Tiefenlage unter Fels im Hinblick auf glaziale Tiefenerosion	WG	WG	2.5	3.5	4.5	4.5	4.7	4.5	4.5	4.5	4.3	4.5	4.5	4.5	4.7	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5

Kriterium / Indikator	Bewertungsobjekt		HAA-ZNO*		HAA-NL		HAA-JO	
	N	E	N	E	N	E	N	E
2.2 Erosion			4.0	3.8	4.4	4.2	3.8	3.8
28 Erosion im Betrachtungszeitraum	EG/LP	EG	4.3	4.5	4.3	4.5	4.3	4.5
3 Tiefenlage unter lokaler Erosionsbasis im Hinblick auf die Bildung neuer Rinnen	WG	WG	4.1	3.5	4.7	4.5	3.1	3.5
4 Tiefenlage unter Fels im Hinblick auf glaziale Tiefenerosion	WG	WG	3.5	3.5	4.3	3.5	4.1	3.5

Kriterium/Merkmal/Indikator

- sehr günstig ($4 \leq x \leq 5$)
- günstig ($3 \leq x < 4$)
- bedingt günstig ($2 \leq x < 3$)
- ungünstig ($1 \leq x < 2$)
- ungenügend ($0 \leq x < 1$)

Das Kriterium **2.2 «Erosion»** setzt sich aus drei Indikatoren zusammen.

Die Bewertung des ENSI für den **Indikator 28 «Erosion im Betrachtungszeitraum»** stimmt mit der Bewertung der Nagra überein.

Das ENSI ist mit der von der Nagra erarbeiteten Bewertungsskala des in Etappe 2 SGT neu eingeführten **Indikators 3 «Tiefenlage unter lokaler Erosionsbasis im Hinblick auf die Bildung neuer Rinnen»** nicht einverstanden (Kapitel 5.1). Unter Anwendung einer modifizierten Bewertungsskala mit Bewertungsobjekt Oberkante WG kommt das ENSI zu teilweise abweichenden Bewertungen. Aufgrund einer unzureichend kon-

servativen Berücksichtigung des Prozesses der glazialen Tiefenerosion wird der Lagerperimeter HAA-ZNO nur mit «günstig» bewertet. Das ENSI berücksichtigt für das geologische Standortgebiet Jura Ost die Absenkung der lokalen Erosionsbasis analog zu den weiteren SMA-Gebieten der Nordschweiz. Der Lagerperimeter SMA-JO-OPA wird daher nur mit «günstig» bewertet. Die Bewertung des Lagerperimeters SMA-WLB-MGL orientiert sich analog zur Etappe 1 SGT an der Tiefenlage unter der Terrainoberfläche, womit der Einfluss der Dekompaktion am Ende des Betrachtungszeitraums bewertet wird. Das ENSI übernimmt folglich seine Bewertung des Indikators 2 «Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf die Gesteinsdekompektion» mit «bedingt günstig».

Bei der Bewertung des **Indikators 4 «Tiefenlage unter Fels im Hinblick auf glaziale Tiefenerosion»** ist das ENSI mit der Bewertungsskala der Nagra nicht einverstanden (Kapitel 5.1). Das ENSI verwendet das Bewertungsobjekt Oberkante WG. Das ENSI behandelt in seiner Bewertung übertiefte Rinnen als Rinnen, welche unter die lokale Erosionsbasis reichen. Infolge der im Nagra-Lagerperimeter HAA-ZNO-mLE-r mittels 3D-Seismik identifizierten und räumlich abgegrenzten glazialen Felsrinnen (vor allem Rudolfingen-Rinne) werden die verschärften Anforderungen nicht erfüllt. Daraus ergäbe sich die Bewertung «bedingt günstig». Der auf Nachfrage des ENSI (NAB 17-01, Frage 81) abgegrenzte alternative Lagerperimeter HAA-ZNO-aL506-r, vom ENSI als HAA-ZNO bezeichnet, erfüllt hingegen die VA und wird vom ENSI mit «günstig» bewertet. Der Lagerperimeter HAA-NL wird aufgrund von abweichend zur Nagra berücksichtigten Übertiefungen vom ENSI mit «günstig» bewertet. Die pauschale Bewertungsmöglichkeit aufgrund der Lage ausserhalb von Haupttälern erachtet das ENSI in Etappe 2 SGT als nicht mehr stufengerecht im Vergleich zur Etappe 1 SGT. Die Lagerperimeter SMA-SR-OPA sowie HAA-JO werden aufgrund ihrer minimalen Tiefenlage unter Fels je mit «günstig» bewertet. Der Lagerperimeter HAA-JO erfüllt dabei die VA nur äusserst knapp. Die Bewertungen der weiteren Lagerperimeter des ENSI stimmen mit der Bewertung der Nagra überein.

Fazit: Für das **Kriterium 2.2 «Erosion»** stimmt die Bewertung des ENSI mit einer Ausnahme mit derjenigen der Nagra überein. Für den Lagerperimeter SMA-WLB-MGL kommt das ENSI zu einer schlechteren Bewertung des Kriteriums (Tabelle 11).

Kriterium 2.3 «Lagerbedingte Einflüsse»

Tabelle 12: Bewertungen der Nagra (N) und des ENSI (E) zum Kriterium 2.3 «Lagerbedingte Einflüsse» sowie der dazugehörigen Indikatoren. Die Bewertung der Kriterien setzt sich, wie im Kapitel 4 erläutert, aus den arithmetisch gemittelten Bewertungen der Indikatoren zusammen. *Der Bewertung des ENSI liegt im Unterschied zur Nagra der alternative Lagerperimeter HAA-ZNO-aL506-r zugrunde.

Kriterium / Indikator	Bewertungsobjekt		SMA-SR-OPA		SMA-ZNO-OPA		SMA-NL-OPA		SMA-JO-OPA		SMA-JS-OPA		SMA-ZNO-BD		SMA-NL-BD		SMA-JS-EFF		SMA-WLB-MGL		
	N	E	N	E	N	E	N	E	N	E	N	E	N	E	N	E	N	E	N	E	
2.3	Lagerbedingte Einflüsse				3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.8	3.5	3.8	3.2	3.5	3.3	3.8
29	Auflockerungszone im Nahbereich der Untertagebauten	WG-ss/ LP	WG-ss		3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.1	3.5	3.1	3.5
30	Chemische Wechselwirkungen	WG-ss/ LP	WG-ss		4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	3.5	3.5	3.5	3.5
31	Verhalten des Wirtgesteins bzgl. Gas	WG-ss/ LP	WG		2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	3.5	2.5	3.5	3.1	3.5	3.3	4.5

Kriterium / Indikator		Bewertungs- objekt		HAA- ZNO*		HAA-NL		HAA-JO	
				N	E	N	E	N	E
2.3	Lagerbedingte Einflüsse			3.5	3.3	3.5	3.3	3.5	3.3
29	Auflockerungszone im Nahbereich der Untertagebauten	WG-ss/ LP	WG-ss	4.3	3.5	4.3	3.5	4.3	3.5
30	Chemische Wechselwirkungen	WG-ss/ LP	WG-ss	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5
31	Verhalten des Wirtgesteins bzgl. Gas	WG-ss/ LP	WG	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5
32	Verhalten des Wirtgesteins bzgl. Temperatur	WG-ss/ LP	WG/EG	2.7	2.5	2.7	2.5	2.7	2.5

Kriterium/Merkmal/Indikator

	sehr günstig	$(4 \leq x \leq 5)$
	günstig	$(3 \leq x < 4)$
	bedingt günstig	$(2 \leq x < 3)$
	ungünstig	$(1 \leq x < 2)$
	ungenügend	$(0 \leq x < 1)$

Das Kriterium **2.3 «Lagerbedingte Einflüsse»** setzt sich aus vier Indikatoren für das HAA-Lager und aus drei Indikatoren für das SMA-Lager zusammen. Der Indikator 32 ist für das SMA-Lager nicht relevant.

Die Bewertungen des ENSI für die **Indikatoren 30 «Chemische Wechselwirkungen»** und **32 «Verhalten des Wirtgesteins bezüglich Temperatur»** stimmen mit den Bewertungen der Nagra überein.

Das ENSI bewertet den **Indikator 29 «Auflockerungszone im Nahbereich der Untertagebauten»** für alle Lagerperimeter (SMA- und HAA-Lager) einheitlich mit «günstig». Dies steht im Einklang mit der Bewertung der Nagra für die SMA-Standortgebiete, weicht aber von jener der Nagra für die HAA-Standortgebiete ab. Bei seiner Bewertung stützt sich das ENSI auf die aktuell vorhandene, beschränkte felsmechanische Datenbasis, welche zurzeit nur qualitative Aussagen über die Ausdehnung der Auflockerungszone (AUZ) erlaubt sowie auf die Ergebnisse der Dosisberechnungen der Nagra im Rahmen der Nachforderung des ENSI (NAB 16-41).

Das ENSI stützt sich bei der Bewertung des **Indikators 31 «Verhalten des Wirtgesteins bezüglich Gas»** in Etappe 2 SGT im Gegensatz zur Nagra nur auf die Gastransportkapazitäten der Wirtgesteine und nicht wie die Nagra zusätzlich auch auf technische Massnahmen (Kapitel 3.4). Die Lagerperimeter SMA-ZNO-BD und SMA-NL-BD werden mit «günstig» und der Lagerperimeter SMA-WLB-MGL mit «sehr günstig» bewertet. Für die übrigen Lagerperimeter stimmt die Bewertung des ENSI mit der Bewertung der Nagra überein.

Fazit: Für das **Kriterium 2.3 «Lagerbedingte Einflüsse»** stimmt die Bewertung des ENSI mit derjenigen der Nagra überein (Tabelle 12).

Kriterium 2.4 «Nutzungskonflikte»

Table 13: Bewertungen der Nagra (N) und des ENSI (E) zum Kriterium 2.4 «Nutzungskonflikte» sowie der dazugehörigen Indikatoren. Die Bewertung der Kriterien setzt sich, wie im Kapitel 4 erläutert, aus den arithmetisch gemittelten Bewertungen der Indikatoren zusammen. *Der Bewertung des ENSI liegt im Unterschied zur Nagra der alternative Lagerperimeter HAA-ZNO-aL506-r zugrunde.

Kriterium / Indikator	Bewertungsobjekt		SMA-SR-OPA		SMA-ZNO-OPA		SMA-NL-OPA		SMA-JO-OPA		SMA-JS-OPA		SMA-ZNO-BD		SMA-NL-BD		SMA-JS-EFF		SMA-WLB-MGL			
	N	E	N	E	N	E	N	E	N	E	N	E	N	E	N	E	N	E	N	E		
2.4	Nutzungskonflikte				3.9	3.9	3.8	3.9	3.5	3.5	3.5	3.5	4.1	3.9	3.8	3.9	3.5	3.5	4.1	3.9	4.2	4.3
33	Rohstoffvorkommen innerhalb des Wirtgesteins	WG/LP	WG/LP	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	
34	Rohstoffvorkommen unterhalb des Wirtgesteins	EG/LP	EG/LP	3.5	3.5	3.5	3.5	2.5	2.5	2.5	2.5	3.5	3.5	3.5	3.5	2.5	2.5	3.5	3.5	3.5	3.5	
35	Rohstoffvorkommen oberhalb des Wirtgesteins	EG/LP	EG/LP	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	3.1	3.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	
36	Mineral- und Thermalwassernutzungen	EG/LP	EG/LP	3.7	3.5	3.1	3.5	3.1	3.5	4.5	4.5	4.5	4.5	3.1	3.5	3.1	3.5	4.5	4.5	4.5	4.5	
37	Geothermie und weitere energiebezogene Nutzungen des Untergrunds	EG/LP	EG/LP	3.3	3.5	3.3	3.5	2.7	2.5	2.7	2.5	3.3	2.5	3.3	3.5	2.7	2.5	3.3	2.5	4.1	4.5	

Kriterium / Indikator	Bewertungsobjekt		HAA-ZNO*		HAA-NL		HAA-JO			
	N	E	N	E	N	E	N	E		
2.4	Nutzungskonflikte				4.0	4.1	3.5	3.5	3.7	3.7
33	Rohstoffvorkommen innerhalb des Wirtgesteins	WG/LP	WG/LP	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	
34	Rohstoffvorkommen unterhalb des Wirtgesteins	EG/LP	EG/LP	4.5	4.5	2.5	2.5	2.5	2.5	
35	Rohstoffvorkommen oberhalb des Wirtgesteins	EG/LP	EG/LP	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	
36	Mineral- und Thermalwassernutzungen	EG/LP	EG/LP	3.1	3.5	3.1	3.5	4.5	4.5	
37	Geothermie und weitere energiebezogene Nutzungen des Untergrunds	EG/LP	EG/LP	3.3	3.5	2.7	2.5	2.7	2.5	

Kriterium/Merkmal/Indikator

- sehr günstig ($4 \leq x \leq 5$)
- günstig ($3 \leq x < 4$)
- bedingt günstig ($2 \leq x < 3$)
- ungünstig ($1 \leq x < 2$)
- ungenügend ($0 \leq x < 1$)

Das Kriterium **2.4 «Nutzungskonflikte»** setzt sich aus fünf Indikatoren zusammen.

Die Bewertungen des ENSI für die **Indikatoren 33 «Rohstoffvorkommen innerhalb des Wirtgesteins», 34 «Rohstoffvorkommen unterhalb des Wirtgesteins», 35 «Rohstoffvorkommen oberhalb des Wirtgesteins» und 36 «Mineral- und Thermalwassernutzung»** stimmen mit den Bewertungen der Nagra überein.

In Abweichung zur Nagra bewertet das ENSI den **Indikator 37 «Geothermie und weitere energiebezogene Nutzungen des Untergrunds»** für die beiden Lagerperimeter SMA-JS-OPA und SMA-JS-EFF wegen der in den Bohrungen Gösgen und Oftringen beobachteten positiven Wärmeanomalie mit «bedingt günstig».

Fazit: Für das **Kriterium 2.4 «Nutzungskonflikte»** stimmt die Bewertung des ENSI mit wenigen Ausnahmen

mit derjenigen der Nagra überein. Für die Lagerperimeter SMA-JS-OPA und SMA-JS-EFF kommt das ENSI zu einer schlechteren Bewertung des Kriteriums (Tabelle 13). Nach Ansicht des ENSI sind die Anforderungen und Bewertungsskalen für die aufgeführten Nutzungskonflikte für Etappe 2 SGT stufengerecht. Nach Art. 70 KEV ist der Schutzbereich eines geologischen Tiefenlagers auf der Grundlage des zur Bewilligung des Projekts vorgelegten Berichts zur Langzeitsicherheit festzulegen. Die Nagra muss die dazu erforderlichen Grundlagen in Etappe 3 SGT für die gewählten Standortgebiete der Tiefenlager erarbeiten. Der Schutzbereich umfasst den gesamten Raum im Untergrund, in dem Eingriffe die Sicherheit des Tiefenlagers beeinträchtigen könnten.

Für die **Kriteriengruppe 2 «Langzeitstabilität»** stimmt die Bewertung des ENSI mit zwei Ausnahmen mit derjenigen der Nagra überein. Für den Lagerperimeter SMA-NL-BD kommt das ENSI zu einer besseren und für den Lagerperimeter SMA-JS-OPA zu einer schlechteren Bewertung der Kriteriengruppe.

5.3.3 Kriteriengruppe 3 «Zuverlässigkeit der geologischen Aussagen»

Kriterium 3.1 «Charakterisierbarkeit der Gesteine»

*Tabelle 14: Bewertungen der Nagra (N) und des ENSI (E) zum Kriterium 3.1 «Charakterisierbarkeit der Gesteine» sowie der dazugehörigen Indikatoren. Die Bewertung der Kriterien setzt sich, wie im Kapitel 4 erläutert, aus den arithmetisch gemittelten Bewertungen der Indikatoren zusammen. *Der Bewertung des ENSI liegt im Unterschied zur Nagra der alternative Lagerperimeter HAA-ZNO-aL506-r zugrunde.*

Kriterium / Indikator		Bewertungsobjekt		SMA-SR-OPA		SMA-ZNO-OPA		SMA-NL-OPA		SMA-JO-OPA		SMA-JS-OPA		SMA-ZNO-BD		SMA-NL-BD		SMA-JS-EFF		SMA-WLB-MGL	
		N	E	N	E	N	E	N	E	N	E	N	E	N	E	N	E	N	E	N	E
3.1	Charakterisierbarkeit der Gesteine			4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	3.6	3.0	3.6	3.0	2.8	3.0	3.3	3.0
39	Variabilität der Gesteinseigenschaften im Hinblick auf ihre Charakterisierbarkeit	WG-ss/LP	WG	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.1	2.5	4.1	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5
40	Erfahrungen	WG/LP	WG	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	3.1	3.5	3.1	3.5	3.1	3.5	4.1	3.5

Kriterium / Indikator		Bewertungsobjekt		HAA-ZNO*		HAA-NL		HAA-JO	
		N	E	N	E	N	E	N	E
3.1	Charakterisierbarkeit der Gesteine			4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5
39	Variabilität der Gesteinseigenschaften im Hinblick auf ihre Charakterisierbarkeit	WG-ss/LP	WG	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5
40	Erfahrungen	WG/LP	WG	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5

Kriterium/Merkmal/Indikator

- sehr günstig ($4 \leq x \leq 5$)
- günstig ($3 \leq x < 4$)
- bedingt günstig ($2 \leq x < 3$)
- ungünstig ($1 \leq x < 2$)
- ungenügend ($0 \leq x < 1$)

Das **Kriterium 3.1 «Charakterisierbarkeit der Gesteine»** setzt sich aus zwei Indikatoren zusammen, welche das jeweilige Wirtgestein in den Lagerperimetern beurteilen.

Die Bewertungen des ENSI stimmen für den **Indikator 39 «Variabilität der Gesteinseigenschaften im Hinblick auf ihre Charakterisierbarkeit»** mit den Bewertungen der Nagra mehrheitlich überein. Das ENSI verwendet im Unterschied zur Nagra das Bewertungsobjekt WG, jedoch die gleiche Bewertungsskala. Die Lagerperimeter für den 'Braunen Dogger' werden daher nur mit «bedingt günstig» bewertet, da in diesem Wirtgestein vertikal unregelmässig und lateral schlecht korrelierbare «harten Bänke» auftreten.

Die Bewertung des ENSI stimmt für den **Indikator 40 «Erfahrungen»** mehrheitlich mit derjenigen der Nagra überein. Beim Lagerperimeter SMA-WLB-MGL kommt das ENSI aufgrund der aus seiner Sicht erhöhten Heterogenität und beschränkten Übertragbarkeit der Erfahrungen nur zu einer «günstigen» Bewertung.

Fazit: Die Bewertung des ENSI für das **Kriterium 3.1 «Charakterisierbarkeit der Gesteine»** stimmt für fast alle Lagerperimeter mit derjenigen der Nagra überein. Für den Lagerperimeter SMA-JS-EFF kommt das ENSI zu einer besseren Bewertung des Kriteriums (Tabelle 14).

Kriterium 3.2 «Explorierbarkeit der räumlichen Verhältnisse»

Tabelle 15: Bewertungen der Nagra (N) und des ENSI (E) zum Kriterium 3.2 «Explorierbarkeit der räumlichen Verhältnisse» sowie der dazugehörigen Indikatoren. Die Bewertung der Kriterien setzt sich, wie im Kapitel 4 erläutert, aus den arithmetisch gemittelten Bewertungen der Indikatoren zusammen. *Der Bewertung des ENSI liegt im Unterschied zur Nagra der alternative Lagerperimeter HAA-ZNO-aL506-r zugrunde.

Kriterium / Indikator	Bewertungsobjekt		SMA-SR-OPA		SMA-ZNO-OPA		SMA-NL-OPA		SMA-JO-OPA		SMA-JS-OPA		SMA-ZNO-BD		SMA-NL-BD		SMA-JS-EFF		SMA-WLB-MGL	
	N	E	N	E	N	E	N	E	N	E	N	E	N	E	N	E	N	E	N	E
3.2	Explorierbarkeit der räumlichen Verhältnisse		4.1	4.0	4.1	4.0	4.1	4.0	4.3	4.0	4.0	4.0	3.2	3.0	3.2	3.0	3.2	3.0	1.8	2.0
43	Explorationsverhältnisse im geologischen Untergrund		4.1	4.5	4.3	4.5	4.3	4.5	4.3	4.5	4.1	4.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	1.5	1.5
44	Explorationsbedingungen an Oberfläche		4.1	3.5	3.9	3.5	3.9	3.5	4.3	3.5	3.9	3.5	3.9	3.5	3.9	3.5	3.9	3.5	2.1	2.5

Kriterium / Indikator	Bewertungsobjekt		HAA-ZNO*		HAA-NL		HAA-JO	
	N	E	N	E	N	E	N	E
3.2	Explorierbarkeit der räumlichen Verhältnisse		4.2	4.0	4.1	4.0	4.3	4.0
43	Explorationsverhältnisse im geologischen Untergrund		4.3	4.5	4.3	4.5	4.3	4.5
44	Explorationsbedingungen an Oberfläche		4.1	3.5	3.9	3.5	4.3	3.5

Kriterium/Merkmal/Indikator

	sehr günstig	$(4 \leq x \leq 5)$
	günstig	$(3 \leq x < 4)$
	bedingt günstig	$(2 \leq x < 3)$
	ungünstig	$(1 \leq x < 2)$
	ungenügend	$(0 \leq x < 1)$

Das **Kriterium 3.2 «Explorierbarkeit der räumlichen Verhältnisse»** setzt sich aus zwei Indikatoren zusammen.

Die Bewertung des ENSI für den **Indikator 43 «Explorationsverhältnisse im geologischen Untergrund»** stimmt mit der Bewertung der Nagra überein.

Die Bewertung des **Indikators 44 «Explorationsbedingungen an Oberfläche»** erfolgt auf Basis der Einschätzung der Einsatzmöglichkeiten und Erfolgsaussichten von seismischen Messungen und Bohrungen. Die Dokumentation der Nagra zu ihrer Bewertung des Indikators «Explorationsbedingungen an Oberfläche» ist fachlich nachvollziehbar, die Bewertung dieses Indikators erfolgt jedoch nicht strikt nach der vorgegebenen Bewertungsskala. Das ENSI bewertet die Lagerperimeter SMA-SR-OPA, SMA-JO-OPA, HAA-ZNO und HAA-JO analog zu den anderen Lagerperimetern der Nordschweiz nur mit «günstig». Für die verbleibenden Lagerperimeter stimmt die Bewertung des ENSI mit derjenigen Bewertung der Nagra überein.

Fazit: Für das **Kriterium 3.2 «Explorierbarkeit der räumlichen Verhältnisse»** sind die Bewertung des ENSI mit einer Ausnahme mit derjenigen der Nagra überein. Für den Lagerperimeter SMA-WLB-MGL kommt das ENSI zu einer besseren Bewertung des Kriteriums (Tabelle 15).

Kriterium 3.3 «Prognostizierbarkeit der Langzeitveränderungen»

Tabelle 16: Bewertungen der Nagra (N) und des ENSI (E) zum Kriterium 3.3 «Prognostizierbarkeit der Langzeitveränderungen» sowie der dazugehörigen Indikatoren. Die Bewertung der Kriterien setzt sich, wie im Kapitel 4 erläutert, aus den arithmetisch gemittelten Bewertungen der Indikatoren zusammen. *Der Bewertung des ENSI liegt im Unterschied zur Nagra der alternative Lagerperimeter HAA-ZNO-aL506-r zugrunde.

Kriterium / Indikator	Bewertungsobjekt		SMA-SR-OPA		SMA-ZNO-OPA		SMA-NL-OPA		SMA-JO-OPA		SMA-JS-OPA		SMA-ZNO-BD		SMA-NL-BD		SMA-JS-EFF		SMA-WLB-MGL			
	N	E	N	E	N	E	N	E	N	E	N	E	N	E	N	E	N	E	N	E		
3.3	Prognostizierbarkeit der Langzeitveränderungen				3.7	4.5	4.5	4.5	4.4	4.5	4.4	4.5	4.1	4.0	4.3	4.5	4.2	4.5	3.9	4.0	3.6	3.5
23	Modellvorstellungen zur Langzeitentwicklung (Geodynamik und Neotektonik)		EG/LP	EG	2.9	4.5	4.5	4.5	4.3	4.5	4.3	4.5	3.7	3.5	4.5	4.5	4.3	4.5	3.7	3.5	2.9	2.5
46	Unabhängige Evidenzen der Langzeitisolation		WG/LP	EG	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.1	4.5	4.1	4.5	4.1	4.5	4.3	4.5

Kriterium / Indikator	Bewertungsobjekt		HAA-ZNO*		HAA-NL		HAA-JO			
	N	E	N	E	N	E	N	E		
3.3	Prognostizierbarkeit der Langzeitveränderungen				4.4	4.5	4.0	4.0	3.8	4.0
23	Modellvorstellungen zur Langzeitentwicklung (Geodynamik und Neotektonik)		EG/LP	EG	4.3	4.5	3.5	3.5	3.1	3.5
46	Unabhängige Evidenzen der Langzeitisolation		WG/LP	EG	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5

Kriterium/Merkmal/Indikator

-  sehr günstig ($4 \leq x \leq 5$)
-  günstig ($3 \leq x < 4$)
-  bedingt günstig ($2 \leq x < 3$)
-  ungünstig ($1 \leq x < 2$)
-  ungenügend ($0 \leq x < 1$)

Das **Kriterium 3.3 «Prognostizierbarkeit der Langzeitveränderungen»** setzt sich aus zwei Indikatoren zusammen.

Das ENSI kann die Bewertung des **Indikators 23 «Modellvorstellungen zur Langzeitentwicklung (Geodynamik und Neotektonik; weitere Prozesse)»** durch die Nagra weitgehend nachvollziehen und stimmt mit dieser überein, obwohl das ENSI bei der Bewertung explizit keine «weiteren Prozesse» (Rinnenbildung) berücksichtigt, da diese Prozesse bereits im Rahmen der Indikatoren 3 und 4 bewertet werden. Aufgrund dieser Betrachtung des Indikators bewertet das ENSI den Lagerperimeter SMA-SR-OPA abweichend von der Nagra mit «sehr günstig». Das ENSI ist mit der Nagra einverstanden, dass der Indikator im Rahmen der Gesamtbewertung zweimal berücksichtigt wird (NAB 17-01, Frage 80). Bei der Bewertung in Etappe 3 SGT ist unter dem Kriterium 3.3 der Aspekt der Prognostizierbarkeit stärker zu berücksichtigen und gegebenenfalls dafür ein eigener Indikator zu definieren.

Die Bewertung des ENSI für den **Indikator 46 «Unabhängige Evidenzen der Langzeitisolation»** stimmt mit derjenigen der Nagra überein. Das ENSI stellt ausserdem fest, dass diesbezügliche Informationen aus zahlreichen Referenzberichten (NAB 10-21, NAB 12-54) stufengerecht in die Bewertung eingeflossen sind und sieht somit die Forderung 14 aus ENSI 33/115 als erfüllt an.

Fazit: Für das **Kriterium 3.3 «Prognostizierbarkeit der Langzeitveränderungen»** stimmt die Bewertung des ENSI mit wenigen Ausnahmen mit derjenigen der Nagra überein. Für die Lagerperimeter SMA-SR-OPA, SMA-JS-EFF und HAA-JO kommt das ENSI zu einer jeweils besseren Bewertung des Kriteriums (Tabelle 16).

Für die **Kriteriengruppe 3 «Zuverlässigkeit der geologischen Aussagen»** stimmt die Bewertung des ENSI mit derjenigen der Nagra überein.

5.3.4 Kriteriengruppe 4: Bautechnische Eignung

Kriterium 4.1: «Felsmechanische Eigenschaften und Bedingungen»

*Tabelle 17: Bewertungen der Nagra (N) und des ENSI (E) zum Kriterium 4.1: «Felsmechanische Eigenschaften und Bedingungen» sowie der dazugehörigen Indikatoren. Die Bewertung der Kriterien setzt sich, wie im Kapitel 4 erläutert, aus den arithmetisch gemittelten Bewertungen der Indikatoren zusammen. *Der Bewertung des ENSI liegt im Unterschied zur Nagra der alternative Lagerperimeter HAA-ZNO-aL506-r zugrunde.*

Kriterium / Indikator	Bewertungsobjekt		SMA-SR-OPA		SMA-ZNO-OPA		SMA-NL-OPA		SMA-JO-OPA		SMA-JS-OPA		SMA-ZNO-BD		SMA-NL-BD		SMA-JS-EFF		SMA-WLB-MGL	
	N	E	N	E	N	E	N	E	N	E	N	E	N	E	N	E	N	E	N	E
4.1 Felsmechanische Eigenschaften und Bedingungen			4.1	2.5	3.5	2.5	2.3	2.5	3.4	2.5	3.4	2.5	3.5	2.5	2.8	2.5	3.9	2.5	3.5	2.5
47 Gesteinsfestigkeiten und Verformungseigenschaften	WG-ss/ LP		3.5		3.5		3.3		3.3		3.3		3.5		3.5		4.3		4.3	
1 Tiefenlage im Hinblick auf bautechnische Machbarkeit (u.B. Gesteinsfestigkeiten und Verformungseigenschaften)	WG-ss/ LPmax	WG-ss	4.7	2.5	3.5	2.5	1.3	2.5	3.5	2.5	3.5	2.5	3.5	2.5	2.1	2.5	3.5	2.5	2.7	2.5

Kriterium / Indikator	Bewertungsobjekt		HAA-ZNO*		HAA-NL		HAA-JO	
	N	E	N	E	N	E	N	E
4.1 Felsmechanische Eigenschaften und Bedingungen			3.5	2.5	2.4	2.5	3.7	2.5
47 Gesteinsfestigkeiten und Verformungseigenschaften	WG-ss/ LP		3.5		3.3		3.3	
1 Tiefenlage im Hinblick auf bautechnische Machbarkeit (u.B. Gesteinsfestigkeiten und Verformungseigenschaften)	WG-ss/ LPmax	WG-ss	3.5	2.5	1.5	2.5	4.1	2.5

Kriterium/Merkmal/Indikator

- sehr günstig ($4 \leq x \leq 5$)
- günstig ($3 \leq x < 4$)
- bedingt günstig ($2 \leq x < 3$)
- ungünstig ($1 \leq x < 2$)
- ungenügend ($0 \leq x < 1$)

Das **Kriterium 4.1: «Felsmechanische Eigenschaften und Bedingungen»** setzt sich aus zwei Indikatoren zusammen.

Bezüglich des Indikators **1 «Tiefenlage im Hinblick auf bautechnische Machbarkeit (u. B. Gesteinsfestigkeiten und Verformungseigenschaften)»** stimmt das ENSI den Schlussfolgerungen der Nagra zur Begrenzung der Tiefenlage auf 600 m u. T. bzw. 700 m u. T. für SMA- bzw. HAA-Lager aufgrund der wenigen belastbaren felsmechanischen Daten des Opalinustons und der mehrfachen überkonservativen Annahmen der Nagra nicht zu. Die Anhäufung von konservativen Annahmen bei der Anwendung der felsmechanischen Parameter (Gebirgsmodelle) führt dazu, dass die Aussagekraft der von der Nagra durchgeführten Berechnungen stark reduziert wird und die Schlussfolgerungen der Nagra in Bezug auf das Gebirgsverhalten in den Standortgebieten

nicht mehr belastbar sind. So wird der Einfluss der Überlagerung im relevanten Tiefenbereich zwischen 600 und 900 m u. T. gegenüber dem Einfluss der Gebirgsmodelle (GMmin bis GMmax) überschätzt (Kapitel 2.9). Die von der Nagra verwendete tiefenabhängige Bewertungsskala für den Indikator 1 ist folglich nicht nachvollziehbar. Das ENSI bewertet aus diesen Gründen den Indikator 1 für alle HAA- und SMA-Standortgebiete der Nordschweiz einheitlich mit «bedingt günstig» (Kapitel 6.1.4). Formal führt die Nicht-Einhaltung der in Etappe 1 SGT definierten Mindestanforderung beim SMA-Standortgebiet Wellenberg (maximale Tiefenlage 800 m) zu einer Bewertung «ungenügend». Das ENSI bewertet den Indikator 1 für dieses Standortgebiet jedoch aufgrund der zu erwartenden erhöhten Gesteinsfestigkeiten im Vergleich zu Opalinuston und der bisherigen Tunnelbauerfahrungen im Tiefenbereich von 800 – 1000 m u. T. als «bedingt günstig» (Kapitel 6.1.4).

Nach Ansicht des ENSI ist der **Indikator 47 «Gesteinsfestigkeiten und Verformungseigenschaften»** für die Beurteilung der felsmechanischen Eigenschaften und Bedingungen in den Standortgebieten und in den dazugehörigen Lagerperimetern nicht isoliert von den anderen relevanten geotechnischen und bautechnischen Aspekten (z. B. Tiefenlage) zu beurteilen. Mit dem von der Nagra für Etappe 2 SGT neu definierten Indikator 1 werden neben anderen felsmechanischen Aspekten auch die Gesteinsfestigkeiten und Verformungseigenschaften explizit in der Bewertung dieses Indikators berücksichtigt. Um im Rahmen von Etappe 2 SGT eine doppelte Bewertung dieser Aspekte zu vermeiden, wird der Indikator 47 vom ENSI nicht bewertet.

Fazit: Für das **Kriterium 4.1 «Felsmechanische Eigenschaften und Bedingungen»** stimmt die Bewertung des ENSI für die Lagerperimeter SMA-NL-OPA, SMA-NL-BD und HAA-NL mit derjenigen der Nagra überein. Für die anderen Lagerperimeter kommt das ENSI zu einer jeweils schlechteren Bewertung des Kriteriums (Tabelle 17).

Kriterium 4.2: «Untertägige Erschliessung und Wasserhaltung»

Tabelle 18: Bewertungen der Nagra (N) und des ENSI (E) zum Kriterium 4.2: «Untertägige Erschliessung und Wasserhaltung» sowie der dazugehörigen Indikatoren. Die Bewertung der Kriterien setzt sich, wie im Kapitel 4 erläutert, aus den arithmetisch gemittelten Bewertungen der Indikatoren zusammen. *Der Bewertung des ENSI liegt im Unterschied zur Nagra der alternative Lagerperimeter HAA-ZNO-aL506-r zugrunde.

Kriterium / Indikator	Bewertungs-objekt		SMA-SR-OPA		SMA-ZNO-OPA		SMA-NL-OPA		SMA-JO-OPA		SMA-JS-OPA		SMA-ZNO-BD		SMA-NL-BD		SMA-JS-EFF		SMA-WLB-MGL		
	N	E	N	E	N	E	N	E	N	E	N	E	N	E	N	E	N	E	N	E	
4.2	Untertägige Erschliessung und Wasserhaltung		4.0	3.0	4.0	3.0	4.0	3.0	4.4	3.5	3.7	3.0	4.0	3.0	4.0	3.0	3.7	3.0	3.4	2.0	
48	Geotechnische und hydrogeologische Verhältnisse in überlagernden Gesteinsformationen	EG/LP	EG/LP	3.5	2.5	3.5	2.5	3.5	2.5	4.3	3.5	2.9	2.5	3.5	2.5	3.5	2.5	2.9	2.5	4.1	2.5
49	Natürliche Gasführung (im Wirtgestein)	WG/LP	WG	4.5	3.5	4.5	3.5	4.5	3.5	4.5	3.5	4.5	3.5	4.5	3.5	4.5	3.5	4.5	3.5	2.7	1.5

Kriterium / Indikator	Bewertungs-objekt		HAA-ZNO*		HAA-NL		HAA-JO		
	N	E	N	E	N	E	N	E	
4.2	Untertägige Erschliessung und Wasserhaltung		4.0	3.0	4.0	3.0	4.4	3.5	
48	Geotechnische und hydrogeologische Verhältnisse in überlagernden Gesteinsformationen	EG/LP	EG/LP	3.5	2.5	3.5	2.5	4.3	3.5
49	Natürliche Gasführung (im Wirtgestein)	WG/LP	WG	4.5	3.5	4.5	3.5	4.5	3.5

Kriterium/Merkmal/Indikator

- sehr günstig ($4 \leq x \leq 5$)
- günstig ($3 \leq x < 4$)
- bedingt günstig ($2 \leq x < 3$)
- ungünstig ($1 \leq x < 2$)
- ungenügend ($0 \leq x < 1$)

Das **Kriterium 4.2 «Untertägige Erschliessung und Wasserhaltung»** setzt sich aus zwei Indikatoren zusammen.

Bei der Bewertung des **Indikators 48 «Geotechnische und hydrogeologische Verhältnisse in überlagernden Gesteinsformationen»** stützt sich das ENSI auf die Prüfergebnisse seiner Experten (Kapitel 2.11 und ENSI 33/457) und auf die im NAB 14-72 dokumentierten standortspezifischen Baugrundmodelle und Gefährdungsbilder ab. Dabei werden die von der Nagra vorgeschlagenen Massnahmen zur Risikoverminderung der Hauptgefährdungen nicht berücksichtigt, weil die Bewertungen der Wirksamkeit dieser Massnahmen im NAB 14-50 (Bautechnische Risikoanalyse) selbst nur bedingt nachvollziehbar sind (Kapitel 2.11). Als Folge davon bewertet das ENSI den Indikator 48 für alle betrachteten Standortgebieten für SMA- und HAA-Lager ausser die Lagerperimeter SMA-JS-OPA und SMA-JS-EFF schlechter als die Nagra (Kapitel 6.1.4).

Bezüglich des **Indikators 49 «Natürliche Gasführung (im Wirtgestein)»** stellt das ENSI fest, dass die Bewertungen der Nagra für alle Lagerperimeter nicht mit den Angaben und Bewertungen in den Baugrundmodellen (NAB 14-72) übereinstimmen. Das ENSI ist mit den Bewertungen im NAB 14-72 einverstanden. Daraus resultiert für die Lagerperimeter der Nordschweiz die Bewertung «günstig». Für den SMA-Lagerperimeter Wellenberg ergibt sich die Bewertung «ungünstig», weil hier mit SUVA-Stufe 3 in den Baugrundmodellen (NAB 14-72) von der Nagra korrekt die eindeutigen Hinweise für Erdgas (Methan) aufgenommen wurden.

Fazit: Für das **Kriterium 4.2 «Untertägige Erschliessung und Wasserhaltung»** stimmt die Bewertung des ENSI für die beiden Lagerperimeter SMA-JS-OPA und SMA-JS-EFF mit derjenigen der Nagra überein. Für alle anderen Lagerperimeter kommt das ENSI zu einer schlechteren Bewertung des Kriteriums (Tabelle 18).

Für die **Kriteriengruppe 4 «Bautechnische Eignung»** stimmt die Bewertung des ENSI für den Lagerperimeter SMA-JO-OPA mit derjenigen der Nagra überein. Für die anderen Lagerperimeter kommt das ENSI zu schlechteren Bewertungen der Kriteriengruppe.

5.3.5 Gesamtbewertung

Alle Lagerperimeter erreichen in der Gesamtbewertung die Bewertungsstufe «geeignet» (Tabelle 19) und erfüllen damit die behördlichen Vorgaben (ENSI 33/075). Die Gesamtbewertungen des ENSI stimmen mit wenigen Ausnahmen mit derjenigen der Nagra überein. Für die Lagerperimeter in den Standortgebieten Zürich Nordost und Jura Ost kommt das ENSI sowohl für die HAA- als auch SMA-Lagerperimeter zu einer tieferen Bewertung («geeignet» anstelle von «sehr geeignet»).

Tabelle 19: Tabellarische Zusammenstellung der Bewertungen von Nagra (N) und ENSI (E) für die Kriteriengruppen und die dazugehörigen Kriterien sowie die Gesamtbewertung. *Der Bewertung des ENSI liegt im Unterschied zur Nagra der alternative Lagerperimeter HAA-ZNO-aL506-r zugrunde.

Kriteriengruppe / Kriterium	SMA-SR-OPA		SMA-ZNO-OPA		SMA-NL-OPA		SMA-JO-OPA		SMA-JS-OPA		SMA-ZNO-BD		SMA-NL-BD		SMA-JS-EFF		SMA-WLB-MGL		HAA-ZNO*		HAA-NL		HAA-JO	
	N	E	N	E	N	E	N	E	N	E	N	E	N	E	N	E	N	E	N	E	N	E	N	E
KG1 Eigenschaften des WG/EG	3.9	4.2	4.4	4.5	4.2	4.3	4.3	4.3	4.0	4.0	4.1	4.2	3.9	4.1	3.3	3.2	3.7	3.3	4.3	4.3	4.2	4.3	4.1	4.3
1.1 Räumliche Ausdehnung	3.3	3.5	4.3	4.5	3.3	4.0	4.1	4.0	2.9	2.5	4.3	4.5	3.3	4.0	2.9	2.5	3.8	4.0	4.0	4.0	3.5	4.0	3.8	4.0
1.2 Hydraulische Barrierenwirkung	3.7	4.5	4.5	4.5	4.6	4.5	4.2	4.5	4.2	4.5	4.4	4.5	4.5	4.5	4.0	4.2	4.1	2.5	4.5	4.5	4.6	4.5	3.9	4.5
1.3 Geochemische Bedingungen	4.3	4.3	4.3	4.3	4.3	4.3	4.3	4.3	4.3	4.3	4.3	4.2	4.3	4.2	3.6	3.3	3.6	3.5	4.3	4.3	4.3	4.3	4.3	4.3
1.4 Freisetzungspfade	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	3.4	3.7	3.4	3.7	2.7	2.7	3.2	3.1	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5
KG2 Langzeitstabilität	3.6	3.9	4.0	4.0	3.9	3.9	3.9	3.8	4.0	3.9	4.0	4.1	3.9	4.0	3.8	3.8	3.7	3.6	3.9	3.8	3.8	3.7	3.7	3.7
2.1 Beständigkeit der Standort- und Gesteinseigenschaften	3.7	4.2	4.2	4.2	4.2	4.2	4.2	4.2	4.0	3.8	4.2	4.2	4.1	4.2	3.3	3.2	3.3	2.8	4.1	4.2	3.8	3.8	3.7	3.8
2.2 Erosion	3.4	3.8	4.5	4.5	4.6	4.5	4.5	4.2	4.4	4.5	4.5	4.5	4.6	4.5	4.5	4.5	4.0	3.5	4.0	3.8	4.4	4.2	3.8	3.8
2.3 Lagerbedingte Einflüsse	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.8	3.5	3.8	3.2	3.5	3.3	3.8	3.5	3.3	3.5	3.3	3.5	3.3
2.4 Nutzungskonflikte	3.9	3.9	3.8	3.9	3.5	3.5	3.5	3.5	4.1	3.9	3.8	3.9	3.5	3.5	4.1	3.9	4.2	4.3	4.0	4.1	3.5	3.5	3.7	3.7
KG3 Zuverlässigkeit der geologischen Aussagen	4.1	4.3	4.4	4.3	4.3	4.3	4.4	4.3	4.2	4.2	3.7	3.5	3.7	3.5	3.3	3.3	2.9	2.8	4.4	4.3	4.2	4.2	4.2	4.2
3.1 Charakterisierbarkeit der Gesteine	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	3.6	3.0	3.6	3.0	2.8	3.0	3.3	3.0	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5
3.2 Explorierbarkeit der räumlichen Verhältnisse	4.1	4.0	4.1	4.0	4.1	4.0	4.3	4.0	4.0	4.0	3.2	3.0	3.2	3.0	3.2	3.0	1.8	2.0	4.2	4.0	4.1	4.0	4.3	4.0
3.3 Prognostizierbarkeit der Langzeitveränderungen	3.7	4.5	4.5	4.5	4.4	4.5	4.4	4.5	4.1	4.0	4.3	4.5	4.2	4.5	3.9	4.0	3.6	3.5	4.4	4.5	4.0	4.0	3.8	4.0
KG4 Bautechnische Eignung	4.1	2.8	3.8	2.8	3.2	2.8	3.9	3.0	3.6	2.8	3.8	2.8	3.4	2.8	3.8	2.8	3.5	2.3	3.8	2.8	3.2	2.8	4.1	3.0
4.1 Felsmechanische Eigenschaften und Bedingungen	4.1	2.5	3.5	2.5	2.3	2.5	3.4	2.5	3.4	2.5	3.5	2.5	2.8	2.5	3.9	2.5	3.5	2.5	3.5	2.5	2.4	2.5	3.7	2.5
4.2 Untertägige Erschliessung und Wasserhaltung	4.0	3.0	4.0	3.0	4.0	3.0	4.4	3.5	3.7	3.0	4.0	3.0	4.0	3.0	3.7	3.0	3.4	2.0	4.0	3.0	4.0	3.0	4.4	3.5
KG1-4 Gesamtbewertung	3.9	3.8	4.1	3.9	3.9	3.8	4.1	3.9	3.9	3.7	3.9	3.6	3.7	3.6	3.5	3.3	3.4	3.0	4.1	3.8	3.9	3.7	4.0	3.8

Kriterium/Merkmal/Indikator

Gesamtbewertung

-  sehr günstig (4 ≤ x ≤ 5)
-  günstig (3 ≤ x < 4)
-  bedingt günstig (2 ≤ x < 3)
-  ungünstig (1 ≤ x < 2)
-  ungenügend (0 ≤ x < 1)

-  sehr geeignet (4 ≤ x ≤ 5)
-  geeignet (3 ≤ x < 4)
-  bedingt geeignet (2 ≤ x < 3)
-  weniger geeignet (1 ≤ x < 2)



6 Sicherheitstechnischer Vergleich der geologischen Standortgebiete und vergleichende Gesamtbewertung

Gemäss Konzeptteil SGT (BFE 2011b) ist für den sicherheitstechnischen Vergleich der geologischen Standortgebiete bzw. Lagerperimeter in Etappe 2 SGT ein standardisiertes Vorgehen vorgegeben, das einerseits die Ergebnisse quantitativer Dosisberechnungen (Kapitel 5.2) und andererseits die qualitative Bewertung der 13 Kriterien zu Sicherheit und technischer Machbarkeit berücksichtigt (Kapitel 5.3). Ein Standortgebiet wird zurückgestellt, wenn es in der quantitativen provisorischen Sicherheitsanalyse das Schutzkriterium von 0.1 mSv/Jahr nicht erfüllt oder wenn es aufgrund der Dosisberechnungen eindeutig weniger geeignet ist. Dies ist gegeben, wenn das charakteristische Dosisintervall den Schwellenwert von 0.01 mSv/Jahr überschreitet und es nicht mit dem Dosisintervall desjenigen Standortgebiets mit dem kleinsten Dosismaximum im Referenzfall überlappt. Ausserdem erfolgt eine Zurückstellung wenn das Standortgebiet in der qualitativen Gesamtbewertung mit weniger als «geeignet» bewertet wird. Ein Standortgebiet kann zurückgestellt werden, falls eindeutige Nachteile gegenüber den anderen Standortgebieten festgestellt werden. Gemäss ENSI 33/154 hat die Nagra aufzuzeigen, wie die eindeutigen Nachteile erfasst, beurteilt und im Entscheid für den Vorschlag von Standortgebieten berücksichtigt werden.

Im Unterschied zur Nagra verzichtet das ENSI in seinem Vorgehen auf den Schritt zur Festlegung des prioritären Wirtgesteins (Abbildung 13), da aus Sicht des ENSI die Selektion der Indikatoren für die Ermittlung des prioritären Wirtgesteins einen Einfluss auf die Entscheidungsfindung (z. B. Nichtberücksichtigung des Platzangebots oder Berücksichtigung der Tiefenlage) haben kann (Kapitel 4.2). Entsprechend beurteilt das ENSI in diesem Auswahl-schritt alle wirtgesteinsspezifischen Lagerperimeter.

Für die Sicherheit und technische Machbarkeit sind folgende entscheidrelevante Merkmale massgebend: Wirksamkeit der geologischen Barriere (Kapitel 6.1.1), Langzeitstabilität der geologischen Barriere (Kapitel 6.1.2), Explorier- und Charakterisierbarkeit der geologischen Barriere im Standortgebiet (Kapitel 6.1.3) und bautechnische Machbarkeit eines Tiefenlagers unter Berücksichtigung der vorgeschlagenen Standortareale (Kapitel 6.1.4). Das ENSI überprüft die Auswahl und die Beurteilung der entscheidrelevanten Indikatoren, deren Bezug zu den entscheidrelevanten Merkmalen und die daraus abgeleiteten eindeutigen Nachteile. Insbesondere werden jene Indikatoren detailliert diskutiert, bei denen

- Abweichungen zur Bewertung der Nagra vorhanden sind,
- gleiche Bewertungen, aber abweichende Begründungen vorhanden sind und
- Unterschiede in den identifizierten eindeutigen Nachteilen bestehen.

Kapitel 6.2 fasst die Bewertungen und abgeleiteten eindeutigen Nachteile standortgebietspezifisch zusammen und diskutiert den Einfluss von alternativen Konzeptualisierungen und Parameterwerten auf die eindeutigen Nachteile. In Kapitel 6.3 wird die vergleichende Gesamtbewertung der Standortgebiete basierend auf den Ergebnissen der quantitativen Dosisberechnungen, der Gesamtbewertung der Standortgebiete bzw. Lagerperimeter und der Bewertung der entscheidrelevanten Merkmale vorgenommen. Aufgrund der vergleichenden Gesamtbewertung werden anschliessend Schlussfolgerungen für die Zurückstellung von Standortgebieten gezogen. In Kapitel 6.4 werden die im Sachplan (BFE 2011b) vorgegebenen Fragen zur Beurteilung des Einengungsvorschlags in Etappe 2 SGT beantwortet.

6.1 Identifikation eindeutiger Nachteile anhand entscheidrelevanter Merkmale und Indikatoren

Angaben der Nagra

Die Identifikation eindeutiger Nachteile erfolgt durch den Vergleich der verschiedenen geologischen Standortgebiete bzw. der zugehörigen Lagerperimeter anhand der vom ENSI vorgegebenen entscheidrelevanten Merkmale und der zugehörigen Indikatoren. Dazu wird für die entscheidrelevanten Merkmale und die zugehörigen Indikatoren eine Bewertung der geologischen Standortgebiete bzw. der zugehörigen Lagerperimeter durchgeführt, wozu die Bewertungen der Indikatoren verwendet werden, welche unverändert aus der

qualitativen Bewertung übernommen werden. Bei der Aggregation der Bewertungen werden bei den Merkmalen «Wirksamkeit der geologischen Barriere» und «Explorier- und Charakterisierbarkeit der geologischen Barriere im Standortgebiet» die Bewertungen der zugehörigen Indikatoren jeweils durch arithmetische Mittelung aggregiert, weil die entsprechenden Indikatoren kompensierbare Beiträge zum übergeordneten Merkmal leisten. Bei den Merkmalen «Langzeitstabilität der geologischen Barriere» und «Bautechnische Machbarkeit eines Tiefenlagers unter Berücksichtigung der vorgeschlagenen Standortareale» wird jeweils das Minimum der Bewertungen der zugehörigen Indikatoren übernommen, weil die zugehörigen Indikatoren nicht-kompensierbare Beiträge zum übergeordneten Merkmal leisten (NTB 14-01).

Zunächst werden anhand des direkten Vergleichs alle Hinweise auf eindeutige Nachteile ausgewiesen, und es wird dann argumentativ dargelegt, welche dieser Hinweise tatsächlich als eindeutige Nachteile eingestuft werden. Danach wird anhand alternativer Vergleichsmethoden geprüft, ob diese weitere Hinweise auf eindeutige Nachteile aufzeigen und ob diese gegebenenfalls als eindeutige Nachteile einzustufen sind. Ferner wird auch geprüft, ob alternative Annahmen bei der Abgrenzung der Lagerperimeter bzw. alternative Konzeptualisierungen der Rahmengesteine zu anderen Entscheiden führen würden (NTB 14-01).

Beurteilung des ENSI

Das ENSI hat das methodische Vorgehen der Nagra zur Identifikation eindeutiger Nachteile im Kapitel 4 geprüft. Die Bewertung der als entscheiderelevant betrachteten Indikatoren erfolgte in der qualitativen Bewertung (Kapitel 5.3). Das ENSI stellt fest, dass die Nagra die in ENSI 33/154 gestellten Anforderungen umgesetzt hat und kann der Vorgehensweise der Nagra bei der Auswahl der entscheiderelevanten Merkmale und der Identifikation der eindeutigen Nachteile weitgehend folgen. Abweichungen ergeben sich für die Indikatoren 29 («Auflockerungszone im Nahbereich der Untertagebauten») und 31 («Verhalten des Wirtgesteins bzgl. Gas»), welche das ENSI im Gegensatz zur Nagra zusätzlich als entscheiderelevant einstuft. Bei der Beurteilung des ENSI fließen diese Indikatoren zusätzlich in das entscheiderelevante Merkmal «Langzeitstabilität der geologischen Barriere» ein. Die Begründung für diese Ergänzungen erfolgt bei der Bewertung der entsprechenden entscheiderelevanten Indikatoren im Kapitel 6.1.2.

6.1.1 Entscheiderelevantes Merkmal «Wirksamkeit der geologischen Barriere»

Für die Wirksamkeit der geologischen Barriere ist es vorteilhaft (ENSI 33/154), wenn

- das Wirtgestein bzw. der einschlusswirksame Gebirgsbereich so beschaffen und ausgedehnt ist, dass die Radionuklide grösstenteils darin zurückgehalten werden,
- die hydraulische Durchlässigkeit zu einer geringen Wasserführung bzw. sehr langsamen Fließgeschwindigkeiten führt,
- die Transportpfade die Radionuklidfreisetzung erheblich verzögern,
- das Quellvermögen zu einer Selbstabdichtung von Rissen und Klüften führt,
- das Wirtgestein homogen und der einschlusswirksamen Gebirgsbereich mächtig ist.

Die Bewertungen seitens Nagra und ENSI des Merkmals und der dafür berücksichtigten Indikatoren und die sich daraus ergebenden eindeutigen Nachteile werden in Tabelle 20 zusammengefasst.

Tabelle 20: Tabellarische Zusammenstellung der Bewertungen von Nagra (N) und ENSI (E) für das entscheidrelevante Merkmal (a) «Wirksamkeit der geologischen Barriere» und die dazugehörigen Indikatoren (in der von der Nagra verwendeten Reihenfolge). *Der Bewertung des ENSI liegt im Unterschied zur Nagra der alternative Lagerperimeter HAA-ZNO-aL506-r zugrunde.

Entscheid-relevantes Merkmal / Entscheid-relevanter Indikator	SMA-SR-OPA		SMA-ZNO-OPA		SMA-NL-OPA		SMA-JO-OPA		SMA-JS-OPA		SMA-ZNO-BD		SMA-NL-BD		SMA-JS-EFF		SMA-WLB-MGL		HAA-ZNO*		HAA-NL		HAA-JO	
	N	E	N	E	N	E	N	E	N	E	N	E	N	E	N	E	N	E	N	E	N	E	N	E
a) Wirksamkeit der geologischen Barriere	4.4	4.4	4.5	4.5	4.5	4.5	4.4	4.4	4.3	4.0	3.7	4.0	3.8	4.0	2.8	2.5	3.3	3.1	4.5	4.5	4.5	4.5	4.4	4.4
9 Hydraulische Durchlässigkeit	4.3	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.3	4.5	4.3	4.5	3.7	3.5	3.7	2.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5
17 Art der Transportpfade und Ausbildung des Porenraums	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.3	4.5	4.3	4.5	3.3	2.5	3.1	2.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5
20 Transmissivität präferenzieller Freisetzungspfade	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.3	4.5	4.3	4.5	3.1	3.5	3.1	3.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5
22 Selbstabdichtungsvermögen	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.3	4.5	4.3	4.5	3.1	3.5	2.5	2.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5
18 Homogenität des Gesteinsaufbaus	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	2.5	3.5	2.5	3.5	2.5	2.5	2.7	2.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5
5 Mächtigkeit	3.5	3.5	4.5	4.5	4.5	4.5	3.5	3.5	2.5	0.5	4.1	4.5	4.5	4.5	2.5	0.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	3.5	3.5
19 Länge der massgebenden Freisetzungspfade	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5
16 Kolloide	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	2.5	2.5	2.5	2.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5

sehr günstig (4 ≤ x ≤ 5)
 günstig (3 ≤ x < 4)
 bedingt günstig (2 ≤ x < 3)
 ungünstig (1 ≤ x < 2)
 ungenügend (0 ≤ x < 1)
 eindeutiger Nachteil

Indikator 9: Hydraulische Durchlässigkeit

Angaben der Nagra

Bei der Festlegung der hydraulischen Durchlässigkeitswerte wird berücksichtigt, ob sich deren parametrische Ungewissheiten mit zukünftigen Untersuchungen in Etappe 3 SGT zuverlässig reduzieren lassen (NTB 14-01). Falls nicht, werden vorsichtige, die Ungewissheiten berücksichtigende Werte (d. h. im Falle der hydraulischen Durchlässigkeit die oberen Eckwerte) verwendet (NTB 14-01). Die Charakterisierung und Bewertung erfolgen primär für den massgebenden Fall für die Einengung (mFE) (NTB 14-01). Die hydraulischen Durchlässigkeiten entsprechen im massgebenden Fall für die Einengung (mFE) den Referenzwerten.

Die Bewertungsskala wurde in Etappe 2 SGT für das SMA-Lager verschärft (NTB 14-01), indem für das SMA-Lager der gleiche Masstab wie für das HAA-Lager angewendet wird, um eine bessere Differenzierung der Bewertungen zu erzielen und die Qualität des Opalinustons voll zum Tragen zu bringen (NAB 17-01, Frage 44). Bei der Bewertung der Lagerperimeter, welche sich auf das WG-ss als Bewertungsobjekt bezieht, werden auch die hydraulischen Gradienten und die tektonische Überprägung mitberücksichtigt (NTB 08-05; NTB 14-03; NTB 14-01).

Der Indikator «hydraulische Durchlässigkeit» wird in allen Standortgebieten für Opalinuston und 'Brauner Dogger' (TA-1) mit «sehr günstig» bewertet (NTB 14-01). Die Effinger Schichten (KMA-5) werden anhand der gemessenen Daten und unter Berücksichtigung der Erfahrungen mit Gesteinen mit Tonmineralgehalten im Bereich von 20 – 40 Gew.-% und der Ungewissheiten bezüglich des Einflusses von Diskontinuitäten als «güns-

tig» beurteilt (NTB 14-01). Bei einem Wert von 10^{-11} m/s und unter Berücksichtigung möglicher kleinerer spröde reaktiver Kluft- und Störungszonen fällt die Bewertung für den Indikator «Hydraulische Durchlässigkeit» für die Mergel-Formationen des Helvetikums ebenfalls «günstig» aus (NTB 14-01).

Daraus ergibt sich für das Standortgebiet Wellenberg im Vergleich mit den anderen geologischen Standortgebieten ein eindeutiger Nachteil, da der Opalinuston deutlich besser eingestuft wird als die Mergel-Formationen des Helvetikums und dieser Indikator für den Radionuklidrückhalt wichtig ist (NTB 14-01). Für das Standortgebiet Jura-Südfuss mit dem Wirtgestein Effinger Schichten liegt beim Indikator «Hydraulische Durchlässigkeit» wegen seiner ungünstigen Wirkung auf das Radionuklidrückhaltevermögen eine tiefere Bewertung gegenüber den Wirtgesteinen Opalinuston und 'Brauner Dogger' vor, die aber nicht als eindeutiger Nachteil eingestuft wird (NTB 14-01).

Beurteilung des ENSI

Das ENSI ist mit der Wahl des Bewertungsobjekts WG-ss einverstanden.

Das tonreiche Wirtgestein Opalinuston und die TA-1 innerhalb des 'Braunen Doggers' sind sehr homogen, weshalb aufgrund des bereits heute vorliegenden Standorts geringe hydraulische Durchlässigkeiten mit kleinen Bandbreiten hergeleitet werden. Eine noch genauere Eingrenzung ist kaum zu erwarten (die Bandbreiten liegen im Bereich der Ungewissheiten einzelner hydraulischer Tests).

Die grösseren Bandbreiten für die heterogeneren Wirtgesteine KMA-5 innerhalb der Effinger Schichten und die Mergel-Formationen des Helvetikums lassen sich erst wesentlich eingrenzen, wenn auf dem Niveau der Lagerebenen innerhalb des auszubrechenden Gesteinsvolumens umfangreiche und lateral kontinuierliche Untersuchungen durchgeführt werden, ohne das umliegende Wirtgestein zusätzlich zu schädigen. Da die Ungewissheiten in den Werten zur hydraulischen Durchlässigkeit durch zusätzlich Untersuchungen in Etappe 3 SGT nicht weiter reduziert werden können, geht das ENSI bei seiner Bewertung nicht von den Referenzwerten, sondern von den oberen Eckwerten aus.

Für das ENSI ist die von der Nagra formulierte Begründung zur Verschärfung der Bewertungsskala für das SMA-Lager nicht überzeugend. Die Qualität des Opalinustons sollte sich aus einer neutralen Bewertung ergeben, anstatt die Skala so zu wählen, dass andere Wirtgesteine gegenüber dem Opalinuston schlechter bewertet werden. Auch erscheint eine strengere Bewertungsskala für SMA-Lager vor dem Hintergrund des deutlich geringeren radiologischen Gefährdungspotenzials nicht gerechtfertigt. Das ENSI verwendet, daher abweichend von der Nagra die Bewertungsskalen aus Etappe 1 SGT.

Das ENSI bestätigt die Bewertungen der Nagra für die Lagerperimeter im Opalinuston (SMA und HAA) und in der TA-1 des 'Braunen Doggers'. Für diese tonreichen und im Vergleich zur KMA-5 der Effinger Schichten und den Mergel-Formationen des Helvetikums weniger heterogenen Gesteine sind die Bandbreiten klein und die Referenzwerte niedrig, sodass sich selbst bei Betrachtung der oberen Eckwerte «sehr günstige» Bewertungen ergeben.

Für die Gesteinsmatrix der KMA-5 der Effinger Schichten geht das ENSI wie die Nagra von einem oberen Eckwert der hydraulischen Durchlässigkeit senkrecht zur Schichtung von 10^{-11} m/s (Kapitel 3.1) und einer «günstigen» Bewertung aus. Für die Mergel-Formationen des Helvetikums am Wellenberg kommt das ENSI für einen oberen Eckwert von $5 \cdot 10^{-11}$ m/s (Kapitel 3.1.5) für den Indikator «hydraulische Durchlässigkeit» unter Berücksichtigung des dort angenommenen hydraulischen Gradienten von 0.4 (NTB 14-03; NTB 08-05) zu einer «bedingt günstigen» Bewertung. Dies wird vom ENSI vor dem Hintergrund der in Kapitel 3.1.5 ausgeführten Argumente (wenig wahrscheinlichen Vernetzung und unabhängigen Evidenzen der Langzeitisolation) als Schwäche, jedoch nicht als eindeutiger Nachteil angesehen.

Indikator 17: Art der Transportpfade und Ausbildung des Porenraums

Angaben der Nagra

Die Bewertung dieses Indikators bezieht sich auf das WG-ss, welches bei der Radionuklidfreisetzung den dominierenden Beitrag zur Barrierenwirkung beisteuert (NTB 14-01).

Aufgrund des ausgeprägten Selbstabdichtungsvermögens (hoher Tonmineralgehalt) und der kaum erhöhten Transmissivität allenfalls vorhandener Diskontinuitäten wird der Indikator «Art der Transportpfade und Ausbildung des Porenraums» für den Opalinuston (für beide Lagertypen) und den 'Braunen Dogger' (TA-1) in allen Standortgebieten als «sehr günstig» bewertet (NTB 14-01).

Die KMA-5 der Effinger Schichten ist voraussichtlich ein poröses Medium mit Diskontinuitäten, wobei mit wenig ausgeprägtem lokalisiertem Wasserfluss und günstigen Bedingungen für die Matrixdiffusion gerechnet wird. Daher wird dieser Indikator mit «günstig» bewertet (NTB 14-01). Für die Effinger Schichten im Standortgebiet Jura-Südfuss liegt beim Indikator «Art der Transportpfade und Ausbildung des Porenraums» wegen seiner ungünstigen Wirkung auf das Radionuklidrückhaltevermögen eine tiefere Bewertung gegenüber dem Opalinuston im selben Standortgebiet vor, die als eindeutiger Nachteil eingestuft wird (NTB 14-01). Die Mergel-Formationen des Helvetikums sind als geklüftetes Medium mit sehr geringdurchlässiger Matrix zu betrachten. Wie bei den Effinger Schichten ist mit wenig ausgeprägtem lokalisiertem Wasserfluss und günstigen Bedingungen für die Matrixdiffusion zu rechnen. Daher wird dieser Indikator mit knapp «günstig» bewertet (NTB 14-01). Das SMA-Standortgebiet Wellenberg weist bezüglich dieses nur knapp «günstig» bewerteten Indikators einen eindeutigen Nachteil gegenüber allen anderen Standortgebieten auf, da der Opalinuston deutlich besser eingestuft wird als die Mergel-Formationen des Helvetikums (NTB 14-01).

Beurteilung des ENSI

Das ENSI ist mit der Wahl des Bewertungsobjekts WG-ss einverstanden.

Das ENSI schliesst sich der «sehr günstigen» Bewertung des Indikators «Art der Transportpfade und Ausbildung des Porenraums» für den Opalinuston und den 'Braunen Dogger' (TA-1) an. Durch das ausgeprägte Selbstabdichtungsvermögen ist auch bei tektonischer Überprägung weder mit lokalem Wasserfluss noch mit ausgeprägtem Channeling zu rechnen (Kapitel 3.1.1).

Die seit Etappe 1 SGT zusätzlich durchgeführten Untersuchungen der Nagra haben gezeigt, dass innerhalb der Effinger Schichten auch im Bereich der Kalkmergelabfolgen einzelne Kalkbänke bzw. gering-mächtige Abfolgen solcher Bänke auftreten können und diesen mit den Lagerkammern nicht ausgewichen werden kann. In diesen Kalkbänken ist wegen des Sprödverhaltens langfristig die Entstehung wasserführender Systeme, ähnlich wie in den Kalkbankabfolgen, auch durch weitere Untersuchungen nicht auszuschliessen (der Indikator bewertet das Potenzial für hydraulisch aktive Trennflächen, nicht deren Existenz).

Im mFE ist die KMA-5 richtigerweise als mit Störungen durchsetztes Medium konzeptualisiert (NTB 14-03), welches ausgeprägtes Channeling und damit verbunden mässige Bedingungen für die Matrixdiffusion aufweisen kann. Auch gibt es deutliche Hinweise für eine schon heute existierende tektonische Überprägung des Lagerperimeters, der zwischen zwei grossen, nachgewiesenen tektonischen Strukturen liegt (Born-Engelberg- und Schönenwerd-Eppenbergs-Antiklinalen). Als weiteres Indiz für tektonische Überprägung kann die Anhäufung von Evaporiten der Trias im Untergrund angesehen werden (NAB 13-10; NAB 13-09). Das ENSI bewertet daher den Indikator «Art der Transportpfade und Ausbildung des Porenraums» für den mFE der Effinger Schichten nur als «bedingt günstig».

Für die Mergel-Formationen des Helvetikums zeigt sich in den lokal auftretenden Zuflussstellen (HSK 30/13; NTB 96-01) im Vergleich zu den für einen grösseren Gebirgsbereich berechneten sehr niedrigen hydraulischen Durchlässigkeiten die Existenz hydraulisch wirksamer Trennflächen, welche ausgeprägtes Channeling und mässige Bedingungen für die Matrixdiffusion aufweisen können. Das ENSI bewertet daher diesen Indikator für den mFE nur als «bedingt günstig».

Den Indikator «Art der Transportpfade und Ausbildung des Porenraums» bewertet das ENSI für das SMA-Standortgebiet Wellenberg und die Effinger Schichten im Standortgebiet Jura-Südfuss ungünstiger als die Nagra, weil der Stofftransport in diskreten Klüften gegenüber homogen-porösen Medien zu einem deutlich geringeren Radionuklidrückhalt führt (geringere Aufenthaltszeiten, kleinere Kontaktflächen zur Matrix). Da entsprechende Ungewissheiten bezüglich der hydraulisch wirksamen Klüfte in Etappe 3 SGT kaum reduzierbar sind, ist für beide Fälle der eindeutige Nachteil bzgl. des Indikators 17 («Art der Transportpfade und Ausbildung des Porenraums») gegenüber den Wirtgesteinen Opalinuston und 'Brauner Dogger' aus Sicht des ENSI belastbar. Am Wellenberg wurden lokal hydraulisch wirksame Trennflächen beobachtet (HSK 30/13; NTB 96-01; NTB 14-02-V), während es im Standortgebiet Jura-Südfuss deutliche Hinweise für eine schon heute existierende tektonische Überprägung des Lagerperimeters gibt (Kapitel 3.2).

Indikator 20: Transmissivität präferentieller Freisetzungspfade

Angaben der Nagra

Die Bewertungsskala für den Indikator «Transmissivität präferentieller Freisetzungspfade» bezieht sich auf die über die ganze Struktur (Diskontinuitäten) gemittelte Transmissivität einzelner transmissiver Elemente mit typischen Abständen von einigen Dekameter- bis einigen Hektometern, denen mit den Lagerkammern nicht ausgewichen werden kann (NTB 08-05; dies sind einlagerungsbestimmende und kleinere geologische Elemente, NTB 14-01). Die kleinräumige Klüftung des Wirtgesteins wird im Rahmen der Indikatoren «Hydraulische Durchlässigkeit» und «Art der Transportpfade und Ausbildung des Porenraums» berücksichtigt (NTB 08-05). Die Bewertungsskala bezieht sich auf das WG-ss (NTB 14-01) und wurde in Etappe 2 SGT für SMA-Lager verschärft (NTB 14-01): Für SMA-Lager wird derselbe Massstab wie für HAA-Lager angewendet, um eine bessere Differenzierung der Bewertungen zu erzielen (NAB 17-01, Frage 44). Im Vergleich zum Vorgehen bei der Auswahl des prioritären Wirtgesteins werden bei der Bewertung der Lagerperimeter auch die hydraulischen Gradienten und die tektonische Überprägung mitberücksichtigt (NTB 08-05; NTB 14-03).

Durch das ausgeprägte Selbstabdichtungsvermögen (hoher Tonmineralgehalt) und die kaum erhöhte Transmissivität allenfalls vorhandener Diskontinuitäten wird der Indikator «Transmissivität präferentieller Freisetzungspfade» für den Opalinuston und den 'Braunen Dogger' (TA-1) in allen Standortgebieten als «sehr günstig» bewertet (NTB 14-01).

In den Effinger Schichten (KMA-5) werden basierend auf den vorhandenen Messungen Transmissivitätswerte von deutlich weniger als 10^{-10} m²/s erwartet. Auch unter Berücksichtigung der erwarteten vertikalen bzw. subvertikalen Diskontinuitäten und der Erfahrungen bei Gesteinen mit ähnlichem Tonmineralgehalt wird der Indikator «Transmissivität präferentieller Freisetzungspfade» knapp «günstig» bewertet (NTB 14-01). Wegen der ungünstigen Wirkung auf das Radionuklidrückhaltevermögen (NTB 14-01) ergibt sich für die Effinger Schichten gegenüber dem Opalinuston ein eindeutiger Nachteil.

Die Untersuchungen am Wellenberg haben gezeigt, dass die transmissiven Elemente im Wirtgestein unterhalb der Dekompaktionszone nur unvollständig vernetzt sind, d. h. die effektiven Transmissivitäten der wasserführenden Systeme wahrscheinlich bedeutend geringer sind als in einzelnen Tests (NTB 14-02-VI). Bei der Konzeptualisierung der wasserführenden Systeme der Mergel-Formationen des Helvetikums wird davon ausgegangen, dass die gleichen Systeme, welche in der bis zu 600 m mächtigen Dekompaktionszone hydraulisch wirksam sind, auch in grösserer Tiefe diskrete Transportpfade darstellen, nur mit entsprechend geringeren Transmissivitäten (NTB 14-02-VI). Die Transmissivitäten der Mergel-Formationen des Helvetikums unterhalb der Dekompaktionszone sind in der Regel kleiner als 10^{-9} m²/s (NTB 14-01). Aus diesen Überlegungen ergibt sich eine knapp «günstige» Bewertung. Diese wird als eindeutiger Nachteil bewertet, da der Opalinuston in den anderen Standortgebieten für diesen Indikator deutlich besser eingestuft wird als die Mergel-Formationen des Helvetikums und dieser Indikator für den Radionuklidrückhalt wichtig ist (NTB 14-01).

Beurteilung des ENSI

Das ENSI ist mit dem von der Nagra vorgeschlagenen Bewertungsobjekt WG-ss einverstanden. Es hält jedoch die vorgeschlagene strengere Bewertungsskala für SMA-Lager vor dem Hintergrund des deutlich geringeren radiologischen Gefährdungspotenzials für überkonservativ und verwendet darum nach wie vor die Bewertungsskalen aus Etappe 1 SGT (ENSI 33/43). Für das ENSI ist nachvollziehbar, dass sich dieser Indikator auf grossräumig verbundene Freisetzungspfade bezieht und die Bedeutung einzelner, lokal gemessener Werte für die Bewertung dieses Indikators beschränkt ist.

Das ENSI schliesst sich den Bewertungen der Nagra für die Standortgebiete an. Im Einzelnen werden dabei abweichende Argumente herangezogen (ENSI 33/539).

Für die Mergel-Formationen des Helvetikums im Standortgebiet Wellenberg und für die Effinger Schichten im Standortgebiet Jura-Südfuss identifiziert das ENSI ebenso wie die Nagra jeweils einen eindeutigen Nachteil. In diesen Wirtgesteinen mit Tonmineralgehalten unter 40 Gew.-% im Gegensatz zu den tonreicheren Wirtgesteinen (OPA, TA-1 des 'Braunen Doggers') kann eine signifikante Transmissivität von Störungen aufgrund des geringeren Selbstabdichtungsvermögens zukünftig nicht ausgeschlossen werden.

Indikator 22: Selbstabdichtungsvermögen

Angaben der Nagra

Die Bewertung des Indikators stützt sich auf eine Kategorisierung mit hohem (Tonmineralgehalt > 40 Gew.-%), mässigem (Tonmineralgehalt 20 – 40 Gew.-%) und geringem (Tonmineralgehalt < 20 Gew.-%) Selbstabdichtungsvermögen. Die Kategorien werden den einzelnen lithologischen Einheiten der WG zugeordnet. Aufgrund seiner grossen Bedeutung sowohl für die Barrierenwirkung als auch für die Langzeitstabilität wird der Indikator bei den Merkmalen «Wirksamkeit der geologischen Barriere» und «Langzeitstabilität der geologischen Barriere» als entscheidend relevant eingestuft. Dadurch erhält dieser Indikator ein grösseres Gewicht. Das Bewertungsobjekt ist das WG-ss innerhalb des Lagerperimeters.

Für den Opalinuston besteht aufgrund des hohen Tonmineralgehalts ein ausgeprägtes Selbstabdichtungsvermögen. Auch für den 'Braunen Dogger' wird ein dem Opalinuston entsprechendes Selbstabdichtungsvermögen angenommen, so dass für beide Wirtgesteine eine «sehr günstige» Bewertung resultiert.

Das Selbstabdichtungsvermögen in den Effinger Schichten wird als deutlich weniger gut als im Opalinuston eingeschätzt, das WG-ss mit knapp «günstig» bewertet und damit ein eindeutiger Nachteil der Effinger Schichten gegenüber dem Opalinuston festgestellt.

Dank ihres Tonmineralgehalts besitzen die Mergel-Formationen des Helvetikums im Bereich der Tonmergelabfolgen ein gewisses Selbstabdichtungsvermögen, welches jedoch deutlich weniger ausgeprägt ist als im Opalinuston und auch etwas ungünstiger ist als dasjenige der Kalkmergelabfolgen der Effinger Schichten. Für das SMA-Standortgebiet Wellenberg wird der Indikator mit «bedingt günstig» bewertet. Die Bewertung wird im Vergleich mit dem Opalinuston als eindeutiger Nachteil eingestuft.

Für die HAA-Standortgebiete weist die Nagra aufgrund des für alle Standortgebiete vorgeschlagenen WG Opalinuston für keines der Standortgebiete einen eindeutigen Nachteil aus.

Beurteilung des ENSI

Das ENSI unterstützt das von der Nagra verwendete Bewertungsobjekt WG-ss und die von der Nagra vorgenommene Zuordnung des Indikators zu zwei entscheidend relevanten Merkmalen. Das ENSI hält fest, dass sich aufgrund dieser doppelten Gewichtung keine für das Zurückstellen von Standortgebieten entscheidenden Häufungen eindeutiger Nachteile ergeben. Da sich der Indikator auf den Anteil quellbarer Tonminerale abstützt, ist das ENSI auch mit dem Vorgehen der Nagra einverstanden, welche die Bewertung ohne Unterschiede zwischen Standortgebieten und Lagertypen vorgenommen hat.

Während Opalinuston und 'Brauner Dogger' (TA-1) hohe Tonmineralgehalte haben und sich kaum voneinander und zwischen den Standortgebieten unterscheiden (Bewertung: «sehr günstig»), fallen die Effinger Schichten aufgrund ihres internen Lagenbaus und der in den Kalkmergelabfolgen erhöhten Karbonatgehalte deutlich ab. In Bohrkernen aus den Effinger Schichten zeigen sich in den Kalkbänken häufig Risse (z. T. später mit Kalzit verheilt), die sich gegen die Kalkmergelbänke verjüngen und darin fehlen, was unterschiedliche Ausheilpotenziale anzeigt. Für die Effinger Schichten fällt daher die Bewertung des ENSI nur «günstig» aus. Ein eindeutiger Nachteil ergibt sich aus Sicht des ENSI daraus jedoch nicht, weil das selbstabdichtende Verhalten für die mergeligen Lagen der Effinger Schichten im Standortgebiet (bzw. in dessen Nähe) nachgewiesen worden ist.

Für die Mergel-Formationen des Helvetikums werden seitens der Nagra Tonmineralgehalte ausgewiesen, die höher als bei den Effinger Schichten sind. Aufgrund der in der geologischen Geschichte erreichten Temperaturen ist aber davon auszugehen, dass die Quellbarkeit der Tonminerale signifikant reduziert ist und entstehende Risse nur sehr bedingt ausheilen können. Daher bewertet das ENSI das Selbstabdichtungsvermögen der Mergel-Formationen des Helvetikums wie die Nagra als «bedingt günstig» und auch das ENSI stellt einen eindeutigen Nachteil im Vergleich zu den tonmineralreichsten Wirtgesteinen fest.

Für die HAA-Standortgebiete ergeben sich aus der Bewertung des ENSI und seinem Vergleich zwischen den Standortgebieten zu Indikator «Selbstabdichtungsvermögen» in Analogie zur Nagra keine eindeutigen Nachteile, da hier nur zwischen Standortgebieten mit sehr tonreichem Opalinuston verglichen wird.

Indikator 18: Homogenität des Gesteinsaufbaus

Angaben der Nagra

Der Indikator «Homogenität des Gesteinsaufbaus» bezieht sich auf Architekturelemente im Wirtgestein, die eine Mächtigkeit von einigen Metern und eine laterale Ausdehnung von Hunderten von Metern mit signifikant reduzierter Barrierenwirkung aufweisen. Solche Elemente schränken die Möglichkeiten zur vertikalen Platzierung der Lagerebene ein und wirken sich ungünstig auf die Länge der Freisetzungspfade sowie auf das Transportverhalten von Radionukliden im Wirtgestein bzw. im einschlusswirksamen Gebirgsbereich aus (NTB 08-05). Bewertet wird von der Nagra das Wirtgestein im Lagerperimeter (NTB 14-01), unabhängig vom Standortgebiet und Lagertyp.

Die Nagra bewertet den Indikator für den Opalinuston aufgrund fehlender Architekturelemente als «sehr günstig» (NTB 14-01). Der 'Braune Dogger' hat Architekturelemente, die mehrere Meter mächtig, über hunderte von Metern ausgedehnt sind und gegenüber dem umliegenden Gestein klar reduzierte Barriereigenschaften aufweisen. Die Effinger Schichten zeigen Architekturelemente, die mehrere Meter mächtig, über hunderte von Metern ausgedehnt sind und die gegenüber dem umliegenden Gestein eine klar erhöhte Wasserführung und klar reduzierte Barrierenwirkung aufweisen. Die Mergel-Formationen des Helvetikums haben aufgrund ihrer starken Verfaltung und Zerschierung einen homogenen Gesteinsaufbau. Architekturelemente mit gegenüber dem umliegenden Gestein klar reduzierten Barriereigenschaften werden eher nicht erwartet, aber die Möglichkeit von Fremdgesteinseinschlüssen ist zu beachten. Für diese drei Wirtgesteine erfolgt eine Bewertung als «bedingt günstig» (NTB 14-01). Unter einer alternativen Annahme bzgl. der «harten Bänke» der Sandkalkabfolgen im 'Braunen Dogger' kommt die Nagra mit «günstig» zusätzlich zur einer leicht besseren alternativen Bewertung (NTB 14-01). Aufgrund der vorhandenen Architekturelemente stellt die Nagra für die «bedingt günstig» bewerteten Wirtgesteine eindeutige Nachteile gegenüber dem Opalinuston fest.

Beurteilung des ENSI

Die lithologische Homogenität innerhalb des Wirtgesteins ist von grosser Bedeutung für die Langzeitsicherheit. Heterogenitäten, wenn vorhanden, müssen mit genügender Sicherheit in ihrer Geometrie erfasst und in ihrer Auswirkung auf die Radionuklid Ausbreitung eingeschätzt werden können. Das ENSI stimmt dem Bewertungsobjekt Wirtgestein zu.

Das ENSI hat bezüglich der Bewertungen mit Ausnahme derjenigen zum 'Braunen Dogger' keine Differenz zur Nagra. Die Lagerperimeter SMA-ZNO-BD und SMA-NL-BD werden durch das ENSI aufgrund einer differenzierteren Betrachtung der Sandkalkabfolgen als «günstig» beurteilt (Kapitel 5.3).

Gegenüber den SMA-Lagerperimetern des Opalinustons identifiziert das ENSI übereinstimmend mit der Nagra eindeutige Nachteile für alle Lagerperimeter mit den Wirtgesteinen 'Brauner Dogger', Effinger Schichten und Mergel-Formationen des Helvetikums aufgrund der darin vorhandenen Architekturelemente (NTB 14-01). Trotz der gegenüber der Nagra besseren Bewertung für den 'Braunen Dogger' liegt aus Sicht des ENSI weiterhin ein eindeutiger Nachteil gegenüber dem Wirtgestein Opalinuston vor, da in Bezug auf die Barrierenwirkung des 'Braunen Doggers' Ungewissheiten (z. B. Wasserführung der «harten Bänke») existieren, deren weitere Reduktion nicht zuverlässig erreicht werden kann.

Indikator 5: Mächtigkeit

Angaben der Nagra

Beim Indikator «Mächtigkeit» bezieht sich die qualitative Bewertung auf den nutzbaren einschlusswirksamen Gebirgsbereich (EG), d. h. hier werden diejenigen Beiträge der Rahmengesteine berücksichtigt, welche eine ausreichende Überdeckung aufweisen (kein Einfluss der Gesteinsdekompression) und trotz vorhandener «harter Bänke» als barriierenwirksam beurteilt werden. Dabei wird in den Standortgebieten Nördlich Lägern, Jura Ost und Jura-Südfuss unterschieden zwischen der Referenz-Konzeptualisierung und alternativen Konzeptualisierungen (NTB 14-01). Die Mindest- und verschärften Anforderungen an die Mächtigkeit des nutzbaren einschlusswirksamen Gebirgsbereichs werden weiterhin für alle Lagerperimeter erfüllt.

Im Standortgebiet Südranden können die oberen Rahmengesteine aufgrund der geringen Überdeckung ihre Barrierenwirkung nicht in vollem Umfang entfalten. In den Standortgebieten Jura Ost und Jura-Südfuss wird zusätzlich erwartet, dass die oberen Rahmengesteine im Vergleich zum Faziesraum Ost wegen des geringen bis fehlenden Tonmineralgehalts eher von schlechterer Qualität sind. Deshalb wird ihr Beitrag zur Mächtigkeit für die Bewertung im mFE vernachlässigt. Die Bewertung des Indikators «Mächtigkeit» fällt für die Lagerperimeter SMA-ZNO-OPA, SMA-ZNO-BD, SMA-NL-OPA und SMA-NL-BD «sehr günstig», in den Lagerperimetern SMA-SR-OPA und SMA-JO-OPA «günstig» und im Lagerperimeter SMA-JS-OPA «bedingt günstig» aus. Obwohl die Effinger Schichten im Lagerperimeter SMA-JS-EFF eine nutzbare Mächtigkeit von ca. 225 m aufweisen, wird aufgrund der Konzeptualisierung der Barrierenwirkung (Berücksichtigung der «harten Bänke» als potenzielle Wasserfliesspfade) die Wirksamkeit dieser Mächtigkeit reduziert (keine Rahmengesteine vorhanden) und als «bedingt günstig» eingestuft. Die Bewertung für den Lagerperimeter SMA-WLB-MGL fällt wegen der grossen Ausdehnung des Wirtgesteinsblocks «sehr günstig» aus. Die Bewertung des Indikators «Mächtigkeit» für die HAA-Lagerperimeter ist gleich wie für die entsprechenden SMA-Lagerperimeter, obschon die Lagerperimeter für das SMA- und HAA-Lager nicht deckungsgleich sind.

Die Nagra identifiziert hinsichtlich des Indikators «Mächtigkeit» nur für das Wirtgestein Opalinuston im Standortgebiet Jura-Südfuss aufgrund der klar geringeren Mächtigkeit im Vergleich mit den bestbewerteten Standortgebieten einen eindeutigen Nachteil.

Beurteilung des ENSI

Bei der Bewertung des Indikators Mächtigkeit werden die Rahmengesteine berücksichtigt. Die Nagra erfüllt damit entsprechende Anforderungen des ENSI (ENSI 33/075; ENSI 33/154). Das ENSI ist mit dem Bewertungsobjekt EG einverstanden.

Bei der Bewertung des Indikators «Mächtigkeit» ist die Einschätzung der Barrierenwirksamkeit der «harten Bänke» von entscheidender Bedeutung. Das ENSI verwendet für die Bewertung des Indikators analog zur Nagra die Referenzkonzeptualisierung des EG, womit die «harten Bänke» des 'Braunen Doggers' im Faziesraum Ost (Standortgebiete Südranden, Zürich Nordost und Nördlich Lägern) als barriierenwirksam angenommen werden. Um die vorhandenen Ungewissheiten hinsichtlich der Barrierenwirksamkeit der «harten Bänke» innerhalb der Wirtgesteine 'Brauner Dogger' und Effinger Schichten aufzuzeigen, bewertet das ENSI zusätzlich den mFE (ENSI 33/539).

Das ENSI stimmt den Bewertungen der Nagra mit Ausnahme der beiden Lagerperimeter SMA-JS-EFF und SMA-JS-OPA zu. Gemäss der geologischen Konzeptualisierung des ENSI auf Basis des aktuellen Kenntnisstandes in Etappe 2 SGT (neue Daten z. B. NAB 14-101; NAB 14-95; NAB 13-16; NAB 14-12) sowie der vertieften Neuinterpretation der Datengrundlage) sind die «harten Bänke» in den Effinger Schichten (Kapitel 3.1.3) sowohl im Referenzfall als auch im mFE als nicht barrierenwirksam zu betrachten, da die Ungewissheiten auch durch aufwändige zusätzliche Untersuchungen (Bohrungen, 3D-Seismik, Felslabor vor Ort etc.) nicht genügend zuverlässig reduziert werden können. Der nutzbare einschlusswirksame Gebirgsbereich reduziert sich somit im SMA-JS-EFF auf die KMA-5 mit 44 m Mächtigkeit. Folglich wird die Mindestanforderung aus Etappe 1 SGT von 100 m Mächtigkeit nicht erreicht und der Lagerperimeter SMA-JS-EFF seitens ENSI als «ungenügend» beurteilt. Mit seiner aktualisierten geologischen Konzeptualisierung in Etappe 2 SGT betrachtet das ENSI im Referenzfall die Barrierenwirkung der oberen Rahmengesteine im Faziesraum West abweichend zur Nagra als nicht barrierenwirksam (Kapitel 3.1.2), womit sich die Mächtigkeit des nutzbaren einschlusswirksamen Gebirgsbereichs für das Wirtgestein Opalinuston im Lagerperimeter SMA-JS-OPA auf 90 m reduziert (Kapitel 3.1.1). Die Mindestanforderungen aus Etappe 1 SGT werden somit auch für den Lagerperimeter SMA-JS-OPA nicht erfüllt und das ENSI beurteilt den Indikator als «ungenügend». Nach Auffassung des ENSI stellt das Nicht-Erreichen der Mindestanforderungen für den Indikator «Mächtigkeit» einen eindeutigen Nachteil für die im Standortgebiet Jura-Südfuss befindlichen Wirtgesteine Opalinuston und Effinger Schichten im Vergleich zu den anderen Standortgebieten dar.

Das ENSI folgt der Einschätzung der Nagra, dass im Standortgebiet Südranden infolge der relativ geringen Tiefenlage (unter Berücksichtigung der gesamten, von der Nagra ausgewiesenen Ungewissheiten) des SMA-Lagers und der dadurch anzunehmenden Gesteinsdekompaktion, die oberen Rahmengesteine des Opalinustons als nicht barrierenwirksam angesehen werden. Entsprechend beschränkt sich die Mächtigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs auf den Opalinuston sowie den Tonigen Lias. Dies wertet das ENSI als eindeutigen Nachteil des Lagerperimeters SMA-SR-OPA gegenüber anderen Lagerperimetern.

Im Vergleich dazu bieten die oberen Rahmengesteine im Standortgebiet Jura Ost grundsätzlich das Potenzial für eine Barrierenwirksamkeit, da sie unterhalb der Dekompaktionszone von 300 m u. T. liegen. Zwar werden sie derzeit nicht als barrierenwirksam angesehen, weil in der Fazies West die Äquivalente des 'Braunen Doggers' kalkreicher ausgeprägt sind als in der Fazies Ost. Es ist aber zu erwarten, dass die Ungewissheiten bezüglich der faziellen Ausprägung mit zusätzlichen Untersuchungen in Etappe 3 SGT reduziert werden können. Daher identifiziert das ENSI für diesen Indikator im Standortgebiet Jura Ost keinen eindeutigen Nachteil.

Indikator 19: Länge der massgebenden Freisetzungspfade

Angaben der Nagra

Der Indikator «Länge der massgebenden Freisetzungspfade» (in Etappe 1 SGT noch «Länge der Freisetzungspfade») bezieht sich in Etappe 2 SGT ausschliesslich auf die für die Barrierenwirkung massgebenden vertikalen Beiträge zur Transportpfadlänge. Ferner wurde in Etappe 2 SGT die Bewertungsskala angepasst (NAB 17-01, Frage 44). Das Bewertungsobjekt ist das WG-ss.

Im mFE und bei Platzierung der Lagerkammern in der Mitte des WG-ss werden die minimalen Transportpfadlängen durch die Schichtpaketmächtigkeiten bestimmt. Da ein Nachweis, dass die «harten Bänke» im 'Braunen Dogger' und in den Effinger Schichten keine erhöhte Wasserführung aufweisen, nicht zuverlässig möglich ist, wird die massgebende Länge der Freisetzungspfade in den verbleibenden tonreichen barrierenwirksamen Abfolgen bewertet. Die Referenzwerte für die Schichtpaketmächtigkeit aller Standortgebiete in der Nordschweiz finden sich im NTB 14-01. Die sich ergebenden minimalen Transportpfadlängen unter Berücksichtigung einer vereinfachten vertikalen Ausdehnung der SMA-Lagerkammern bzw. der HAA-Lagerstollen (20 m bzw. 5 m, inkl. Auflockerungszone) führen zu folgenden Bewertungen: Für alle geologischen Standortgebiete (SMA und HAA) mit den Wirtgesteinen Opalinuston und Mergel-Formationen des Helvetikums wird der Indikator «Länge der massgebenden Freisetzungspfade» als «sehr günstig», für diejenigen mit 'Braunem Dogger' und Effinger Schichten als «ungünstig» bewertet.

Zur Prüfung der Sensitivität der Einengungsentscheide werden für den 'Braunen Dogger' auch alternative konzeptuelle (günstigere) Annahmen zur Wasserführung in den «harten Bänken» der Rahmen- und Wirtgesteine geprüft. Weil auch bei günstigeren Annahmen zur Wasserführung in den «harten Bänken» die Lagerkammern in der tonreichen TA-1 angeordnet werden und der Freisetzungspfad nach oben gleich bleibt wie in der Konzeptualisierung für den mFE, führt dies ebenfalls zu einer «ungünstigen» Bewertung. Für die Effinger Schichten bestätigen die Resultate der Dosisberechnungen die «ungünstige» Bewertung.

Der 'Braune Dogger' in den Standortgebieten Zürich Nordost sowie Nördlich Lägern und die Effinger Schichten im Standortgebiet Jura-Südfuss weisen Schwächen bezüglich des Indikators «Länge des massgebenden Freisetzungspfades» auf, was jeweils als eindeutiger Nachteil gegenüber dem Opalinuston und den Mergel-Formationen des Helvetikums eingestuft wird.

Beurteilung des ENSI

Bei der Bewertung des Indikators «Länge der massgebenden Freisetzungspfade» wird davon ausgegangen, dass die «harten Bänke» nicht barrierenwirksam sind. Nach Ansicht des ENSI ist dieses Vorgehen sicherheitstechnisch gerechtfertigt, da auch mit weiteren Untersuchungen in Etappe 3 SGT die Barrierenwirksamkeit der «harten Bänke» nicht abschliessend geklärt werden kann. Somit wird die ungünstige Konzeptualisierung berücksichtigt (Kapitel 4). Die Anpassungen beim Bewertungsobjekt (neu: WG-ss, Etappe 1 SGT: EG) und bei der Bewertungsskala des Indikators «Länge der massgebenden Freisetzungspfade» sind für das ENSI nachvollziehbar und plausibel. Für die «Länge der massgebenden Freisetzungspfade» berücksichtigt die Nagra richtigerweise die Hälfte der Mächtigkeit des WG-ss und die Hälfte der vertikalen Ausdehnung der Lagerkammern bzw. Lagerstollen inkl. Auflockerungszone.

Das ENSI kommt für den Indikator «Länge des massgebenden Freisetzungspfades» zu einer mit der Nagra übereinstimmenden Bewertung für alle Wirtgesteine. Im Gegensatz zur Nagra berücksichtigt das ENSI zwar für die Mergel-Formationen des Helvetikums bei der Bemessung des Freisetzungspfades sowohl die Mergelabfolgen als auch die Kalkbankabfolgen. Obwohl diesen nicht ausgewichen werden kann, beurteilt das ENSI den Indikator 19 aber aufgrund der grossen Mächtigkeit des Wirtgesteins und weil die Kalkbänke als isolierte Schollen nicht zusammenhängend sind, ebenfalls als «sehr günstig». Unter Berücksichtigung der Ergebnisse schliesst sich das ENSI der Einschätzung der Nagra an und identifiziert eindeutige Nachteile für den 'Braunen Dogger' und die Effinger Schichten im Vergleich mit dem Opalinuston und den Mergel-Formationen des Helvetikums.

Indikator 16: Kolloide

Angaben der Nagra

Für den Indikator «Kolloide» beurteilt die Nagra gemäss Bewertungsskala aus Etappe 1 SGT (NTB 08-05) die chemische Stabilität der Kolloide im Porenwasser und die physikalische Filtration von Kolloiden im Wirtgestein (Bewertungsobjekt WG-ss). Die geringe Porengrösse, zusammen mit der vorteilhaften Porenstruktur (hohe Tortuosität), führt dazu, dass der Opalinuston und die tonreichsten Abfolgen des 'Braunen Doggers' als Kolloidfilter wirken. Der Indikator «Kolloide» wird deshalb jeweils mit «sehr günstig» bewertet (NTB 14-01). Kleinere Störungen und Klüfte, denen mit den Lagerkammern nicht ausgewichen werden kann und die als Fliesspfade für Kolloide dienen könnten, sind – im Unterschied zum Opalinuston – in den Kalkmergelabfolgen der Effinger Schichten und der Mergel-Formationen des Helvetikums nicht auszuschliessen. Eine Beeinträchtigung der Kolloidfiltration kann trotz Selbstabdichtung nicht ausgeschlossen werden. Der Indikator «Kolloide» wird deshalb weniger positiv bewertet als beim Opalinuston, nämlich «bedingt günstig» (NTB 14-01).

Die Schwäche der Wirtgesteine Effinger Schichten (Standortgebiet Jura-Südfuss) und Mergel-Formationen des Helvetikums (Standortgebiet Wellenberg) hinsichtlich der physikalischen Kolloidfiltration beurteilt die Nagra als eindeutigen Nachteil.

Beurteilung des ENSI

Das ENSI erachtet die Wahl des Bewertungsobjekt WG-ss für den Indikator Kolloide als zielführend. Die chemische Stabilität von Kolloiden ist aufgrund der erhöhten Ionenstärke (Kapitel 3.1) und der generell geringen Konzentration von niedrigmolekularer gelöster organischer Substanz im jeweiligen Porenwasser der Wirtgesteine gering (NAB 17-01, Frage 59). Demnach sind die Kolloidkonzentrationen in allen vorgeschlagenen Wirtgesteinen sehr klein. Die Poren in der Matrix aller Wirtgesteine sind zu klein, um einen Kolloidtransport zu ermöglichen. Daher bewertet das ENSI den Indikator aufgrund des Vorkommens von hydraulisch wirksamen Klüften bzw. Störungen, in denen Kolloide advektiv transportiert werden können.

Das ENSI kommt für den Indikator Kolloide zu einer mit der Nagra übereinstimmenden Bewertung für alle Wirtgesteine. Unter Berücksichtigung des Vorkommens von hydraulisch wirksamen Klüften bzw. Störungen schliesst sich das ENSI der Einschätzung der Nagra an und identifiziert eindeutige Nachteile für die Effinger Schichten im Standortgebiet Jura-Südfuss und für die Mergel-Formationen des Helvetikums im Standortgebiet Wellenberg im Vergleich mit den anderen Wirtgesteinen.

6.1.2 Entscheiderelevantes Merkmal «Langzeitstabilität der geologischen Barriere»

Für die Langzeitstabilität der geologischen Barriere ist es vorteilhaft (ENSI 33/154), wenn

- die Gebiete und Gesteine über den Betrachtungszeitraum die erforderliche Barrierenwirkung gewährleisten können,
- die Gesteine eine geringe Neigung zur Bildung neuer Wasserwegsamkeiten aufweisen und bei Deformation Risse, Klüfte und Störungen selbst abdichten,
- differenzielle Bewegungen innerhalb des Tiefenlagers unwahrscheinlich sind.

Die Bewertungen seitens Nagra und ENSI des Merkmals und der dafür berücksichtigten Indikatoren und die sich daraus ergebenden eindeutigen Nachteile werden in Tabelle 21 zusammengefasst. Im Unterschied zur Nagra hat das ENSI zusätzlich die Indikatoren 29 «Auflockerungszone im Nahbereich der Untertagebauten» und 31 «Verhalten des Wirtgesteins bzgl. Gas» als entscheiderelevante Indikatoren berücksichtigt.

Tabelle 21: Tabellarische Zusammenstellung der Bewertungen von Nagra (N) und ENSI (E) für das entscheidungsrelevante Merkmal (b) «Langzeitstabilität der geologischen Barriere» und die dazugehörigen Indikatoren (in der von der Nagra verwendeten Reihenfolge. Die Nagra bewertet Indikator 29 und 31 nicht als entscheidungsrelevant). *Der Bewertung des ENSI liegt im Unterschied zur Nagra der alternative Lagerperimeter HAA-ZNO-aL506-r zugrunde.

Entscheidungsrelevantes Merkmal / Entscheidungsrelevanter Indikator	SMA-SR-OPA		SMA-ZNO-OPA		SMA-NL-OPA		SMA-JO-OPA		SMA-JS-OPA		SMA-ZNO-BD		SMA-NL-BD		SMA-JS-EFF		SMA-WLB-MGL		HAA-ZNO*		HAA-NL		HAA-JO	
	N	E	N	E	N	E	N	E	N	E	N	E	N	E	N	E	N	E	N	E	N	E	N	E
b) Langzeitstabilität der geologischen Barriere	2.5	2.5	3.7	2.5	3.7	2.5	3.7	2.5	3.7	2.5	3.7	3.5	3.7	3.5	2.5	2.5	2.5	2.5	3.5	2.5	3.5	2.5	3.1	2.5
23 Modellvorstellungen zur Langzeitentwicklung (Geodynamik und Neotektonik)	2.9	4.5	4.5	4.5	4.3	4.5	4.3	4.5	3.7	3.5	4.5	4.5	4.3	4.5	3.7	3.5	2.9	2.5	4.3	4.5	3.5	3.5	3.1	3.5
22 Selbstabdichtungsvermögen	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.3	4.5	4.3	4.5	3.1	3.5	2.5	2.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5
27 Potenzial zur Bildung neuer Wasserwegsamkeiten (Verkarstung)	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.3	4.5	4.3	4.5	2.5	2.5	4.3	3.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5
28 Erosion im Betrachtungszeitraum	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	3.5	3.5	4.3	4.5	4.3	4.5	4.3	4.5
29 Auflockerungszone im Nahbereich der Untertagebauten	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	4.3	3.5	4.3	3.5	4.3	3.5
3 Tiefenlage unter lokaler Erosionsbasis im Hinblick auf die Bildung neuer Rinnen	3.1	3.5	4.5	4.5	4.7	4.5	4.5	3.5	4.5	4.5	4.7	4.5	4.5	4.5	4.1	4.5	4.1	2.5	4.1	3.5	4.7	4.5	3.1	3.5
2 Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf Gesteins-Dekompression	2.7	4.5	4.5	4.5	4.7	4.5	4.1	4.5	4.1	4.5	4.5	4.5	4.7	4.5	4.3	4.5	4.1	2.5	4.5	4.5	4.7	4.5	3.1	4.5
4 Tiefenlage unter Fels im Hinblick auf glaziale Tiefenerosion	2.5	3.5	4.5	4.5	4.7	4.5	4.5	4.5	4.3	4.5	4.5	4.5	4.7	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	3.5	3.5	4.3	3.5	4.1	3.5
24 Seismizität	3.7	3.5	3.7	3.5	3.7	3.5	3.7	3.5	3.7	3.5	3.7	3.5	3.7	3.5	3.7	3.5	2.7	2.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5
31 Verhalten des Wirtgesteins bzgl. Gas	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	3.5	2.5	3.5	3.1	3.5	3.3	4.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5

sehr günstig ($4 \leq x \leq 5$)
 günstig ($3 \leq x < 4$)
 bedingt günstig ($2 \leq x < 3$)
 ungünstig ($1 \leq x < 2$)
 ungenügend ($0 \leq x < 1$)
 eindeutiger Nachteil

Indikator 23: Modellvorstellungen zur Langzeitentwicklung (Geodynamik, Neotektonik; weitere Prozesse)

Angaben der Nagra

Der Indikator beurteilt die Prognostizierbarkeit von kritischen Langzeitveränderungen. Die Bewertung des Aspekts «Geodynamik und Neotektonik» berücksichtigt das tektonische Regime und die jüngste tektonische Entwicklung der Region sowie Hinweise zu aktueller Deformation (rezente Horizontal- und Vertikalbewegungen) im Lichte des rezenten tektonischen Spannungsfelds und der Seismizität. Im Unterschied zu Etappe 1 SGT bezieht sich der Indikator neben der Geodynamik auch auf weitere Prozesse, insbesondere auf die Entstehung von Durchbruchrinnen (NTB 14-02-III). Bewertungsobjekt ist der einschlusswirksame Gebirgsbereich innerhalb des Lagerperimeters (NTB 14-01).

Die Gliederung des Grossraums der Standortgebiete in der Nordschweiz in Tafeljura, Vorfaltenzone und Subjurassische Zone führt zu folgenden Bewertungen:

Die SMA-Standortgebiete Südranden und Zürich Nordost (Tafeljura) werden bzgl. Geodynamik und Neotektonik als «sehr günstig» bewertet. Im Standortgebiet Südranden wird jedoch der östliche Teil des Standortgebiets durch die im Rahmen der 2D-Seismik nachgewiesene Neuhauserwald-Rinne in zwei Teile getrennt. Das SMA-Standortgebiet Südranden erhält daher gesamthaft eine «bedingt günstige» Bewertung und weist eine Schwäche auf. Diese wird im Vergleich mit den anderen Nordschweizer SMA-Standortgebieten als eindeutiger Nachteil eingestuft. Für das SMA-Standortgebiet Zürich Nordost wird die Bildung einer Durchbruchsrinne für möglich angesehen, diese kann jedoch das Lager wegen der grossen Tiefenlage nicht beeinträchtigen, so dass eine «sehr günstige» Bewertung verbleibt.

Die SMA-Standortgebiete Nördlich Lägern (Ostteil) und Jura Ost (beide in der Vorfaltenzone) weisen intern zwar keine grösseren Deformationsstrukturen auf, bei zukünftig fortschreitender alpiner Kollisionstektonik könnte die Vorfaltenzone im SMA-Betrachtungszeitraum mässig beansprucht werden. Unter Berücksichtigung des SMA-Betrachtungszeitraums werden die beiden Standortgebiete bezüglich Geodynamik und Neotektonik trotzdem als «sehr günstig» bewertet. Die Bildung von Durchbruchsrinnen wird im SMA-Standortgebiet Nördlich Lägern für möglich gehalten, eine solche kann jedoch das Lager wegen der grossen Tiefenlage nicht beeinträchtigen, so dass insgesamt eine «sehr günstige» Bewertung resultiert. Für das SMA-Standortgebiet Jura Ost wird für den SMA-Betrachtungszeitraum die Bildung einer Durchbruchsrinne praktisch ausgeschlossen und eine insgesamt «sehr günstige» Bewertung bestätigt.

Das SMA-Standortgebiet Jura-Südfuss (Subjurassische Zone) wurde bereits während der Entstehung des Faltenjuras tektonisch intensiver überprägt als der Bereich der Vorfaltenzone. Bei zukünftig fortschreitender alpiner Kollisionstektonik könnte die subjurassische Zone weiter mässig beansprucht werden; unter Berücksichtigung des SMA-Betrachtungszeitraums wird das Standortgebiet Jura-Südfuss bezüglich Geodynamik und Neotektonik als «günstig» bewertet. Die Bildung einer Durchbruchsrinne wird als sehr unwahrscheinlich angenommen und zudem ist die Tiefenlage des Wirtgesteins vergleichsweise gross. Dies führt zu keiner Änderung der genannten Bewertung.

Alle im Indikator angesprochenen Aspekte werden für das SMA-Standortgebiet Wellenberg aufgrund der alpinen Lage, des Erosionspotenzials, der zukünftigen Vergletscherungen und der tektonischen Situation im Vergleich mit den Standortgebieten in der Nordschweiz als «bedingt günstig» eingestuft und diese Schwäche wird als eindeutiger Nachteil angesehen.

Die HAA-Standortgebiete liegen im Tafeljura (Zürich Nordost) und in der Vorfaltenzone (Nördlich Lägern und Jura Ost). Für den Tafeljura wird auch im HAA-Betrachtungszeitraum keine signifikante Deformation erwartet, so dass das HAA-Standortgebiet Zürich Nordost bezüglich Geodynamik und Neotektonik als «sehr günstig» bewertet wird. Eine Rinnenbildung («weitere Prozesse») kann nicht ausgeschlossen werden, eine solche Rinne kann jedoch das Lager wegen der grossen Tiefenlage voraussichtlich nicht beeinträchtigen. Insgesamt resultiert für das Standortgebiet Zürich Nordost eine «sehr günstige» Bewertung.

Die Vorfaltenzone liegt bereits heute im Einflussbereich der alpinen Kollisionstektonik und ist generell stärker deformiert als der Tafeljura. Die HAA-Standortgebiete Nördlich Lägern (Ostteil) und Jura Ost weisen zwar intern keine grösseren Deformationsstrukturen auf, bei zukünftig fortschreitender alpiner Kollisionstektonik könnte jedoch die Vorfaltenzone im HAA-Betrachtungszeitraum mässig beansprucht werden, so dass die beiden Standortgebiete bezüglich Geodynamik und Neotektonik als «günstig» bewertet werden.

Eine Rinnenbildung kann im HAA-Standortgebiet Nördlich Lägern nicht ausgeschlossen werden, eine solche Rinne kann jedoch das Lager wegen der grossen Tiefenlage voraussichtlich nicht beeinträchtigen, womit eine insgesamt «günstige» Bewertung verbleibt. Für Standortgebiet Jura Ost wird die Bildung einer Durchbruchsrinne wegen der günstigen Lage des Lagerperimeters bezüglich Vergletscherung in einer Million Jahre als unwahrscheinlich eingestuft, kann aber längerfristig nicht vollständig ausgeschlossen werden. Für beide Standortgebiete resultiert daraus insgesamt eine «günstige» Bewertung und im Vergleich zum «sehr günstig» bewerteten Standortgebiet Zürich Nordost kein eindeutiger Nachteil.

Beurteilung des ENSI

Das ENSI bewertet die von der Nagra aufgestellte Dreiteilung in Tafeljura, Vorfaltenzone und Subjurassische Zone als grundsätzlich sinnvoll. Ohne Berücksichtigung «weiterer Prozesse» resultiert seitens ENSI für das SMA-Standortgebiet Südranden eine «sehr günstige» Bewertung (keine Berücksichtigung der Durchbruchsrinne) und, im Unterschied zur Nagra, kein eindeutiger Nachteil gegenüber den anderen Nordschweizer SMA-Standortgebieten. Für das SMA-Standortgebiet Zürich Nordost ist das ENSI mit der Bewertung der Nagra und deren Begründung einverstanden.

Die SMA-Standortgebiete Nördlich Lägern und Jura Ost (Vorfaltenzone) zeigen zwischen den gebietsbegrenzenden Störungssystemen relativ ruhig gelagerte Schichten. Aus Sicht des ENSI und seiner Experten wäre möglicherweise eine weitere Feinabstufung möglich, da das Standortgebiet Nördlich Lägern stärker als das Standortgebiet Jura Ost von kleineren Strukturelementen gekennzeichnet ist (EGT 2016; ENSI 33/470). Allerdings ist die Datenlage auf Basis der 2D-Seismik beschränkt und der Unterschied aus Sicht des ENSI zurzeit nicht belastbar. Das ENSI beurteilt die beiden Standortgebiete wie die Nagra als «sehr günstig», die Ungewissheiten können anhand zusätzlicher Untersuchungen in Etappe 3 SGT reduziert werden und der Betrachtungszeitraum von 10^5 Jahren wird die Modellvorstellungen nur wenig verändern.

Für das SMA-Standortgebiet Jura-Südfuss (Subjurassische Zone) sind aufgrund der neuen 2D-seismischen Linien der Nagra zusätzliche regionale Störungszonen eingeführt worden (einschliesslich daran anschliessender zu meidender tektonischer Zonen). Das ENSI ist mit dieser tektonischen Beschreibung des Gebietes einverstanden und kommt ebenfalls zu einer «günstigen» Bewertung für das Standortgebiet Jura-Südfuss (in Etappe 3 SGT verringerbare Ungewissheiten, begrenzter Betrachtungszeitraum). Es ergibt sich daraus kein eindeutiger Nachteil, da Unterschiede zwischen den SMA-Standortgebieten im Tafeljura und der Subjurassischen Zone durch 3D-seismische Erhebungen belastbar quantifiziert werden können.

Die von der Nagra ausgewiesene Schwäche bezüglich dieses Indikators im SMA-Standortgebiet Wellenberg wird auch vom ENSI bezüglich der Aspekte Geodynamik (beobachtete erhöhte Hebungsraten und -gradienten) und Neotektonik (erhöhte Seismizität) als eindeutiger und nicht durch weitere Untersuchungen reduzierbarer Nachteil gegenüber den Nordschweizer SMA-Standortgebieten angesehen.

Für das HAA-Standortgebiet Zürich Nordost ergibt sich auch für das ENSI eine «sehr günstige» Bewertung, da davon auszugehen ist, dass die sehr günstigen Randbedingungen bzgl. Geodynamik und Neotektonik über den längeren Betrachtungszeitraum wenig zusätzliche tektonische Zergliederung verursachen werden.

Die in der Vorfaltenzone liegenden HAA-Standortgebiete Nördlich Lägern und Jura Ost sind auf einen Betrachtungszeitraum von einer Million Jahre kritischer zu betrachten, da im gegenwärtigen Spannungsfeld die vorhandenen regionalen Störungen reaktiviert werden könnten (ENSI 33/470). Das ENSI bewertet beide Standortgebiete als «günstig». Aus dem Vergleich der HAA-Standortgebiete ergeben sich auch für das ENSI keine eindeutigen Nachteile.

Indikator 22: Selbstabdichtungsvermögen

Eine Gegenüberstellung der Beurteilungen von Nagra und ENSI und die daraus abgeleiteten eindeutigen Nachteile erfolgt in Kapitel 6.1.1. Die dort dargestellten Bewertungen und identifizierten eindeutigen Nachteile sind auch für das entscheidungsrelevante Merkmal «Langzeitstabilität der geologischen Barriere» gültig.

Indikator 27: Potenzial zur Bildung neuer Wasserwegsamkeiten (Verkarstung)

Angaben der Nagra

Mit dem Indikator «Potenzial zur Bildung neuer Wasserwegsamkeiten (Verkarstung)» werden Lösungsvorgänge in karbonathaltigen Gesteinen beurteilt. Bewertungsobjekt ist das Wirtgestein.

Infolge des geringen Karbonatgehalts des Opalinustons und der Abwesenheit karbonatreicher Schichten ist eine Verkarstung ausgeschlossen. Der Indikator wird daher als «sehr günstig» bewertet.

Die Bildung neuer Wasserwegsamkeiten durch Verkarstung ist im 'Braunen Dogger' nicht bekannt und aufgrund des lithologischen Gesamtaufbaus und der mineralogischen Zusammensetzung nicht zu erwarten. Der Indikator wird daher mit «sehr günstig» bewertet.

Die für die Bewertung massgebenden Kalkbankabfolgen in den Effinger Schichten haben ein nicht vernachlässigbares Potenzial zur Verkarstung (rezenter Karst im Faltenjura, hypogener Karst im Gebiet des Jura-Südfuss möglich). Die Bildung neuer Wasserwegsamkeiten in den Effinger Schichten durch Verkarstung ist daher nicht auszuschliessen. Deshalb wird der Indikator als «bedingt günstig» eingestuft und dem Indikator ein eindeutiger Nachteil für die Effinger Schichten gegenüber dem Opalinuston zugeordnet.

Für die Mergel-Formationen des Helvetikums wird aufgrund des lithologischen Gesamtaufbaus bzw. der Zerscherung der Kalkbänke keine Verkarstung erwartet. Trotz teilweise grosser hydraulischer Gradienten, gibt es keine Hinweise auf eine Verkarstung. Daraus ergibt sich für diesen Indikator eine «sehr günstige» Bewertung.

Beurteilung des ENSI

Das ENSI ist mit dem von der Nagra verwendeten Bewertungsobjekt (WG) und mit der wirtgesteinsspezifischen Beurteilung des Indikators Potenzial zur Bildung neuer Wasserwegsamkeiten (Verkarstung) mit Ausnahme des Standortgebiets Wellenberg einverstanden.

Das ENSI folgt der Argumentation der Nagra bezüglich der in Opalinuston abwesenden und im 'Braunen Dogger' kaum zu erwartenden Verkarstungsmöglichkeit (mittlere Karbonatgehalte < 20 bzw. ca. 30 Gew.-%) und der sich daraus ergebenden «sehr günstigen» Bewertung.

Für die Effinger Schichten im SMA-Standortgebiet Jura-Südfuss (mittlerer Karbonatgehalt > 65 Gew.-%) identifiziert das ENSI wie die Nagra einen eindeutigen Nachteil. Unabhängig von weiteren Erkundungsarbeiten wird bezüglich des Verkarstungspotenzials der Effinger Schichten aufgrund der erhöhten Karbonatanteile immer eine erhöhte Ungewissheit bestehen bleiben.

Innerhalb der Mergel-Formationen des Helvetikums (mittlerer Karbonatgehalt ca. 50 Gew.-%) sind verkarstbare Anteile vorhanden, für die durch die intensive tektonische Zerscherung des Gesteins angenommen wird, dass sie hydraulisch entkoppelt sind. Für das Standortgebiet Wellenberg haben die Untersuchungen gezeigt, dass der Wirtgesteinskörper über längere Zeiträume hydraulisch undurchlässig geblieben ist. Diese hydraulische Eigenschaft kann über den Betrachtungszeitraum durch tektonische Bewegungen, flächenhafte und glaziale Erosion beeinträchtigt werden, so dass das ENSI das «Potenzial zur Bildung neuer Wasserwegsamkeiten» nur als «günstig» bewertet. Angesichts des beschränkten SMA-Betrachtungszeitraums ergibt sich für das ENSI daraus kein eindeutiger Nachteil.

Indikator 28: Erosion im Betrachtungszeitraum

Angaben der Nagra

Der Indikator «Erosion im Betrachtungszeitraum» berücksichtigt die grossräumigen Hebungsdaten. Er dient der Beurteilung der Auswirkungen von flächenhafter Erosion auf die Langzeitsicherheit, wie beispielweise die Freilegung des Tiefenlagers aufgrund langfristiger Hebung/Erosion (NTB 08-05). Bewertungsobjekt ist der einschlusswirksame Gebirgsbereich innerhalb des Lagerperimeters (NTB 14-01).

Für die Lagerperimeter in der Nordschweiz ergibt sich generell die Bewertung «sehr günstig» (NTB 14-01). Aus dieser übereinstimmenden Indikatorbewertung resultiert kein eindeutiger Nachteil für die Standortgebiete der Nordschweiz. Die erhöhten langfristigen Hebungs-/Erosionsraten im Alpenraum führen zu einer vergleichsweise tieferen Bewertung des Indikators mit «günstig» für den Lagerperimeter SMA-WLB-MGL. Dies wird nicht als eindeutiger Nachteil eingestuft, da im Standortgebiet Wellenberg grundsätzlich die Möglichkeit besteht, die Lagerkammern in grosser Tiefe anzuordnen und so vor den langfristigen Auswirkungen der Erosion zu schützen (NTB 14-01).

Beurteilung des ENSI

Das ENSI ist einverstanden, dass bei der Bewertung des Indikators die gesamte geologische Situation im Lagerperimeter betrachtet wird (das Bewertungsobjekt EG ist hier mit dem gesamten stratigraphischen Profil gleichzusetzen).

Im Vergleich mit den Lagerperimetern der Nordschweiz identifiziert das ENSI für den Lagerperimeter SMA-WLB-MGL aufgrund der um eine Stufe schlechteren Bewertung des Indikators eine Schwäche. Ein eindeutiger Nachteil lässt sich analog zur Argumentation der Nagra, aufgrund der bestehenden Ungewissheiten und der Möglichkeit die Lagerebenen in grösseren Tiefen anordnen zu können, nicht ableiten.

Indikator 29: Auflockerungszone im Nahbereich der Untertagebauten

Angaben der Nagra

Mit dem Indikator «Auflockerungszone im Nahbereich der Untertagebauten» werden von der Nagra die Transporteigenschaften im Nahbereich der Lagerkammern im Hinblick auf die Langzeitsicherheit bewertet. Dabei werden die Ausdehnung der durch den Ausbruch gestörten Gebirgsbereiche um die Lagerkammer herum (Auflockerungszone, AUZ), das Selbstabdichtungsvermögens in der AUZ und die Erfolgsaussichten für baulichen Massnahmen zum Ausräumen/Unterbruch der AUZ in Schlüsselzonen berücksichtigt. Als «sehr günstig» wird eine Situation eingestuft, in der die AUZ keinen nennenswerten Einfluss auf die Langzeitsicherheit hat. Eine Situation wird als «ungünstig» bewertet, bei der die AUZ den Radionuklidtransport massgeblich beeinflusst (NTB 08-05). Der Indikator 29 wird als nicht entscheiderelevanter Indikator eingestuft, da die Beeinträchtigung des Rückhaltevermögens durch die AUZ mit technischen Massnahmen kontrolliert werden kann. Bei der Bewertung des Indikators 29 wird nur das WG-ss berücksichtigt. Der Indikator 29 wird für die SMA-Standortgebiete Südanden, Zürich Nordost, Nördlich Lägern, Jura Ost und Jura-Südfuss als «günstig», für die HAA-Standortgebiete Zürich Nordost, Nördlich Lägern und Jura Ost als «sehr günstig» bewertet (NTB 14-01; NAB 16-41).

Im Rahmen der Nachforderung des ENSI (ENSI 33/476) hat die Nagra bei der Beurteilung des Nahfeldverhaltens der BE/HAA-Lagerstollen die Bedingungen an der Stollenkontur bzw. in der AUZ sowie den Einfluss des Ausbruchs der Lagerstollen auf die Eigenschaften des direkt umgebenden Wirtgesteins berücksichtigt (NAB 16-42). Ungünstige Bedingungen im stollennahen Bereich des Wirtgesteins (BE/HAA-Lagerstollen) können zu ungünstigen Randbedingungen für die Selbstabdichtung des Opalinustons in der AUZ und damit zu einer erhöhten Wasserwegsamkeit längs der Lagerstollen führen (NAB 16-42). Eine kompaktierte Bentonitverfüllung trägt langfristig zu günstigen mechanischen Bedingungen im Nahfeld der BE/HAA-Lagerstollen bei. Das Quellvermögen von Bentonit unterstützt die Selbstabdichtung in der AUZ (NAB 16-42).

Im sicherheitstechnischen Vergleich (NAB 16-41, Kapitel 7) wird u. a. der Einfluss der Tiefe und der geotechnischen Eigenschaften des Gebirges auf mögliche Veränderungen im Konturnahen Wirtgestein (AUZ) berücksichtigt, welche je nach Ausbildung der Veränderungen (Auflockerung, verdeckte Hohlräume hinter dem Ausbau) zu qualitativen Einbussen bei den Barrieren führen können. Diesbezüglich bewertet die Nagra das Standortgebiet Nördlich Lägern für das HAA-Lager im Vergleich mit den Standortgebieten Zürich Nordost und Jura Ost wegen der grösseren Tiefenlage bzw. den erwarteten Baugrundmodelltypen (Einfluss der tektonischen Überprägung) als nachteilig. Bei der Beurteilung des Nahfeldverhaltens der SMA/LMA-Lagerkammer ist der Einfluss der Lagerkammern auf die Barrierenwirkung des Wirtgesteins zu beurteilen. Der Vortrieb und der Ausbau, beeinflusst durch die Tiefenlage der Lagerkammern, haben dabei eine erhebliche Bedeutung. Wichtig ist insbesondere die mögliche Beeinträchtigung der vertikalen Migrationsdistanz im WG (NAB 16-41; NAB 16-42). Der Wasserfluss in der AUZ der Lagerkammern für SMA bzw. LMA ist irrelevant, weil der Wasserfluss in axialer Richtung (d. h. längs der Lagerkammern) in jedem Fall durch die hohe hydraulische Durchlässigkeit des Verfüllmaterials bestimmt wird.

Im NAB 16-45 wird anhand der Ergebnisse aus numerischen Berechnungen (Itasca 2016) das kurz- und langfristige Gebirgsverhalten des Opalinustons (bis max. 100 Jahre), einschl. der Ausdehnung der plastischen Zone und der Volumendehnung im ausbruchnahen Gebirge, nach dem Ausbruch der Lagerstollen (Profil F) und der Lagerkavernen (Profil K09) beurteilt. Dabei wird die Abhängigkeit der Tiefe (600, 700 und 900 m u. T.) und der

gewählten Parametersätze (GMmin und GMref), ohne Berücksichtigung des Ausbaus, untersucht. Gemäss den Berechnungsergebnissen nimmt die Ausdehnung der plastischen Zone bei gleichbleibendem Baugrundmodell mit der Tiefe etwa linear zu. Sie ist entsprechend den Gebirgseigenschaften (Festigkeit, Anisotropie) ungleich verteilt (NAB 16-45, Kapitel 5.2).

Im NAB 16-45 wird das Systemverhalten anhand von Gebirgskennlinien aus analytischen elasto-plastischen Totspannungsberechnungen und aus gekoppelten numerischen axial-symmetrischen Berechnungen unter Berücksichtigung der Tragwirkung des Ausbaus für die verschiedenen Referenzprofile in Abhängigkeit der Lagertiefe (600 bis 900 m u. T.) und des gewählten Baugrundmodells beurteilt (NAB 16-45). Die gekoppelten axial-symmetrischen Berechnungen, unter Annahme des Baugrundmodells BGM-3a, berücksichtigen die räumliche Tragwirkung im Ortsbrustbereich und die zeitabhängige Belastungszunahme infolge Konsolidation sowie Ausbruchsequenz und Installation der Ausbruchsicherung. Daraus lassen sich relevante Zustandsgrössen, u. a. der Radius der plastischen Zone (AUZ), für die Beurteilung des Systemverhaltens der Lagerkammer herauslesen (NAB 16-45).

Zur Ergänzung der qualitativen Diskussion bezüglich Langzeitsicherheit wurden zur Illustration der Bedeutung der hydraulischen Durchlässigkeit der Auflockerungszone und der Versiegelungsstrecken sowie zur Illustration der Bedeutung der Qualität der Nahfeldbarrieren und der barrierenwirksamen Migrationslänge im Wirtgestein Dosisberechnungen durchgeführt, die teilweise hypothetischen «what if»-Charakter haben (NAB 16-41). Gesamthaft zeigt dies, dass eine erhöhte Durchlässigkeit in der AUZ bzw. in den Versiegelungsstrecken zwar einen Einfluss auf das Systemverhalten hat (zunehmende Bedeutung der Freisetzung entlang Schacht bzw. Tunnel), dass die Dosen aber auch für extreme Annahmen (inkl. «what if»-Berechnungen) deutlich unterhalb des Schutzkriteriums bzw. des Optimierungsziels liegen. Die durchgeführten Dosisberechnungen zeigen auch, dass ungünstige Bedingungen im Nahfeld, wie sie bei Verletzung der Optimierungsanforderung bezüglich maximaler Tiefenlage möglich sind, ein sicheres geologisches Tiefenlager nicht ausschliessen. Die Langzeitsicherheit ist für die verwendeten Ausbaukonzepte und Ausbaumittel bei geeigneten Standortgebieten auch bis in Tiefen von 800 m u. T. (SMA-Lager) bzw. 900 m u. T. (HAA-Lager) grundsätzlich gewährleistet (NAB 16-41).

Beurteilung des ENSI

Das ENSI ist mit dem Bewertungsobjekt WG-ss und mit der von der Nagra verwendeten Bewertungsskala einverstanden. Abweichend von der Nagra beurteilt das ENSI den Indikator 29 als entscheidend relevant. Die Langzeitentwicklung der Auflockerungszone kann eine hohe Bedeutung für die Integrität der sicherheitstechnischen Barrieren haben und andere sicherheitsrelevante Aspekte wie Radionuklid- und Gastransport sowie chemische Wechselwirkungen beeinflussen. Deshalb ist dieser Aspekt im Hinblick auf die in der Richtlinie ENSI-G03 geforderte Optimierung der Langzeitsicherheit des Tiefenlagers, insbesondere die Wirksamkeit der von der Nagra vorgeschlagenen technischen Massnahmen, in Etappe 3 SGT weiter zu untersuchen.

Das ENSI bewertet den Indikator 29 für alle Standortgebiete (SMA- und HAA-Lager) einheitlich mit «günstig». Dies steht im Einklang mit der Bewertung der Nagra für die SMA-Standortgebiete, weicht aber von jener der Nagra für die HAA-Standortgebiete ab. Bei seiner Bewertung stützt sich das ENSI auf die aktuell vorhandene, beschränkte felsmechanische Datenbasis, welche zurzeit nur qualitative Aussagen über die Ausdehnung der AUZ erlaubt, sowie auf die Ergebnisse der Dosisberechnungen der Nagra im Rahmen der Nachforderung des ENSI (NTB 10-01; NAB 16-41).

Das ENSI kann aufgrund der vorliegenden felsmechanischen Daten und der zu konservativen Berechnungsannahmen die Aussage der Nagra im NAB 16-41 (Kapitel 7) nicht nachvollziehen, dass das Standortgebiet Nördlich Lägern bezüglich möglicher Veränderungen im konturnahen Wirtgestein (in der AUZ) des HAA-Lagerstollens im Vergleich mit den Standortgebieten Zürich Nordost und Jura Ost wegen der grösseren Tiefenlage als nachteilig beurteilt wird.

Die dokumentierten gekoppelten numerischen axial-symmetrischen Berechnungen zur Beurteilung des Systemverhaltens (Gebirge-Ausbau), welche die räumliche Tragwirkung des Ausbaus der Lagerkammer berücksichtigen, werden ausschliesslich unter der Annahme des Baugrundmodells BGM-3a mit dem geomechanischen Parametersatz GMmin durchgeführt (NAB 16-45, Anagnostou 2016b). Dieser gemäss der Nagra massgebende

Parametersatz ist nach heutigem Stand der geologischen und geomechanischen Kenntnisse bezüglich der effektiven Festigkeit und Steifigkeit des Gebirges als zu konservativ für den Opalinuston in den Standortgebieten der Nordschweiz zu bezeichnen. Diese Einschätzung stimmt auch weitgehend mit der Einschätzung der Nagra im NAB 16-43 (Kapitel 4.2) zur effektiven Festigkeit überein. Das ENSI und seine Experten betrachten den Parametersatz GMmax mit dem heutigem Kenntnisstand als den eher zutreffenden geomechanischen Datensatz für die Standortgebiete in der Nordschweiz (Kapitel 2.9 und 6.1.4).

Aufgrund einer Plausibilitätsprüfung zu den Dosisberechnungen teilt das ENSI die Aussagen der Nagra, dass selbst bei einer deutlichen Erhöhung der Durchlässigkeitswerte in der Auflockerungszone des Opalinustons das Schutzkriterium gemäss Richtlinie ENSI-G03 eingehalten wird. Das aktuelle Wissen über die Langzeitentwicklung der AUZ im Opalinuston ist allerdings noch gering. Nach Ansicht des ENSI sollen die kurz- und langfristigen Konsolidations- und Quellprozesse in der AUZ einer Lagerkammer zum besseren Verständnis der Selbstabdichtungsprozesse im Opalinuston in Etappe 3 SGT vertieft untersucht werden. Die Eigenschaften der AUZ sind mit diesen Untersuchungen auch im Hinblick auf ein tiefenoptimiertes Ausbaukonzept neu zu beurteilen.

Aus den eingereichten Unterlagen und aus den durchgeführten Berechnungen können nach Ansicht des ENSI keine eindeutigen Nachteile für die Standortgebiete in der Nordschweiz und das Standortgebiet Wellenberg bezüglich des Indikators 29 identifiziert werden.

Indikator 3: Tiefenlage unter lokaler Erosionsbasis im Hinblick auf die Bildung neuer Rinnen

Angaben der Nagra

Mit dem Indikator 3 «Tiefenlage unter lokaler Erosionsbasis im Hinblick auf die Bildung neuer Rinnen» wird einerseits die Auswirkung von neu gebildeten Tälern (Durchbruchsrinnen) beurteilt, wobei davon ausgegangen wird, dass die Topographie bis auf das Niveau der abgesenkten lokalen Erosionsbasis am Ende des Betrachtungszeitraums eingeschnitten wird. Andererseits wird mit diesem Indikator auch der Effekt von neu angelegten glazialen Übertiefungen beurteilt, welche unter die zukünftige lokale Erosionsbasis greifen. Der Indikator wurde in erster Linie eingeführt, um die Möglichkeit der Entstehung von neuen Durchbruchsrinnen und über-tiefen Felsrinnen besser zu berücksichtigen. Er deckt aber auch eine erhöhte Abtragung der lokalen Topographie unter alternativen Klima- und Vegetationsbedingungen ab, da die verwendeten Szenarien zur Beurteilung der zukünftigen Entwicklung der lokalen Erosionsbasis sowohl endogene (Hebung) als auch exogene Effekte (Klimawechsel oder fundamentale Veränderungen des Flussnetzes, z. B. in Zusammenhang mit Vergletscherungen) berücksichtigen (NTB 14-02-III). Bewertungsobjekt ist der einschlusswirksame Gebirgsbereich innerhalb des Lagerperimeters, wobei sich die Bewertung auf den bzgl. Rinnenbildung ungünstigsten Punkt innerhalb des Lagerperimeters bezieht (NTB 14-01). Für nahezu alle SMA-Lagerperimeter ergibt sich bzgl. des Indikators 3 die Bewertung «sehr günstig». Einzig der Lagerperimeter SMA-SR-OPA wird aufgrund seiner massgebenden minimalen Tiefe des Opalinustons von 100 m unter lokaler Erosionsbasis mit «günstig» bewertet. Der Indikator wird in den HAA-Gebieten Zürich Nordost und Nördlich Lägern mit «sehr günstig» und im HAA-Gebiet Jura Ost mit «günstig» bewertet (NTB 14-01).

Das SMA-Standortgebiet Südranden weist eine Schwäche aufgrund der vergleichsweise geringen Tiefenlage des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs auf. Damit verbunden ist die Exponiertheit bezüglich langfristiger Erosion infolge möglicher Bildung einer Durchbruchsrinne, inkl. deren möglicher späterer glazialer Übertiefung. Diese Schwäche bildet einen eindeutigen Nachteil im Vergleich mit Standortgebieten, in denen der einschlusswirksame Gebirgsbereich eine grössere Tiefenlage aufweist und damit einen besseren Schutz vor langfristiger Erosion gewährleistet (NTB 14-01).

Das HAA-Standortgebiet Jura Ost weist im Vergleich mit den HAA-Standortgebieten Zürich Nordost und Nördlich Lägern eine deutlich tiefere, aber immer noch knapp «günstige» Bewertung auf. Zwar kann langfristig die Bildung einer Durchbruchsrinne nicht vollständig ausgeschlossen werden, eine solche wird jedoch voraussichtlich erst in einigen 100 000 Jahren an Relevanz gewinnen bzw. innerhalb des Betrachtungszeitraums eventuell gar nie gebildet. Auch bei Bildung einer Durchbruchsrinne wird das Schutzziel der Richtlinie ENSI-G03 eingehalten. Der beschränkte Schutz vor Erosion wird deshalb in der Gesamtbeurteilung als deutlich weniger bedeutend beurteilt. Es werden daher für keines der HAA-Standortgebiete eindeutige Nachteile ausgewiesen (NTB 14-01).

Beurteilung des ENSI

Das ENSI beurteilt die Einführung des Indikators 3 mit seinem Bezugsniveau «lokale Erosionsbasis» als zielgerichtet. Aus Sicht des ENSI ist allerdings die von der Nagra definierte Bewertungsskala nur teilweise nachvollziehbar und bezüglich dem verwendeten Teilbetrag zur Berücksichtigung glazialer Tiefenerosion nicht ausreichend sicherheitsgerichtet ausgelegt. Deshalb hat das ENSI im Hinblick auf die qualitative Bewertung dieses Indikators eine eigene Bewertungsskala hergeleitet (ENSI 33/539). Dies führt zu teilweise abweichenden Bewertungen der Lagerperimeter. Bezüglich des Bewertungsobjekts stellt das ENSI fest, dass nicht, wie im NTB 14-01 ausgewiesen, die minimale Tiefenlage des EG, sondern die minimale Tiefenlage der Oberkante Wirtgestein unter Niveau der lokalen Erosionsbasis bewertet wird (NTB 14-01; NAB 17-01, Frage 20). Mit dem Bewertungsobjekt minimale Tiefenlage der Oberkante Wirtgestein unter Niveau der heutigen lokalen Erosionsbasis ist das ENSI einverstanden.

Im geologischen Standortgebiet Südranden ist aus Sicht des ENSI innerhalb des SMA-Betrachtungszeitraums die Wahrscheinlichkeit für substanzielle glaziale Tiefenerosion im Lagerperimeter sehr gering, konservativ betrachtet jedoch nicht auszuschliessen. Die Möglichkeit zu sonstigen glazialen Erosionsprozessen, insbesondere zur Bildung neuer Durchbruchrinnen beurteilt das ENSI als grundsätzlich gegeben. In Übereinstimmung mit der Nagra ergibt sich die Bewertung «günstig». Für das SMA-Standortgebiet Südranden ergibt sich zwar eine Schwäche aufgrund der im Vergleich mit den weiteren SMA-Standortgebieten geringeren Überdeckung des Wirtgesteins. Im Unterschied zur Nagra identifiziert das ENSI jedoch keinen eindeutigen Nachteil, da bzgl. des Niveaus der lokalen Erosionsbasis als Bewertungsobjekt des Indikators 3 keine Ungewissheitsbetrachtungen vorliegen, diese aber mit zusätzlichen Untersuchungen abgeklärt werden könnten. Somit ist zum jetzigen Zeitpunkt keine robuste Ableitung eines eindeutigen Nachteils möglich.

In der Bewertung des geologischen SMA-Standortgebiets Jura Ost berücksichtigt das ENSI in Abweichung zur Nagra die Absenkung der lokalen Erosionsbasis um 50 Meter in 100 000 Jahren, wodurch sich im Vergleich zur Nagra nur die Bewertung «günstig» ergibt. Für das SMA-Standortgebiet Jura Ost resultiert daraus eine Schwäche, welche aber keinen eindeutigen Nachteil darstellt, da bzgl. des Niveaus der lokalen Erosionsbasis als Bewertungsobjekt des Indikators 3 keine Ungewissheitsbetrachtungen vorliegen und somit keine robuste Ableitung eines eindeutigen Nachteils erfolgen kann.

Die Bewertung des Standortgebiets Wellenberg orientiert sich an Szenarien zur Entwicklung der Terrainoberfläche, da sich in den Alpentälern eine Erosionsbasis wie in der Nordschweiz nicht rechtfertigen lässt. Somit wird der Einfluss der Dekompaktion am Ende des Betrachtungszeitraums bewertet und die Bewertung erfolgt analog zum Indikator I-2 «Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf die Gesteinsdekompektion» für den Lagerperimeter SMA-WLB-MGL mit «bedingt günstig». Ein eindeutiger Nachteil wird vom ENSI trotz der geringen Bewertung nicht identifiziert, da innerhalb des Wirtgesteinskörpers eine ausreichend grosse Flexibilität bzgl. der tatsächlichen Anordnung der Lagerkammern besteht (ENSI 33/539).

Für alle anderen SMA-Standortgebiete identifiziert das ENSI in Übereinstimmung mit der Nagra ebenfalls keine eindeutigen Nachteile.

Bei der Bewertung des Lagerperimeters HAA-ZNO wird der Teilbetrag zur Berücksichtigung glazialer Tiefenerosion vom ENSI kritischer bewertet, was zu einer nur «günstigen» Bewertung führt. Daraus ergibt sich für das HAA-Standortgebiet Zürich Nordost aus Sicht des ENSI eine Schwäche aber kein eindeutiger Nachteil, da bzgl. des Niveaus der lokalen Erosionsbasis als Bewertungsobjekt des Indikators 3 keine Ungewissheitsbetrachtungen vorliegen. Zusätzlich sieht das ENSI bzgl. der Erosionsresistenz der Malmkalke bei zukünftiger glazialer Tiefenerosion bestehende Ungewissheiten, die zukünftig abklärbar sind. Eine robuste Ableitung eines eindeutigen Nachteils kann daher zum jetzigen Zeitpunkt nicht erfolgen.

Das HAA-Standortgebiet Jura Ost weist die mit Abstand geringste minimale Tiefenlage unter Erosionsbasis auf. Es bestehen unter Berücksichtigung des heutigen Kenntnisstands der zu meidenden tektonischen Zonen im Unterschied zum Standortgebiet Zürich Nordost keine Reserven bezüglich Schutz vor Erosion und damit kein weiteres Optimierungspotenzial. Bei der Bewertung des Lagerperimeters HAA-JO wird die glaziale Tiefenerosion vom ENSI als weniger relevant angesehen (siehe Indikator 3 in ENSI 33/539) und dieser erhält knapp eine «günstige» Bewertung. Aufgrund der fehlenden Reserven bezüglich Schutz vor Erosion identifiziert das ENSI

eine Schwäche für das Standortgebiet Jura Ost, einen eindeutigen Nachteil leitet das ENSI jedoch nicht ab, da bzgl. des Niveaus der lokalen Erosionsbasis als Bewertungsobjekt des Indikators 3 keine Ungewissheitsbetrachtungen vorliegen. Zusätzlich erachtet das ENSI auch hier die bestehenden Ungewissheiten bzgl. glazialer Tiefenerosion und Erosionsresistenz der Malmkalke als zukünftig abklärbar. Eine robuste Ableitung eines eindeutigen Nachteils kann somit nicht erfolgen.

Der Lagerperimeter HAA-NL weist seitens ENSI wegen seiner grossen Tiefenlage die beste Bewertung von allen HAA-Lagerperimetern auf. Das ENSI formuliert daher wie die Nagra keinen eindeutigen Nachteil.

Indikator 2: Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf Gesteins-Dekompaktion

Angaben der Nagra

Die grundlegenden Konzepte der Nagra für die Anwendung dieses Indikators und die darauf abgestützten Bewertungsskalen werden in Kapitel 5.1.2 vorgestellt.

Die hydraulische Durchlässigkeit des Opalinustons kann in Oberflächennähe aufgrund von Dekompaktionseffekten und Verwitterungsprozessen K-Werte bis 10^{-4} m/s aufweisen. Im Bereich von 10 bis 30 m Tiefe nimmt sie aber um mehrere Grössenordnungen ab (NTB 14-02-VI).

Bezüglich einer dekompanktionsbedingten Erhöhung der hydraulischen Durchlässigkeit des 'Braunen Doggers' in der Nähe der Erdoberfläche wird davon ausgegangen, dass die tonreichen Abfolgen ein ähnliches Verhalten zeigen wie der Opalinuston. Für die kalkig-sandigen lithofaziellen Elemente muss damit gerechnet werden, dass sich die Dekompaktion bis in grössere Tiefen auswirkt und etwa vergleichbar ist mit derjenigen in den Effinger Schichten (NTB 14-02-VI).

Die hohen hydraulischen Durchlässigkeiten in den obersten 200 – 300 m der Effinger Schichten sind durch Dekompaktions-, Verwitterungs- und Verkarstungseffekte bedingt. (NTB 14-02-VI). Darunter sind durchwegs saline Porenwässer vorhanden (NTB 14-02-VI), was als Hinweis auf eine geringe hydraulische Durchlässigkeit angesehen wird.

Im Bereich der Dekompaktionszone der Mergel-Formationen des Helvetikums bilden die wasserführenden Strukturen ein verbundenes Netzwerk (NTB 14-02-VI). Da die Dekompaktionseffekte im Wirtgestein bis in 600 m Tiefe wirksam sind, wirkt sich die Erosion aber auch bei Wahl einer im Vergleich zur Nordschweiz grossen Tiefenlage negativ auf die hydraulischen Eigenschaften des Wirtgesteins und damit auf den Radionuklidtransport aus (NTB 14-02-III). Für die Sicherheitsbetrachtung für Etappe 2 SGT wurde im Standortgebiet Wellenberg die obere Lagerebene 140 m tiefer gelegt als die Lagerebene im früheren Projekt (Rahmenbewilligungsgesuch) und ist deshalb etwas weiter vom unteren Ende der Dekompaktionszone entfernt (NTB 14-02-V). Als Folge von Erosions- und Dekompaktionsvorgängen kann längerfristig eine Erhöhung der hydraulischen Durchlässigkeit in dieser Ebene nicht ausgeschlossen werden. In der 200 m tiefer gelegenen unteren Lagerebene werden die Verhältnisse auch langfristig als stabil beurteilt (NTB 14-02-VI).

Die Nagra kommt damit für den Lagerperimeter SMA-SR-OPA zu einer «bedingt günstigen» und für den Lagerperimeter HAA-JO zu einer «günstigen» Bewertung. Alle anderen Lagerperimeter werden mit «sehr günstig» bewertet (Tabelle 21).

Das SMA-Standortgebiet Südranden weist für diesen Indikator einen eindeutigen Nachteil gegenüber allen anderen SMA-Standortgebieten auf. Die Nagra begründet den eindeutigen Nachteil mit der vergleichsweise geringen Tiefenlage des einschliesswirksamen Gebirgsbereichs und der damit verbundenen ungenügenden Überdeckung der oberen Rahmengesteine (NTB 14-01).

Das HAA-Standortgebiet Jura Ost weist zwar beim Indikator «Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf Gesteins-Dekompaktion» eine im Vergleich zu den anderen HAA-Standortgebieten deutlich tiefere, aber immer noch knapp «günstige» Bewertung auf. Diese wird nicht als eindeutiger Nachteil eingestuft (NTB 14-01).

Beurteilung des ENSI

Die grundlegenden Konzepte für die Anwendung dieses Indikators und die darauf abgestützten Bewertungsskalen wurden in Kapitel 5.1.2 diskutiert und in ENSI 33/539 näher erläutert. Im Folgenden werden diese Konzepte und Bewertungsskalen zur Bewertung und zum Vergleich der Lagerperimeter sowie zur Identifikation eindeutiger Nachteile angewendet.

In Etappe 2 SGT konnte die Tiefenlage der WG-ss unter Terrain in der Nordschweiz präzisiert werden und ist im geologischen Schichtmodell berücksichtigt (Kapitel 2.6.1). Am Wellenberg geht die Nagra neu von einer bis 600 m u. T. reichenden Dekompaktionszone aus (gegenüber 400 m in Etappe 1 SGT), womit einem früheren Hinweis des ENSI (ENSI 33/070) Rechnung getragen wird.

Mit den von der Nagra abgeleiteten Werten für die Ausdehnung des Einflussbereichs der Dekompaktion unter Terrain ist das ENSI einverstanden (Opalinuston: 200 m, 'Brauner Dogger' und Effinger Schichten: 300 m, Mergel-Formationen des Helvetikums: 600 m). Die Bewertung des ENSI im Hinblick auf die Gesteinsdekompektion bezieht sich konsequent auf die Tiefenlage des WG-ss. Je später das WG-ss durch flächenhafte Erosion in den Einflussbereich der Dekompaktionszone gerät, desto weniger ausgeprägt werden radiologische Auswirkungen auf Mensch und Umwelt sein. Für das ENSI wird eine «sehr günstige» Bewertung erreicht, wenn das WG-ss im gesamten Betrachtungszeitraum gemäss ENSI 33/075 nicht von Dekompaktion erfasst wird (Optimierungsanforderung des ENSI, Kapitel 5.1.2). Werden nur die verschärften Anforderungen aus Etappe 1 SGT eingehalten, führt dies zu einer «bedingt günstigen» Bewertung.

Es zeigt sich, dass das WG-ss in allen optimierten Lagerperimetern der Nordschweiz innerhalb des jeweiligen Betrachtungszeitraums nicht von der Dekompaktion erfasst wird. Dies gilt auch, wenn für den Lagerperimeter SMA-JS-OPA aufgrund des hier weniger als 100 m mächtigen Opalinustons eine Überdeckung von 300 m verlangt wird, um eine Barrierenwirksamkeit der oberen Rahmengesteine mindestens zu ermöglichen.

Hinsichtlich des Indikators «Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf Gesteins-Dekompektion» erkennt das ENSI keine Schwäche des SMA-Standortgebiets Südranden, denn auch bei pessimistischen Annahmen für die flächenhafte Erosion befindet sich im Lagerperimeter der Opalinuston am Ende des Betrachtungszeitraums noch vollständig unterhalb der Dekompaktionszone (ENSI 33/539). Dass im SMA-Standortgebiet Südranden im Gegensatz zu den anderen Nordschweizer Standortgebieten die oberen Rahmengesteine nicht wirksam sind, berücksichtigt das ENSI beim Indikator 5 «Mächtigkeit». Hingegen besteht für das SMA-Standortgebiet Wellenberg eine Schwäche, denn die Lagerebenen liegen teilweise bereits heute nur knapp unterhalb der Dekompaktionszone bei gleichzeitig höheren Erosionsraten gegenüber der Nordschweiz. Dies stellt jedoch keinen eindeutigen Nachteil dar, da die Lagerebenen prinzipiell auch tiefer angelegt werden könnten.

Für alle HAA-Standortgebiete ergeben sich seitens ENSI «sehr günstige» Bewertungen, so dass kein eindeutiger Nachteil identifiziert wird. Selbst für das untiefste HAA-Standortgebiet Jura Ost befindet sich der Oplalinuston auch bei pessimistischen Annahmen für die flächenhafte Erosion am Ende des Betrachtungszeitraums noch vollständig unterhalb der Dekompaktionszone (ENSI 33/539).

Indikator 4: Tiefenlage unter Fels im Hinblick auf glaziale Tiefenerosion

Angaben der Nagra

Der Indikator «Tiefenlage unter Fels im Hinblick auf glaziale Tiefenerosion» bezieht sich auf die Distanz zwischen der Obergrenze des notwendigen einschlusswirksamen Gebirgsbereichs und der Oberfläche Fels. Der notwendige einschlusswirksame Gebirgsbereich kann neben dem Wirtgestein auch Beiträge der Rahmengesteine umfassen, welche notwendig sind, um die MA bzw. VA bzgl. des Indikator 5 «Mächtigkeit» zu erfüllen (NTB 08-05). Der Indikator dient der Beurteilung der Auswirkungen der glazialen Tiefenerosion auf die Langzeitsicherheit (Abnahme der Gesteinsüberdeckung und Freilegung des Tiefenlagers durch glaziale Erosion unter Berücksichtigung der langfristigen Hebung/Erosion (NTB 08-05). Die Bewertungsskala entspricht der aus Etappe 1 SGT, wobei für die «übertiefen Felsrinnen» nicht nur eine Vertiefung, sondern auch eine Verbreiterung angenommen wird (NTB 14-01). Bewertungsobjekt ist der einschlusswirksame Gebirgsbereich innerhalb des Lagerperimeters, wobei sich die Bewertung auf den ungünstigsten Punkt innerhalb des Lagerperimeters bezieht (NTB 14-01).

Bei der Anwendung der Mindestanforderungen bzw. der verschärften Anforderungen für die glaziale Tiefenerosion sind glazial übertiefte Felsrinnen neu definiert als quartäre Übertiefungen von mehr als 50 m unter Erosionsbasis inkl. eines seitlichen Randstreifens von 200 m (NTB 14-01). Die Neuhauserwald-Rinne wird bei der Bewertung des Lagerperimeters SMA-SR-OPA wie eine bestehende glazial übertiefte Rinne behandelt (NTB 14-01), auch wenn es sich formal nicht um eine solche handelt (NAB 17-01, Frage 73).

Für das Standortgebiet Wellenberg wird für die Bewertung des Indikators vom Grundsatz her gleich vorgegangen wie in der Nordschweiz. Im Gegensatz zur Nordschweiz wird jedoch als Ausgangspunkt nicht die heutige Felsoberfläche verwendet, sondern die Felsoberfläche, wie sie am Ende des Betrachtungszeitraums erwartet wird (NTB 14-01). Der totale Betrag einer zukünftigen glazialen Vertiefung der Felsoberfläche im Engelbergertal ist jedoch schwer zu quantifizieren, sodass drei verschiedene Vertiefungsszenarien (Tieferlegung um 50, 100 und 200 m) betrachtet werden (NTB 14-02-III).

Die Nagra bewertet den Lagerperimeter SMA-SR-OPA mit «bedingt günstig», alle weiteren SMA-Lagerperimeter werden mit «sehr günstig» bewertet (NTB 14-01). Der Lagerperimeter HAA-ZNO wird von der Nagra mit «günstig» bewertet, die weiteren HAA-Lagerperimeter mit «sehr günstig» (NTB 14-01).

Für das Standortgebiet Südranden wird bezüglich des Indikators ein eindeutiger Nachteil vermerkt. Dieser ergibt sich aufgrund der vergleichsweise geringen Tiefenlage des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs und der Möglichkeit einer zukünftigen glazialen Übertiefung entlang neuer Durchbruchsrinnen bzw. entlang der Neuhauserwald-Rinne (NTB 14-01).

Das HAA-Standortgebiet Zürich Nordost weist für den Indikator keinen eindeutigen Nachteil auf. Die vergleichsweise etwas tiefere Bewertung der «Tiefenlage unter Fels im Hinblick auf glaziale Tiefenerosion» wird wegen der insgesamt günstigen Tiefenlage als unbedeutend eingestuft (NTB 14-01).

Das HAA-Standortgebiet Nördlich Lägern erhält die beste Bewertung und weist folglich keinen eindeutigen Nachteil für den Indikator 4 auf.

Das HAA-Standortgebiet Jura Ost weist für den Indikator keinen eindeutigen Nachteil auf, da es ausserhalb der Haupttäler liegt; es hat deshalb wenig Potenzial für glaziale Tiefenerosion (NTB 14-01).

Beurteilung des ENSI

Die zur Anwendung der Mindest- und verschärften Anforderungen sowie zur Bewertung des Indikators vorgenommene Festlegung der Nagra, dass übertiefte Felsrinnen erst ab einer Tiefe von 50 m unter Erosionsbasis berücksichtigt werden (NTB 14-01), ist aus Sicht des ENSI weder plausibel noch sicherheitsgerichtet. In Anlehnung an das gegenwärtige Prozessverständnis bzgl. glazialer Tiefenerosion berücksichtigt das ENSI für die Betrachtungen sämtliche Felsrinnen, welche unter die lokale Erosionsbasis greifen. In Übereinstimmung mit der Nagra wird auch durch das ENSI dabei ein 200 m breiter lateraler Randbereich berücksichtigt. Mit dem verwendeten Bewertungsobjekt minimale Tiefenlage der Oberkante Wirtgestein unter Niveau der heutigen Felsoberfläche ist das ENSI einverstanden. Dennoch kritisiert das ENSI die Dokumentation der Nagra, da nicht, wie im NTB 14-01, ausgewiesen, die minimale Tiefenlage des EG, sondern die minimale Tiefenlage der Oberkante Wirtgestein unter Niveau der Felsoberfläche bewertet wird (NTB 14-01; NAB 17-01, Frage 20).

Die Neuhauserwald-Rinne im SMA-Standortgebiet Südranden reicht nach vorliegenden Daten nicht unter die Felsoberfläche und ist somit im Gegensatz zur Bewertung der Nagra nicht glazial übertieft. Aufgrund der Tiefenlage des Wirtgesteins unter Felsoberfläche ergibt sich für den Lagerperimeter SMA-SR-OPA die Bewertung «günstig» (ohne Reserven). Alle weiteren SMA-Lagerperimeter werden vom ENSI in Übereinstimmung mit der Nagra als «sehr günstig» bewertet, so dass sich für diese weder Schwächen noch eindeutige Nachteile ergeben. Im Vergleich mit den anderen SMA-Standortgebieten der Nordschweiz weist der Lagerperimeter SMA-SR-OPA die mit Abstand geringste Tiefenlage unter Fels und somit die geringsten Reserven bzgl. den potenziell nicht weiter reduzierbaren Ungewissheiten in der zukünftigen Klimaentwicklung (z. B. Zeitpunkt und Intensität der nächsten Vorlandvergletscherung) auf. Im Vergleich mit den anderen SMA-Standortgebieten der Nordschweiz identifiziert das ENSI daher einen eindeutigen Nachteil für das Standortgebiet Südranden.

Für alle anderen SMA-Standortgebiete identifiziert das ENSI in Übereinstimmung mit der Nagra keine eindeutigen Nachteile.

Da das ENSI für die räumliche Abgrenzung glazialer Felsrinnen keinen Schwellenwert verwendet, erfüllt der von der Nagra verwendete Lagerperimeter HAA-ZNO-mLE-r die VA von 500 m unter Fels im Bereich der Rheinau- und insbesondere der Rudolfingen-Rinne nicht (Abbildung 32). Auch bei Verwendung der Definition von glazial übertieften Felsrinnen gemäss Etappe 1 SGT werden die VA im Bereich der Rudolfingen-Rinne nicht erfüllt. Dies würde zu einer Bewertung «bedingt günstig» führen. Das ENSI legt seiner Bewertung daher abweichend zur Nagra den südlichen Teil des Lagerperimeters HAA-ZNO (HAA-ZNO-aL506-r, Kapitel 5.1.3) zugrunde und bewertet diesen als «günstig».

Das ENSI stellt fest, dass mittels erdwissenschaftlicher Untersuchungen reduzierbare Ungewissheiten bezüglich Form und Ausbildung vorhandener glazial übertiefter Felsrinnen bestehen. Das ENSI hält ausserdem fest, dass Ungewissheiten bzgl. der Erosionsresistenz der Malmkalke bestehen. Deren Einfluss auf die glaziale Tiefenerosion ist in Etappe 3 SGT zu bewerten.

Der Lagerperimeter HAA-NL weist eine relativ zentral gelegene glaziale Übertiefung auf. Diese ist zwar gegenwärtig nur sehr schwach ausgebildet, eine mögliche Reaktivierung/Vergrösserung kann aufgrund bestehender, nicht weiter reduzierbaren Ungewissheiten bzgl. Zeitpunkt, Anzahl und Intensität zukünftiger Vorlandvergletscherungen jedoch nicht ausgeschlossen werden, so dass das ENSI den Lagerperimeter im Unterschied zur Nagra mit «günstig» bewertet. Wie die Nagra, identifiziert das ENSI im Vergleich mit den anderen HAA-Standortgebieten aufgrund der grossen Tiefenlage keinen eindeutigen Nachteil.

Der Lagerperimeter HAA-JO wird vom ENSI aufgrund der Tiefenlage des Wirtgesteins von 400 m unter Felsoberfläche gerade noch mit «günstig» bewertet. Der Lagerperimeter erfüllt damit die verschärften Anforderungen an den Indikator nur knapp. Aufgrund fehlender Anzeichen für bestehende glaziale Tiefenerosion im Standortgebiet sowie der ausgeprägten Geländemorphologie erachtet das ENSI eine signifikante zukünftige Tiefenerosion für unwahrscheinlich. Da jedoch nicht weiter reduzierbare Ungewissheiten bzgl. Zeitpunkt, Anzahl und Intensität zukünftiger Vorlandvergletscherungen im Betrachtungszeitraum von 1 Million Jahren bestehen, kann glaziale Tiefenerosion nicht vollständig ausgeschlossen werden. Das ENSI beurteilt das knappe Erreichen der verschärften Anforderungen daher als Schwäche, aber nicht als eindeutigen Nachteil.

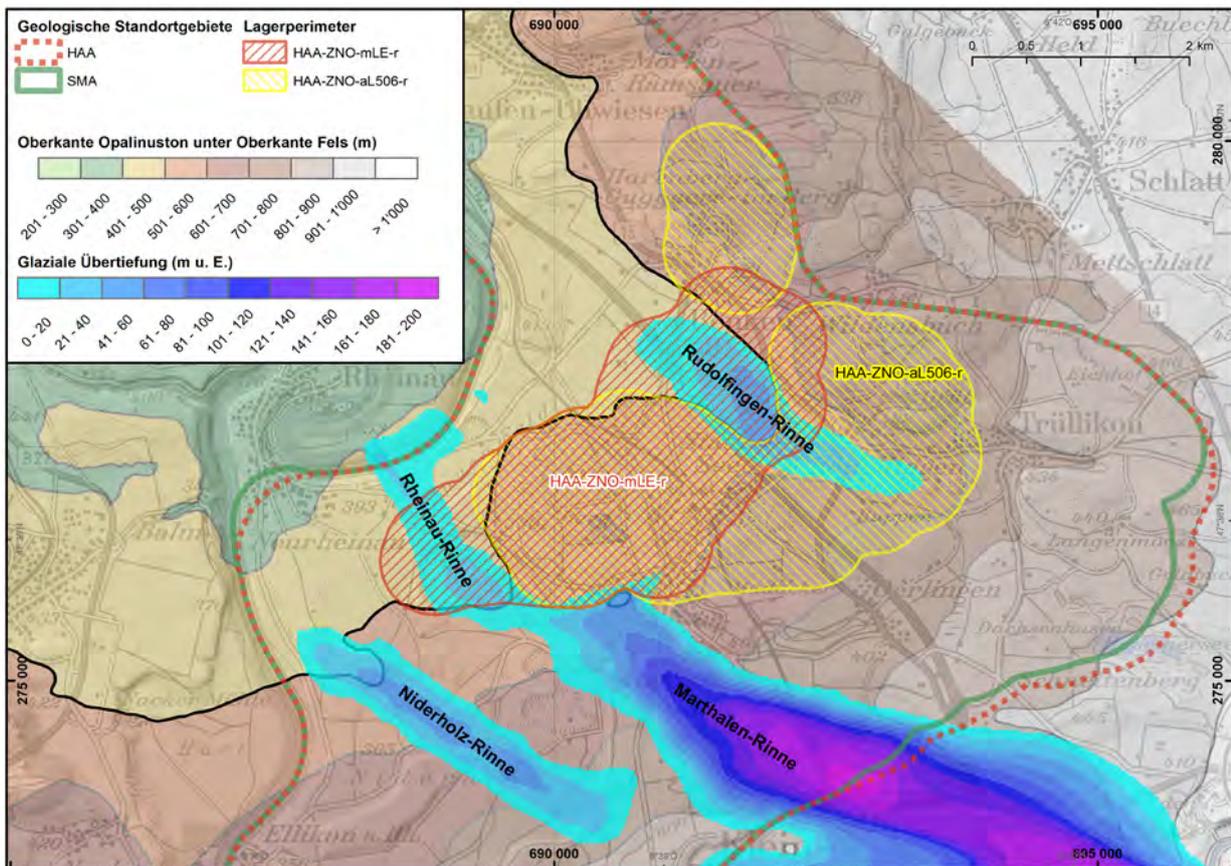


Abbildung 32: Tiefenlage der Oberkante Opalinuston (= Top Lias plus 100 m) unter Oberkante Fels im Standortgebiet Zürich Nordost. Die verschärften Anforderungen des Indikators 4 verlangen für ein HAA-Lager, dass die Oberkante Wirtgestein im Bereich von glazial übertieften Felsrinnen mindestens oder gleich 500 m unter Fels liegt (schwarze Linie), was im massgebenden Lagerperimeter der Nagra (HAA-ZNO-mLE-r, rot schraffiert) unterhalb der Rheinau- und der Rudolfingen-Rinne nicht überall erfüllt ist. Der auf Rückfrage des ENSI (NAB 17-01, Frage 81) abgegrenzte, alternative Lagerperimeter HAA-ZNO-al506-r (gelb schraffiert) erfüllt hingegen die VA des Indikators 4. Die Daten stammen aus NAB 16-41, NAB 17-01, NTB 14-01, NTB 14-02-I, NTB 14-02-III.

Indikator 24: Seismizität

Angaben der Nagra

Die instrumentell und historisch dokumentierte Seismizität der Schweiz zeigt sowohl in der Nordostschweiz als auch der Zentralschweiz im Vergleich zu den seismisch aktivsten Schweizer Regionen (Basel, Wallis, Graubünden und St. Galler Rheintal) eine geringere Seismizität (NTB 14-02-III). Die Seismizität in der Region Wellenberg ist höher als in der Nordschweiz. Generell liegen die Erdbebenherde im Mittelland in Tiefen von bis zu 30 km und werden im Bereich der Alpenfront gegen Süden un tiefer, wobei die Bebenaktivität zunimmt. Die Zentralschweiz liegt in einer Zone mit gegen Norden stark abnehmenden Hebungsraten (NAB 14-26).

Aufgrund der im Vergleich zur Nordschweiz höheren Seismizität, der geringeren Herdtiefen und der relativ starken Hebungsraten ist eine schlechtere Bewertung für das Standortgebiet Wellenberg gegenüber den Nordostschweizer Gebieten gerechtfertigt. Der Indikator «Seismizität» (das Bewertungsobjekt EG bezieht sich auf die geologische Situation in und um den Lagerperimeter) wird für alle HAA-Lagerperimeter und für die Nordostschweizer SMA-Lagerperimeter als «günstig» und für den SMA-WLB-MGL als «bedingt günstig» bewertet (NTB 14-01). Daraus leitet sich ein eindeutiger Nachteil für das Standortgebiet Wellenberg ab.

Beurteilung des ENSI

Das ENSI ist mit dem Bewertungsobjekt der Nagra einverstanden. Aufgrund der potenziellen Auswirkung von Erdbeben auf die Barrierenwirkung des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs stuft das ENSI den Indikator als sicherheitstechnisch wichtig und damit entscheidend relevant ein. Mit NAB 14-26 ist die Nagra der Forderung 11 aus ENSI 33/115 nachgekommen und hat für das Standortgebiet Wellenberg die aktuellsten Daten zur Hebung, zur Seismizität und zur Neotektonik erfasst und diskutiert. Die Forderung ist aus Sicht des ENSI damit erfüllt. Das ENSI erachtet dessen Bewertung durch die Nagra anhand der geologisch-tektonischen Grossräume in der Schweiz und der beobachteten Seismizität sowie Hebungsraten als nachvollziehbar und stufengerecht.

Das ENSI und seine Experten (EGT 2016) erachten die relative Gewichtung dieses Indikators innerhalb der Bewertung der SMA-Standortgebiete als sinnvoll, da sich der Wellenberg sowohl durch eine höhere Seismizität als auch eine geringere Tiefenlage der instrumentell beobachteten Beben auszeichnet. Die Datenlage erlaubt keine weiter differenzierende Bewertung innerhalb der Standortgebiete (SMA und HAA) der Nordschweiz. Das ENSI bewertet wie die Nagra die Lagerperimeter in der Nordschweiz mit «günstig» und den Lagerperimeter SMA-WLB-MGL mit «bedingt günstig».

Auch das ENSI identifiziert für das Standortgebiet Wellenberg im Vergleich zu den anderen SMA-Standortgebieten einen eindeutigen Nachteil. Dieser bleibt auch bei günstiger Interpretation der vorliegenden Daten bestehen.

Indikator 31: Verhalten des Wirtgesteins bezüglich Gas

Angaben der Nagra

Die Nagra hat im NAB 13-83 die für die Gasfreisetzung relevanten gasbezogenen Prozesse und Phänomene sowie die Gastransporteigenschaften für alle Wirtgesteinsformationen beschrieben und bewertet (Bewertungsobjekt WG-ss). Die Nagra berücksichtigt bei der Bewertung technische Möglichkeiten zur Beherrschung der Konsequenzen der Gasbildung. Trotzdem wird der Indikator «Verhalten des Wirtgesteins bezüglich Gas» beim Opalinuston sowohl für HAA als auch für SMA nur mit «bedingt günstig» bewertet. Wegen der gegenüber dem Opalinuston insgesamt etwas grösseren Heterogenität (inkl. Diskontinuitäten) wird das Gas voraussichtlich etwas einfacher durch die Wirtgesteine 'Brauner Dogger', Mergel-Formationen des Helvetikums und Effinger Schichten entweichen können. Der Indikator «Verhalten des Wirtgesteins bezüglich Gas» wird bei den Mergel-Formationen des Helvetikums sowie den Effinger Schichten mit «günstig» und für die tonreichsten Abfolgen des 'Braunen Doggers' wie beim Opalinuston mit «bedingt günstig» bewertet (NAB 13-83; NTB 14-01).

Der Indikator «Verhalten des Wirtgesteins bezüglich Gas» wird von der Nagra nicht als entscheidend relevant betrachtet. Mit einer geeigneten Auslegung des Lagers kann sichergestellt werden, dass die Freisetzung von im Lager gebildetem Korrosions- und Degradationsgas keine kritische Beeinträchtigung der Barriereigenschaften der Wirtgesteine zur Folge hat. Eine entscheidende Rolle spielt dabei insbesondere die Wahl von geeigneten Verfüll- und Versiegelungsmaterialien für die Zugangsstollen (Schaffung von untertägigem Speicherraum; kontrollierte Ableitung der Gase über die Versiegelungsstrecken), da der Beitrag des Wirtgesteins zur Speicherung und Ableitung der Gase begrenzt ist (NTB 14-01). Die Nagra schlägt im Fall des SMA-Lagers ein Engineered Gas Transport System (EGTS) für die kontrollierte Abführung von im Lager gebildeten Gas vor (NAB 13-92). Weiter besteht auch die Möglichkeit zur Behandlung gewisser radioaktiver Abfälle und im Fall des HAA-Lagers zur Wahl eines anderen Behältermaterials mit geringeren Korrosionsraten (NTB 14-01). Aus Sicht der Nagra ist mithilfe dieser zusätzlichen Massnahmen der Gasdruck in einem geologischen Tiefenlager beherrschbar.

Beurteilung des ENSI

Gasbildung kann in einem Tiefenlager zu hohen Drücken führen, welche die Integrität der Barrieren beeinträchtigen kann. Deswegen sind Wirtgesteine vorteilhaft, die den Abtransport der Gase ermöglichen. Mit dem Hinweis auf verfügbare technische Massnahmen zur Beherrschung der Gasdrücke stuft die Nagra den Indikator als nicht entscheidend relevant ein.

Das ENSI stuft im Unterschied zur Nagra den Indikator als entscheidend relevant ein, da er eine Bedeutung für die Langzeitsicherheit haben kann. In Etappe 2 SGT werden für SMA-Lager unterschiedliche Wirtgesteine betrachtet, deren jeweiligen Gastransporteigenschaften zu einer differenzierten qualitativen Bewertung führen. Für HAA-Lager wird nur das Wirtgestein Opalinuston betrachtet. Technische Massnahmen können notwendig sein, um den Gasdruck in einem SMA- und HAA-Lager zu reduzieren. In diesem Fall erwartet das ENSI im Hinblick auf Etappe 3 SGT, dass die Wirksamkeit der technischen Massnahmen und ihre Konsequenzen für die Langzeitsicherheit mit einem integralen standortspezifischen Lagerkonzept detailliert aufzuzeigen sind. Für eine mögliche Differenzierung der Bedeutung des Gastransports zwischen den HAA-Standortgebieten wären standortspezifische Daten erforderlich, die derzeit nicht vorliegen. Die Bedeutung des Gastransports auf die Langzeitsicherheit ist im Hinblick auf Etappe 3 SGT standortspezifisch abzuklären.

Aus Sicht des ENSI ist Indikator 31 ein entscheidend relevanter Indikator, da unter Berücksichtigung der Ungewissheiten beim Gastransport die Barrierenwirkung des Tiefenlagers ohne technische Massnahmen beeinträchtigt werden kann und sich daraus neue Wegsamkeiten für die Radionuklide bilden können. Das ENSI stützt sich deshalb für die Bewertung des Indikators 31 «Verhalten des Wirtgesteins bezüglich Gas» nur auf die Gastransportkapazitäten der Wirtgesteine ab.

Basierend auf eigenen Berechnungen (Kapitel 3.4) kommt das ENSI zum Schluss, dass für diesen Indikator im Gegensatz zur Nagra die gesamte Abfolge des Wirtgesteins als Bewertungsobjekt zu berücksichtigen ist. Unter Berücksichtigung der Bandbreiten der Gaspermeabilität in der TA können auch die Gaspermeabilitäten in den STA und SKA eine relevante Rolle für den Gastransport im 'Braunen Dogger' spielen.

Generell ist festzuhalten, dass geklüftete Gesteine bessere Gastransporteigenschaften aufweisen als homogen poröse Gesteine. So sind z. B. in den Mergel-Formationen des Helvetikums aufgrund von verschiedenen Typen diskreter wasserführender Strukturen wie Klüfte, Störungen und Scherzonen massgebende Beiträge zum Gastransport möglich (Bewertung «sehr günstig»). Im 'Braunen Dogger' und den Effinger Schichten sind aus Sicht des ENSI die harten Bänke potenzielle wasserführende Strukturen, die das Gas abführen können (Bewertung «günstig»). Die Berechnungen des ENSI für 'Brauner Dogger' zeigen, dass die harten Bänke den Gasdruck erheblich reduzieren können (Kapitel 3.4.3). Der Opalinuston wird im Vergleich zu diesen Wirtgesteinen aufgrund der geringeren Gastransportkapazität mit «bedingt günstig» bewertet.

Generell ist festzuhalten, dass wirtgesteinsunabhängig bei einem Nachweis der Funktionsfähigkeit des EGTS oder anderer technischer Massnahmen die sicherheitstechnische Relevanz des Verhaltens des Wirtgesteins bezüglich Gas reduziert werden kann. Daher identifiziert das ENSI in Etappe 2 SGT für diesen Indikator keinen eindeutigen Nachteil für das Wirtgestein Opalinuston.

6.1.3 Entscheidend relevantes Merkmal «Explorier- und Charakterisierbarkeit der geologischen Barriere im Standortgebiet»

Für die Explorier- und Charakterisierbarkeit der geologischen Barriere im Standortgebiet ist es vorteilhaft, wenn

- die Wirtgesteineigenschaften ohne übermässig destruktive Untersuchungen ermittelt werden können,
- die Lagerungsverhältnisse und die Geometrie des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs gut explorierbar sind,
- die Beobachtungen bzw. Untersuchungen der sicherheitsrelevanten Eigenschaften räumlich inter- und extrapolierbar sind,
- Eigenschaften und Geometrie des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs über den Betrachtungszeitraum genügend zuverlässig prognostizierbar sind,
- möglichen Problemzonen und Problemgesteinen ausgewichen werden kann (ENSI 33/154).

Die Bewertungen seitens Nagra und ENSI des Merkmals und der dafür berücksichtigten Indikatoren werden in Tabelle 22 zusammengefasst und darin die sich ergebenden eindeutigen Nachteile dargestellt.

Tabelle 22: Tabellarische Zusammenstellung der Bewertungen von Nagra (N) und ENSI (E) für das entscheidrelevante Merkmal (c) «Explorier- und Charakterisierbarkeit der geologischen Barriere im Standortgebiet» und die dazugehörigen Indikatoren. *Der Bewertung des ENSI liegt im Unterschied zur Nagra der alternative Lagerperimeter HAA-ZNO-aL506-r zugrunde.

Entscheidrelevantes Merkmal / Entscheidrelevanter Indikator	SMA-SR-OPA		SMA-ZNO-OPA		SMA-NL-OPA		SMA-JO-OPA		SMA-JS-OPA		SMA-ZNO-BD		SMA-NL-BD		SMA-JS-EFF		SMA-WLB-MGL		HAA-ZNO*		HAA-NL		HAA-JO	
	N	E	N	E	N	E	N	E	N	E	N	E	N	E	N	E	N	E	N	E	N	E	N	E
c) Explorier- und Charakterisierbarkeit der geologischen Barriere im Standortgebiet	4,3	4,5	4,4	4,5	4,4	4,5	4,4	4,5	4,3	4,5	3,3	2,5	3,3	2,5	2,5	2,5	2,0	2,0	4,4	4,5	4,4	4,5	4,4	4,5
39 Variabilität der Gesteinseigenschaften im Hinblick auf ihre Charakterisierbarkeit	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5	4,1	2,5	4,1	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5
43 Explorationsverhältnisse im geologischen Untergrund	4,1	4,5	4,3	4,5	4,3	4,5	4,3	4,5	4,1	4,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	1,5	1,5	4,3	4,5	4,3	4,5	4,3	4,5

sehr günstig ($4 \leq x \leq 5$)
 günstig ($3 \leq x < 4$)
 bedingt günstig ($2 \leq x < 3$)
 ungünstig ($1 \leq x < 2$)
 ungenügend ($0 \leq x < 1$)
 eindeutiger Nachteil

Indikator 39: Variabilität der Gesteinseigenschaften im Hinblick auf ihre Charakterisierbarkeit

Angaben der Nagra

Das Bewertungsobjekt des Indikators «Variabilität der Gesteinseigenschaften im Hinblick auf ihre Charakterisierbarkeit» ist das WG-ss. Die Bewertungen erfolgen wirtgesteinsspezifisch und die Bewertungsskala ist für SMA- und HAA-Standortgebiete identisch.

Für die Wirtgesteine Opalinuston und 'Brauner Dogger' (TA-1) wird dieser Indikator in allen Standortgebieten aufgrund des homogenen Aufbaus und der lateralen Kontinuität als «sehr günstig» bewertet.

Für die Bewertung der Effinger Schichten (KMA-5) ist die Kontinuität der Schichten über mehrere km verhältnismässig gut gewährleistet. Das mässig gute Selbstabdichtungsvermögen kann eine gewisse hydraulische Wirksamkeit von allfälligen tektonisch-strukturellen Elementen zur Folge haben. Kleinere, seismisch nicht erfassbare Störungen können nicht zuverlässig lokalisiert und charakterisiert werden, so dass der Indikator mit «bedingt günstig» bewertet wird und gegenüber dem Opalinuston ein eindeutiger Nachteil entsteht (NTB 14-01).

Die Mergel-Formationen des Helvetikums sind wegen ihrer tektonischen Überprägung engräumig zerschert und verfault. Dadurch sind auch die vorhandenen Kalkbankabfolgen häufig boudiniert und auseinandergerissen (geringes Selbstabdichtungsvermögen). Eine Charakterisierbarkeit bezüglich Klüftung und kleinräumiger Strukturen und des damit verbundenen lokalisierten Wasserflusses wird wegen der Heterogenität nur als «bedingt günstig» beurteilt. Gegenüber dem Opalinuston in der Nordschweiz besteht ein eindeutiger Nachteil (NTB 14-01).

Beurteilung des ENSI

Das ENSI ist mit der wirtgesteinsspezifischen Bewertung und mit der Verwendung der gleichen Bewertungsskala für SMA- und HAA-Lager einverstanden, da die Bewertung sich an der heutigen Situation und deren Charakterisierbarkeit orientiert. Das ENSI verwendet im Gegensatz zur Nagra das Wirtgestein als Bewertungsobjekt, da die Abgrenzung eines WG-ss bereits von den methodischen Möglichkeiten einer detaillierten Charakterisierbarkeit des Wirtgesteins abhängt. Bei einer schlechten Charakterisierbarkeit eines Wirtgesteins kann auch das WG-ss kaum bis gar nicht abgegrenzt werden.

Aufgrund der lateral über grosse Distanzen prognostizierbaren Zusammensetzung, dem Fehlen hydraulisch wirksamer Bänke sowie der gut explorierbaren oberen und unteren Grenzen ist das ENSI mit der «sehr günstigen» Bewertung für den Opalinuston in allen Standortgebieten einverstanden.

Bei der Betrachtung des 'Braunen Doggers' sind die lateral schlecht korrelierbaren harten Bänke zu berücksichtigen und es resultiert eine nur «bedingt günstige» Bewertung.

Die Bewertung «bedingt günstig» ist aus Sicht des ENSI auch für die Effinger Schichten anzusetzen, da diese neben dem internen Wechsel zwischen Kalkmergeln und Mergelkalken zusätzlich Diskontinuitäten in der Ablagerung zeigen und abschnittsweise Kalkbankabfolgen auftreten. Diese sind im Unterschied zu den harten Bänken des 'Braunen Doggers' lateral besser, aber auch nur mit Unsicherheiten prognostizierbar. Diese Elemente sind für die Langzeitsicherheit relevant und sollten daher im Detail charakterisiert werden. Eine solch detaillierte Charakterisierung zur Reduktion der bestehenden Ungewissheiten ist jedoch selbst mit zusätzlichen Untersuchungen in Etappe 3 SGT nur beschränkt möglich.

Die Mergel-Formationen des Helvetikums werden seitens ENSI übereinstimmend mit der Nagra mit «bedingt günstig» bewertet. Das geologische Standortgebiet Wellenberg ist durch sehr komplexe tektonische Verhältnisse charakterisiert. Der anstehende Wirtgesteinskörper ist lithologisch heterogen und von tektonisch stark beanspruchten Zonen durchsetzt. Die Prognose der Geometrie des Faltenbaus verbleibt trotz diverser abgeteufter Bohrungen konzeptuell und ist nur beschränkt verlässlich. Eine seismische Erkundung (z. B. zum Auffinden von Fremdgesteinskörpern) ist mit den aktuell verfügbaren Techniken nur bedingt möglich.

Bei einem Vergleich mit dem Wirtgestein Opalinuston ergeben sich für alle Standortgebiete mit anderen Wirtgesteinen deutlich erhöhte Variabilitäten und damit eindeutige Nachteile gegenüber den Standortgebieten mit dem Wirtgestein Opalinuston.

Indikator 43: Explorationsverhältnisse im geologischen Untergrund

Angaben der Nagra

Mit dem Indikator «Explorationsverhältnisse im geologischen Untergrund» wird die untertägige Explorierbarkeit der räumlichen Verhältnisse mittels Seismik und Bohrungen beurteilt. Das Bewertungsobjekt ist das Wirtgestein im Lagerperimeter.

Aufgrund der seismischen Impedanzkontraste der Sedimentgesteinsabfolgen unterhalb und in reduzierter Qualität auch oberhalb des Opalinustons können die Untergrenzen und teilweise auch die Obergrenzen der Wirtgesteinskörper und die Lage von Störungszonen mit einem Versatz von 10 bis 20 m mittels 2D-/3D-Seismik zuverlässig erfasst werden. Dieser Indikator wird für den Opalinuston für alle Lagerperimeter als «sehr günstig» bewertet.

Die für die Barrierenwirkung des 'Braunen Doggers' und der Effinger Schichten wichtigen Explorationsziele, nämlich die zuverlässige Erkundung der Lage und der Nachweis der fehlenden Kontinuität von «harten Bänken» sowie die Abwesenheit auch von kleinen Versätzen in den «harten Bänken», können mit reflexionsseismischen Methoden wegen der variablen und relativ geringen Mächtigkeiten und den relativ geringen Impedanzkontrasten nicht zuverlässig erreicht werden. Deshalb wird der Indikator für den 'Brauner Dogger' und die Effinger Schichten mit «bedingt günstig» bewertet.

Aufgrund fehlender seismischer Impedanzkontraste, des starken topographischen Reliefs und der unregelmäßigen Lockergesteinsbedeckung sind für die Mergel-Formationen des Helvetikums im Standortgebiet Wellenberg keine belastbaren Ergebnisse erzielbar. Aus diesen Gründen wird der Indikator «Explorationsverhältnisse im geologischen Untergrund» als «ungünstig» bewertet.

Die Nagra stuft für die Lagerperimeter mit den Wirtgesteinen 'Brauner Dogger' und Effinger Schichten die Schwäche bei der Erkundung der «harten Bänke» als eindeutigen Nachteil gegenüber dem Opalinuston ein. Aufgrund der problematischen Erkundung der Wirtgesteinsgeometrie und Lokalisierung von möglichen Fremdgesteinseinschlüssen und anordnungsbestimmenden Störungen stuft die Nagra die Schwäche für die Mergel-Formationen des Helvetikums im Standortgebiet Wellenberg ebenfalls als eindeutigen Nachteil gegenüber dem Opalinuston ein.

Beurteilung des ENSI

Das ENSI kann die Bewertung des Indikators durch die Nagra nachvollziehen und ist mit dem Bewertungsobjekt WG einverstanden. Hinsichtlich Opalinuston ist der Markerhorizont Top Lias gut erkennbar. Erfahrung aus der 3D-Seismik des Züricher Weinlandes zeigen, dass der Top Opalinustons näherungsweise kartierbar ist. Die den 'Braunen Dogger' und die Effinger Schichten begrenzenden Markerhorizonte near Top Effinger Schichten (nTEff) und Basis Malm (BMA) sind vergleichsweise weniger gut abbildbar. Zudem zeigen die Studien zur reflexionsseismischen Analyse des 'Braunen Doggers' (NAB 14-58) und der Effinger Schichten (NAB 14-57), dass die seismischen Faziesräume zwar grob abgeschätzt werden können, einzelne «harte Bänke» jedoch weder direkt mit der Seismik, noch indirekt über die seismische Fazies abbildbar sind. Die Kenntnis ihrer Lage wäre jedoch von grosser Wichtigkeit für die Platzierung der Lagerkammern innerhalb dieser Wirtgesteine. Da mit zusätzlichen Bohrungen die laterale Ausdehnung einzelner «harter Bänke» nicht zuverlässig bestimmt werden kann, bleibt diese Ungewissheit in Etappe 3 SGT bestehen. Daher werden die Wirtgesteine 'Brauner Dogger' und Effinger Schichten mit «bedingt günstig» bewertet.

Aufgrund der Ergebnisse aus der Reprozessierung der 2D-Seismikdaten im Standortgebiet Wellenberg kann das ENSI die «ungünstige» Bewertung der Nagra nachvollziehen. Auch die Berücksichtigung einer möglichen untertägigen Exploration (Sondierstollen) ändert aufgrund der räumlich beschränkt belastbaren Aussagen nichts an dieser Bewertung.

Das ENSI stimmt der fachlichen Einschätzung dieses Indikators durch die Nagra zu und stuft wie die Nagra die «Explorationsverhältnisse im geologischen Untergrund» für die Lagerperimeter mit Wirtgestein 'Brauner Dogger', Effinger Schichten und Mergel-Formationen des Helvetikums als eindeutige Nachteile ein. Auch unter Berücksichtigung weiterer Untersuchungen in Etappe 3 SGT bleiben die eindeutigen Nachteile gegenüber dem Wirtgestein Opalinuston bestehen, da die Abbildbarkeit der relevanten Markerhorizonte geringer als bei den Opalinuston begrenzenden Markerhorizonten ist und die «harten Bänke» bzw. tektonisch beanspruchten Zonen nicht zuverlässig abbildbar sind.

6.1.4 Entscheidrelevantes Merkmal «Bautechnische Machbarkeit eines Tiefenlagers unter Berücksichtigung der vorgeschlagenen Standortareale»

Für die bautechnische Machbarkeit eines Tiefenlagers unter Berücksichtigung der vorgeschlagenen Standortareale ist es vorteilhaft, wenn

- bautechnisch einfach beherrschbare Verhältnisse vorliegen, bei denen sich bei der Erstellung, beim Betrieb, bei der Überwachung oder beim Verschluss des Lagers keine extremen Anforderungen ergeben,
- der Verschluss der Lagerteile ohne technische Schwierigkeiten realisiert werden kann,
- keine wesentlichen hydrogeologischen und geotechnischen Gefährdungen oberhalb der Lagerebene zu erwarten sind (ENSI 33/154).

Die Bewertungen dieses Merkmals und der dafür berücksichtigten Indikatoren seitens Nagra und ENSI und die sich daraus ergebenden eindeutigen Nachteile werden in Tabelle 23 zusammengefasst dargestellt.

Tabelle 23: Tabellarische Zusammenstellung der Bewertungen von Nagra (N) und ENSI (E) für das entscheidungsrelevante Merkmal (d) «Bautechnische Machbarkeit eines Tiefenlagers unter Berücksichtigung der vorgeschlagenen Standortareale» und die dazugehörigen Indikatoren. *Der Bewertung des ENSI liegt im Unterschied zur Nagra der alternative Lagerperimeter HAA-ZNO-aL506-r zugrunde.

Entscheidungsrelevantes Merkmal / Entscheidungsrelevanter Indikator	SMA-SR-OPA		SMA-ZNO-OPA		SMA-NL-OPA		SMA-JO-OPA		SMA-JS-OPA		SMA-ZNO-BD		SMA-NL-BD		SMA-JS-EFF		SMA-WLB-MGL		HAA-ZNO*		HAA-NL		HAA-JO	
	N	E	N	E	N	E	N	E	N	E	N	E	N	E	N	E	N	E	N	E	N	E	N	E
d) Bautechnische Machbarkeit eines Tiefenlagers unter Berücksichtigung der vorgeschlagenen Standortareale	3.1	2.5	3.5	2.5	1.3	2.5	3.5	2.5	2.9	2.5	3.5	2.5	2.1	2.5	2.9	2.5	2.7	2.5	3.5	2.5	1.5	2.5	4.1	2.5
1 Tiefenlage im Hinblick auf bautechnische Machbarkeit (u.B. Gesteinsfestigkeiten und Verformungseigenschaften)	4.7	2.5	3.5	2.5	1.3	2.5	3.5	2.5	3.5	2.5	3.5	2.5	2.1	2.5	3.5	2.5	2.7	2.5	3.5	2.5	1.5	2.5	4.1	2.5
48 Geotechnische und hydrogeologische Verhältnisse in überlagernden Gesteinsformationen	3.5	2.5	3.5	2.5	3.5	2.5	4.3	3.5	2.9	2.5	3.5	2.5	3.5	2.5	2.9	2.5	4.1	2.5	3.5	2.5	3.5	2.5	4.3	3.5
8 Platzangebot untertags	3.1	3.5	4.1	4.5	2.1	3.5	4.7	4.5	3.3	4.5	4.5	4.5	2.1	3.5	3.3	4.5	3.1	3.5	3.5	3.5	2.5	3.5	4.1	4.5

 sehr günstig ($4 \leq x \leq 5$)	 günstig ($3 \leq x < 4$)	 bedingt günstig ($2 \leq x < 3$)	 ungünstig ($1 \leq x < 2$)	 ungenügend ($0 \leq x < 1$)	 eindeutiger Nachteil
-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	---------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-----------------------------------------------------------------------------------------------------------

Indikator 1: Tiefenlage im Hinblick auf bautechnische Machbarkeit (u. B. Gesteinsfestigkeiten und Verformungseigenschaften)

Angaben der Nagra

Die maximale Tiefenlage der Lagerebene ist massgebend für die Beurteilung der geotechnischen Bedingungen und die damit verbundene mögliche Schädigung der geologischen und technischen Barrieren (NTB 14-01).

Die Bewertungsskala des Indikators 1 wird an die Erfordernisse für die Etappe 2 SGT angepasst (auf Optimierung ausgerichtete Zielwerte für die Abgrenzung optimierter Lagerperimeter, differenziertere Bewertung der resultierenden Lagerperimeter) (NAB 17-01, Frage 44). In Etappe 2 SGT wird angestrebt, die Tiefe der Lagerebene auf 600 m u. T. (SMA-Lager, Standortgebiete der Nordschweiz) bzw. 700 m u. T. (HAA-Lager) zu beschränken (NAB 14-81). Mit diesen Optimierungsanforderungen wird erreicht, dass die Gebirgsstörung bzw. Gebirgsschädigung auch im direkten Umfeld der Lagerkammern bzw. der Versiegelungsstrecken beschränkt bleibt. Weiter wird mit diesen Optimierungsanforderungen auch erreicht, dass unter Berücksichtigung der Ungewissheiten bei Änderung der geotechnischen Randbedingungen (Gebirgseigenschaften, in situ Gebirgsspannungen, Orientierung der Hohlräume im in situ Gebirgsspannungsfeld) die Gebirgsstörung weiterhin im zulässigen Mass beschränkt bleibt, da in diesen Tiefenlagen das Tragverhalten des Gebirges nicht sehr sensitiv reagiert (NAB 14-81). Für das Standortgebiet Wellenberg wird die Bewertungsskala aus Etappe 1 SGT (NTB 08-05) beibehalten.

Gemäss den Sensitivitätsanalysen für die Bewertung des mFE bzgl. alternativer Lagerperimeter und Konzeptualisierung (NTB 14-01) kann beim Standortgebiet Nördlich Lägern die angestrebte maximale Tiefe der Lagerebene eines SMA-Lagers bzw. eines HAA-Lagers von ca. 600 m u. T. bzw. ca. 700 m u. T. nicht eingehalten werden bzw. bleibt das Platzangebot in bevorzugter Tiefenlage ungenügend. Zwar können mit alternativen Annahmen bei der Abgrenzung der Lagerperimeter die Platzverhältnisse teilweise etwas verbessert werden, allerdings auf Kosten der bevorzugten maximalen Tiefenlage, d. h. mit ungünstigeren Bewertungen für Indikator 1. So ergibt sich für ein SMA-Lager bzw. ein HAA-Lager im Standortgebiet Nördlich Lägern erst bei einer Lagerebene in

800 m u. T. bzw. 900 m u. T. ein Lagerperimeter von knapp ausreichender Grösse (NTB 14-01). Selbst unter Annahme eines weniger tief liegenden Wirtgesteins (Berücksichtigung der Ungewissheiten in der Tiefenlage) kann die angestrebte maximale Tiefe nicht eingehalten werden (NTB 14-01). Die für den mFE identifizierten eindeutigen Nachteile des Standortgebiets Nördlich Lägern bleiben auch für alternative Annahmen bei der Abgrenzung der Lagerperimeter und unter Berücksichtigung der Ungewissheiten bezüglich der Tiefenlage bestehen.

Die Nagra bewertet den Indikator 1 für das SMA-Standortgebiet Südranden als «sehr günstig», für die SMA-Standortgebiete Zürich Nordost, Jura Ost und Jura-Südfuss als «günstig», Nördlich Lägern als «bedingt günstig» (WG 'Brauner Dogger') bzw. «ungünstig» (WG Opalinuston) und Wellenberg als «bedingt günstig». Bezüglich der HAA-Standortgebiete bewertet die Nagra den Indikator 1 für das Standortgebiet Jura Ost als «sehr günstig», für das Standortgebiet Zürich Nordost als «günstig» und für das Standortgebiet Nördlich Lägern als «ungünstig» (NTB 14-01; NAB 16-41).

Im Rahmen der Beantwortung der vom ENSI gestellten Frage 81 (NAB 17-01) hat die Nagra einen alternativen HAA-Lagerperimeter (HAA-ZNO-aL506-r) im Standortgebiet Zürich Nordost mit einer maximalen Tiefe der Lagerebene von 800 m u. T. abgegrenzt und den Indikator 1 für diesen Lagerperimeter als «bedingt günstig» bewertet.

Aus Sicht der Nagra bestätigen die im Rahmen der Nachforderung des ENSI (ENSI 33/476) durchgeführten Untersuchungen zur Tiefe der Lagerebene unter Terrain die früher vorgenommenen Bewertungen: Die aus Sicht der Bautechnik bevorzugte Tiefenlage für ein HAA-Lager ist 700 m u. T. oder weniger, diejenige für ein SMA-Lager 600 m u. T. oder weniger. Aus Sicht der Nagra gibt es deshalb keinen Grund, die Bewertungsskala des Indikators 1 anzupassen (NAB 16-41).

Falls die Notwendigkeit besteht, das Lager tiefer als 700 m u. T. (HAA-Lager) bzw. 600 m u. T. (SMA-Lager) anzuordnen, ist aus Sicht der Nagra in einem geeigneten Standortgebiet die Sicherheit und technische Machbarkeit voraussichtlich auch bis zu einer maximalen Tiefenlage von 900 m u. T. (HAA-Lager) bzw. 800 m u. T. (SMA-Lager) gegeben. Dies ist in Übereinstimmung mit den Aussagen zu den in Etappe 1 SGT vorgeschlagenen und vom Bundesrat genehmigten Standortgebieten. Diese Tiefen sind auch in Übereinstimmung mit den in Etappe 1 und Etappe 2 SGT verwendeten Mindestanforderungen bzw. verschärften Anforderungen (NAB 16-41).

Die im Rahmen der Nachforderung des ENSI überarbeiteten geomechanischen Grundlagen des Opalinustons und ihre Herleitung sind im NAB 16-43 ausführlich beschrieben. Basierend auf bestehenden empirischen und experimentellen Erfahrungen und Messungen sowie dem entwickelten konzeptionellen Modell werden drei Gebirgsmodelle oder geomechanische Parametersätze des Opalinustons (GMref, GMmax und GMmin) für die geomechanische Analyse des Gebirgs- und Systemverhaltens vorgeschlagen, welche sowohl die Ungewissheiten als auch die Abhängigkeit von der Tiefenlage und den Einfluss der tektonischen Überprägung berücksichtigen (NAB 16-45).

Auf Basis des heutigen Kenntnisstands verbleiben Ungewissheiten betreffend der tatsächlichen Baugrundverhältnisse in den Lagerperimetern. Diese Ungewissheiten werden durch die Berücksichtigung von Bandbreiten abgedeckt. Als Grundlage für die qualitativen und quantitativen Analysen und Bewertungen werden die geologischen Informationen in Baugrundmodelltypen BGM-1, BGM-2 und BGM-3 zusammengefasst (NAB 16-45), denen je ein geomechanischer Parametersatz GMmax, GMref bzw. GMmin zugeordnet wird.

Die Bedingungen im Standortgebiet Nördlich Lägern werden für die zuverlässige Verwendung des von der Nagra für den Bau der HAA-Lagerstollen bevorzugten Vortriebsverfahrens (offene TBM mit Gripper) und für den zuverlässigen und qualitativ befriedigenden Einbau der Zwischensiegel in den HAA-Lagerstollen im Vergleich zu den Bedingungen in den Standortgebieten Zürich Nordost (ZNO) und Jura Ost (JO) u. a. aus folgenden Gründen als weniger günstig beurteilt (NAB 16-45):

- Die Untersuchungen zeigen, dass trotz tiefenabhängiger Verbesserung der Gebirgseigenschaften das Gebirgsverhalten mit der Tiefe deutlich ungünstiger wird.
- Die grosse Tiefe der Lagerebene im Standortgebiet Nördlich Lägern führt voraussichtlich zu Veränderungen im konturnahen Wirtgestein der Lagerkammern, welche für die technischen Barrieren und das Wirtgestein nachteilig sind (Auflockerung, verdeckte Hohlräume hinter dem Ausbau).

- Die grössere Tiefenlage im Standortgebiet Nördlich Lägern in Kombination mit dem Baugrundmodelltyp BGM-2 und insbesondere mit dem Baugrundmodelltyp BGM-3 ist mit dem bevorzugten Vortriebsverfahren (TBM mit Gripper) nur mit Vorbehalten zuverlässig machbar. Es ist nicht auszuschliessen, dass die Maschine während eines signifikanten Teils des Vortriebs unbefriedigende Leistungen infolge Ablösungen im Maschinenbereich erbringt.
- Falls als Folge davon ein TBM-Schildvortrieb mit Tübbingausbau gewählt werden müsste, sind die Nachteile aus Sicht Langzeitsicherheit bezüglich verbleibender Hohlräume hinter dem Tübbingausbau sowie höherer Zementmengen in Kauf zu nehmen.
- Zwischensiegel mit Stahlbögen erfordern in der grossen Tiefe aus statischen Gründen eventuell einen kleinen Bogenabstand, womit die anforderungsgemässe Funktion der Zwischensiegel in Frage gestellt wäre.
- Der im Standortgebiet Nördlich Lägern fehlende Handlungsspielraum und die fehlende Möglichkeit, mit oder ohne Nutzung der zu meidenden tektonischen Zone, basierend auf den Resultaten zukünftiger Untersuchungen, bei Bedarf die maximale Tiefenlage reduzieren zu können, werden als wenig günstig eingestuft.

Für die Ausnutzung des Platzangebotes für das SMA-Lager wird der Kavernenquerschnitt Typ K09 bevorzugt. Dieser Querschnitt ist nur im Teilausbruch mit Vortrieb des oberen Abschnitts der Kaverne (Kalottenvortrieb) und anschliessender Aufweitung von den mittleren und unteren Abschnitten der Kaverne (Strosse und Sohle) machbar. Der bei ungünstigen geotechnischen Bedingungen bevorzugte Vortrieb im Vollausschub mit raschem Ringschluss ist nur mit kleinen Lagerkavernen (Profil K04a oder K04) umsetzbar. Für den Bau des bevorzugten Kavernenquerschnitts K09 werden die Bedingungen im Standortgebiet Nördlich Lägern im Vergleich zu den Bedingungen in den Standortgebieten Zürich Nordost und Jura Ost u. a. aus folgenden Gründen als weniger günstig beurteilt (NAB 16-45):

- Die grössere Tiefe der Lagerebene im Standortgebiet Nördlich Lägern in Kombination mit dem Baugrundmodell BGM-2 und BGM-3 ist aufgrund der tunnelstatisch ungünstigen Zwischenbauzustände (Verstärkung des Kalottenfussbereichs) nur mit grossen Vorbehalten machbar (erhebliches Risiko von grossen Auflockerungen und Verformungen bei der Verstärkung des Kalottenfussbereichs, unbefriedigende Leistungen aufgrund reduzierter Abschlagslängen und zusätzlicher Ausbaustärke im Endausbau, grosse vertikale Ausdehnung der plastischen Zone).
- Die Verwendung des auf die Tiefe angepassten kleineren Profiltyps K04a oder K04 erfordert zwei- bis dreifach grössere Kavernenlänge und einen entsprechend grösseren Platzbedarf.
- Die grössere Tiefenlage im Standortgebiet Nördlich Lägern führt zu grösserer zeitabhängiger Beanspruchung des Endausbaus während der Einlagerung, welche das Risiko von Ausbauverformungen und Betonabplatzungen und damit einhergehender Behinderung der Einlagerung (Verformung Kranbahn, Schleusentore, Unterhalt während Einlagerung etc.) erhöht.
- Im Falle einer Rückholung nach Einlagerung besteht ein erhöhtes Risiko, dass der Ausbau keine ausreichende Tragfähigkeit für die zuverlässige Rückholung mehr aufweist.

Nach Beurteilung der relevanten Aspekte bezüglich der Projektkonzepte der Lagerkammer und Versiegelungsstrecken, einschl. der Bauverfahren und Ausbaukonzepte, sowie im Hinblick auf Indikator 1 ergeben sich folgende Bewertungen für das HAA-Lager (NAB 16-41):

- Das Standortgebiet Nördlich Lägern hat bezüglich Baugrundmodelltypen und geologischer Gefährdungsbilder auch als Folge der tektonischen Überprägung im Vergleich zum Standortgebiet Zürich Nordost Nachteile; im Vergleich zum Standortgebiet Jura Ost ist das Standortgebiet Nördlich Lägern jedoch etwa gleichwertig zu bewerten.
- Bezüglich Tiefenlage hat das Standortgebiet Nördlich Lägern im Vergleich zu den Standortgebieten Zürich Nordost und Jura Ost klare Nachteile.

- Weiter ist davon auszugehen, dass für das bevorzugte Bauverfahren (TBM mit Gripper) das Standortgebiet Nördlich Lägern gegenüber den Standortgebieten Zürich Nordost und Jura Ost Nachteile hat; die Tiefenlage und die Baugrundmodelltypen lassen dort deutlich schwierigere Bedingungen erwarten.
- Bezüglich möglicher Veränderungen im konturnahen Wirtgestein (Auflockerung, verdeckte Hohlräume hinter dem Ausbau) wird das Standortgebiet Nördlich Lägern im Vergleich zu den Standortgebieten Zürich Nordost und Jura Ost wegen der grösseren Tiefenlage bzw. den erwarteten Baugrundmodelltypen (Einfluss der tektonischen Überprägung) als nachteilig bewertet.
- Die grosse Tiefenlage im Standortgebiet Nördlich Lägern führt auch bezüglich der mit der Tiefe zunehmenden Gebirgstemperatur zu einem Nachteil.
- Ein Ausweichen der Lagerkammern in die zu meidende tektonische Zone in Standortgebiet Nördlich Lägern würde zwar zu einer Reduktion der Tiefenlage führen, aber gleichzeitig ungünstigere Gebirgseigenschaften ergeben (NAB 16-41, Fussnote 103).

Der Vergleich zeigt, dass insbesondere die grosse Tiefenlage für das Standortgebiet Nördlich Lägern von Nachteil ist. Beim HAA-Lager könnte einzig die Forderung nach einer grösseren Tiefe der Lagerebene als 700 m u. T. zum besseren Schutz vor Erosion dazu führen, die grosse Tiefenlage im Standortgebiet Nördlich Lägern nicht als eindeutigen Nachteil einzustufen. Beim SMA-Lager (Betrachtungszeitraum 100 000 Jahre) stellt sich die Frage der Verletzung des Lagers infolge glazialer Übertiefung einer Rinne nicht. Aus diesen Gründen bestehen aus Sicht der Nagra sowohl für das HAA- als auch das SMA-Lager eindeutige Nachteile für das geologische Standortgebiet Nördlich Lägern.

Die Kritikpunkte der Nachforderung in ENSI 33/476 gelten für die Standortgebiete der Nordschweiz. Das Standortgebiet Wellenberg (WLB) wird deshalb in den eingereichten Unterlagen zur Nachforderung nicht behandelt. In Etappe 2 SGT wird auch das Standortgebiet WLB im Rahmen der generellen vertieften Untersuchung der Erosionsprozesse detaillierter betrachtet. Lagerebenen deutlich tiefer als die Talebene wurden deshalb in die Analyse einbezogen (NAB 17-01, Frage 79).

Im NTB 14-01 bewertet die Nagra den Indikator 1 beim Standortgebiet Wellenberg mit «bedingt günstig» und formuliert für diesen Indikator einen Hinweis auf einen eindeutigen Nachteil. Er wird aber nicht als eindeutiger Nachteil für Indikator 1 eingestuft, da die Erstellung und der Betrieb der SMA-Lagerkammern angesichts der im Vergleich mit dem Opalinuston höheren Gesteinsfestigkeit der Mergel-Formationen des Helvetikums auch in grösseren Tiefen zuverlässig und sicher gewährleistet werden können (NTB 14-01). Die Erfahrungen beim Bau des Seelisbergtunnels und des Lötschberg-Basistunnels durch die Mergel-Formationen des Helvetikums zeigen, dass die aufgetretenen bautechnischen Schwierigkeiten mit den gewählten Baumethoden und Ausbruchssicherungsmaßnahmen gut beherrscht werden konnten. Deshalb führen die gewählten Lagertiefen von mehr als 800 m u. T. (935 und 1139 m u. T.) in diesem Standortgebiet zu keinem Ausschluss wegen der Verletzung der Mindestanforderungen bzgl. des Indikators 1. Die grosse Tiefe wird jedoch bei der Bewertung («bedingt günstig») berücksichtigt (NAB 14-81; NAB 17-01, Frage 79).

Beurteilung des ENSI

Die relevanten Grundlagen für die Beurteilung der Tiefenlage und der bautechnischen Machbarkeit der Lagerkammer in den HAA- und SMA-Standortgebieten werden in den Kapiteln 2.9 (Wirtgestein Opalinuston) und 2.10 (Wirtgesteine 'Brauner Dogger', Effinger Schichten und Mergel-Formationen des Helvetikums) beurteilt. Dabei werden auch die von der Nagra im Rahmen der Nachforderung des ENSI (ENSI 33/476) eingereichten Unterlagen berücksichtigt.

Die nachfolgenden Beurteilungen beziehen sich zunächst auf die HAA- und SMA-Standortgebiete der Nordschweiz unter Berücksichtigung des Wirtgesteins Opalinuston (Kapitel 2.9). Danach werden die Angaben der Nagra bzgl. des SMA-Standortgebiets Wellenberg mit dem Wirtgestein Mergel-Formationen des Helvetikums beurteilt (Kapitel 2.10). Im Anschluss wird eine gesamthafte Beurteilung für alle HAA- und SMA-Standortgebiete der Nordschweiz unter Berücksichtigung aller Wirtgesteine vorgenommen.

Die Schlussfolgerungen und Beurteilungen der Nagra im NAB 16-45 und NAB 16-41 bezüglich der Tiefe der Lagerebene und der geotechnischen Bedingungen im Standortgebiet Nördlich Lägern für den Bau der HAA-Lagerstollen und SMA-Kavernen basieren vor allem auf felsmechanischen Berechnungen mit den Gebirgsmodellen (Parametersätzen) GMmin und GMref des Opalinustons. Die Annahme der Nagra, dass das Gebirgsmodell GMmax irrelevant für ihre felsmechanischen Berechnungen ist (NAB 16-45; NAB 16-44), ist nach Einschätzung des ENSI aufgrund der vorliegenden Daten nicht nachvollziehbar (Kapitel 2.9).

Mit der Einstufung des Gebirgsmodell GMmax als nicht relevant hat die Nagra einen grossen Teil der durch die drei Gebirgsmodelle (GMmax, GMref, GMmin) gegebenen Bandbreite der geomechanischen Parameter des Opalinustons aus ihren felsmechanischen Betrachtungen ausgeschlossen. Damit wird den Ungewissheiten bezüglich des Materialverhaltens nicht mit einer ausreichend grossen Bandbreite der geomechanischen Parameter Rechnung getragen (ENSI 33/461). Für das Gebirgsmodell GMmax liegen in den abgegebenen Berichten keine Berechnungen vor, obwohl dieser Parametersatz die wenigen zuverlässigen, für den relevanten Tiefenbereich von 600 m bis 900 m massgebenden Triaxial- und Ödometersversuche am besten wiedergibt (ENSI 33/531).

Das von der Nagra als massgebend oder «abdeckend für die Prüfung der Machbarkeit» eingestufte Gebirgsmodell GMmin (Baugrundmodelltyp BGM-3) ist nach heutigem Stand der Kenntnisse bezüglich der effektiven Festigkeiten und der Steifigkeiten des Opalinustons in den Standortgebieten aus Sicht des ENSI als zu konservativ zu bezeichnen (Kapitel 2.9).

Die meisten felsmechanischen Berechnungen zur Beurteilung des Einflusses der Tiefenlage auf das druckhafte Gebirgsverhalten und das Systemverhalten (Tragwerksanalyse) wurden unter der Annahme des Gebirgsmodells GMmin (Baugrundmodell BGM 3a) durchgeführt (NAB 16-45). Bei diesen Berechnungen hat die Nagra verschiedene konservative Annahmen für die Gebirgskennwerte getroffen (Festigkeit isotrop gemäss Eigenschaften entlang der Schichtung, Steifigkeit isotrop gemäss Eigenschaften senkrecht zur Schichtung), die sehr ungünstig sind. Die Annahme des Gebirgsmodells GMmin als «abdeckend für die Prüfung der Machbarkeit» sowie weitere von der Nagra getroffene konservative Annahmen zur Vereinfachung des Berechnungsmodells (also eine Anhäufung konservativer Annahmen) ist aus Sicht des ENSI sinnvoll für die Prüfung der Machbarkeit eines Standortgebiets, jedoch nicht um eindeutige Nachteile eines Standortgebiets gegenüber anderen Standortgebieten nachzuweisen (ENSI 33/531).

Die wenigen von der Nagra durchgeführten felsmechanischen Berechnungen unter Annahme des Gebirgsmodells GMref (Baugrundmodell BGM-2) zur Beurteilung des Einflusses der Tiefenlage auf das druckhafte Gebirgsverhalten (NAB 16-45; Itasca 2016) enthalten zusätzlich zu den für GMmin getroffenen konservativen Annahmen weitere konservative (ungünstige) Annahmen (Festlegung des Übergangs von der Höchst- zur Restfestigkeit, Festlegung bzw. Anwendung des E-Moduls im Nachbruchbereich für das gesamte Gebirge). Aufgrund dieser Vorgehensweise gehen die Unterschiede zwischen den Gebirgsmodellen GMref und GMmin verloren, wodurch die damit erzielten Berechnungsergebnisse praktisch übereinstimmen. Somit sind das verwendete Berechnungsmodell bzw. die vereinfachenden Annahmen ungeeignet, um den Einfluss der unterschiedlichen Materialparameter auf das druckhafte Gebirgsverhalten zu erfassen (ENSI 33/531).

Die von der Nagra getroffenen Annahmen führen aus Sicht des ENSI zur Überschätzung der Gebirgsverformungen im Umfeld der Lagerkammern. Diese Überschätzung der Gebirgsverformungen wirkt sich unmittelbar auf die Dimensionierung des Ausbaus der Lagerkammern aus und beeinflusst weitere damit zusammenhängende Beurteilungen der Nagra im NAB 16-45 und NAB 16-41.

Das ENSI kommt zum Schluss, dass die Nagra den Einfluss der Bandbreite der geomechanischen Parameter stark unterschätzt bzw. im Vergleich dazu den Einfluss der Tiefenlage stark überschätzt. Eine von den Experten des ENSI durchgeführte Sensitivitätsstudie folgert, dass rechnerisch der Einfluss der möglichen Materialeigenschaften (GMmin bis GMmax) bedeutender ist als der Einfluss der Tiefenlage (ENSI 33/531).

Die Nagra basiert ihre Beurteilungen bzgl. der Tiefenlage für den Bau der HAA-Lagerstollen auch auf der von ihr bevorzugten Vortriebsmethode (offene TBM mit Gripper) und einem Ausbau mit bewehrtem Spritzbeton (NAB 16-45). Das ENSI erachtet diese Vorfestlegung als verfrüht und nicht stufengerecht in der aktuellen Projektphase.

Der Einbau von Zwischensiegeln in den HAA-Lagerstollen wird einerseits im NAB 16-45 als Argument für die Benachteiligung des Standortgebiets Nördlich Lägern und folglich als Argument für die Begrenzung der maximalen Tiefenlage der HAA-Lagerstollen benutzt, andererseits im NAB 16-41 bzw. NAB 16-42 als nicht zwingend notwendig dargestellt. Das ENSI kann deshalb die Schlussfolgerungen der Nagra im NAB 16-45 bezüglich der Zwischensiegel zum Nachteil vom Standortgebiet Nördlich Lägern nicht nachvollziehen.

Bezüglich der Gebirgstemperatur bestehen aus Sicht des ENSI gegenwärtig Ungewissheiten, die in Etappe 3 SGT anhand der geplanten erdwissenschaftlichen Untersuchungen reduzierbar sind. Die Konsequenzen der Gebirgstemperatur für Bau und Betrieb eines Tiefenlagers sollen in Etappe 3 SGT unter anderem auch durch ein standortspezifisches Lüftungs- und Ventilationskonzept abgeklärt werden. Die möglichen Auswirkungen auf die Langzeitsicherheit sind darzulegen. Aus diesen Gründen stimmt das ENSI der Aussage der Nagra nicht zu, dass die grössere Tiefenlage und die allfällig höhere Gebirgstemperatur im Standortgebiet Nördlich Lägern zwingend zu einem Nachteil führen.

Beim SMA-Standortgebiet Wellenberg werden die Mindestanforderungen aus Etappe 1 SGT bezüglich des Indikators 1 bei zwei von den drei definierten Lagerebenen nicht eingehalten, weil diese tiefer als 800 m u. T. liegen. Allerdings ist auch das ENSI aufgrund der Angaben der Nagra im NAB 14-81, NTB 14-01 und NAB 17-01 (Frage 79) der Ansicht, dass die Erstellung der Lagerkammer in den Mergel-Formationen des Helvetikums auch in grösseren Tiefen als 800 m u. T. grundsätzlich bautechnisch machbar ist (Kapitel 2.10). Deshalb bewertet das ENSI den Indikator 1 für das SMA-Standortgebiet Wellenberg als «bedingt günstig» und weist, wie die Nagra, keinen eindeutigen Nachteil aus.

Generell bestätigt das Vorgehen der Nagra, unter Einbezug überwiegend konservativer geomechanischer Grundlagen und vereinfachter Berechnungsannahmen die bautechnische Machbarkeit an allen Standortgebieten der Nordschweiz mit dem Wirtgestein Opalinuston. Das ENSI beurteilt die dazu verwendeten technisch-wissenschaftlichen Grundlagen im Sinn rein bautechnischer Machbarkeitsüberlegungen als ausreichend. Für die quantitative Beurteilung der Tiefenlage und für den Nachweis eindeutiger Nachteile eines Standortgebiets aus bautechnischer Sicht ist die geologisch-geotechnische Grundlage jedoch nicht belastbar (Kapitel 2.9). Aus diesen Gründen stimmt das ENSI den Schlussfolgerungen der Nagra zur Begrenzung der Tiefenlage auf 600 m u. T. bzw. 700 m u. T. für SMA- bzw. HAA-Lager nicht zu. Aufgrund der fehlenden Nachvollziehbarkeit der von der Nagra verwendeten tiefenabhängigen Bewertungsskala für den Indikator 1 (NTB 14-01; NAB 17-01, Frage 44) und der Beurteilungen im Kapitel 2.9 bzgl. des Wirtgesteins Opalinuston und im Kapitel 2.10 bzgl. der Wirtgesteine 'Brauner Dogger' und Effinger Schichten bewertet das ENSI den Indikator 1 für alle HAA- und SMA-Standortgebiete der Nordschweiz einheitlich mit «bedingt günstig».

Eindeutige Nachteile für die Standortgebiete in der Nordschweiz bezüglich der Tiefen der Lagerebene können nicht identifiziert werden. Das ENSI sieht die bautechnische Machbarkeit eines HAA-Lagers bzw. eines SMA-Lagers in der Nordschweiz unter Berücksichtigung aller Wirtgesteine bis zu einer Tiefe der Lagerebene von 900 m u. T. (HAA-Lager) bzw. 800 m u. T. (SMA-Lager), gemäss den weiterhin gültigen Mindestanforderungen aus Etappe 2 SGT, basierend auf den aktuellen Grundlagen, als gegeben an.

Indikator 48: Geotechnische und hydrogeologische Verhältnisse in überlagernden Gesteinsformationen

Angaben der Nagra

Mit dem Indikator 48 werden die geotechnischen und hydrogeologischen Verhältnisse in den überlagernden Gesteinsformationen im Hinblick auf die bautechnische Machbarkeit der Zugangsbauwerke zum geologischen Tiefenlager beurteilt. Diese Verhältnisse bestimmen die bautechnischen Möglichkeiten (Ausbruchquerschnitt, Sicherungsmittel, Wahl der Baumethode etc.), um die erforderlichen Zugangsbauwerke zuverlässig erstellen, betreiben und wieder verfüllen zu können (NTB 08-05).

Die Bewertungsskala des Indikators wurde in Etappe 2 SGT präzisiert und ist für SMA- und HAA-Lager identisch (NAB 17-01, Frage 44). Für die in Etappe 2 SGT von der Nagra bezeichneten Standortareale und die abgegrenzten Lagerperimeter wurden bautechnische Risikoanalysen für die Zugangsbauwerke durchgeführt,

die auf modellhaft festgelegten Zugangskorridoren beruhen (NAB 14-50). Die Resultate dieser bautechnischen Risikoanalysen fliessen in die Bewertung ein und ergeben eine differenziertere Bewertung dieses Indikators im Vergleich zur Etappe 1 SGT. Es werden keine Mindestanforderungen und keine verschärften Anforderungen an diesen Indikator gestellt (NTB 08-05). Bewertungsobjekt ist der einschlusswirksame Gebirgsbereich (EG) im Lagerperimeter (LP) (NTB 14-01).

Die Ergebnisse der Bewertung des Indikators 48 für die SMA-Lagerperimeter werden in NTB 14-01, Kapitel 4.4.3, erläutert und in NTB 14-01, Tab. 4.4-2, zusammengefasst. Die SMA-Lagerperimeter Südranden (SMA-SR), Zürich Nordost (SMA-ZNO) und Nördlich Lägern (SMA-NL) werden als «günstig» bewertet, während die Lagerperimeter Jura Ost (SMA-JO) und Wellenberg (SMA-WLB) als «sehr günstig» beurteilt werden. Der Lagerperimeter Jura-Südfuss (SMA-JS) wird als «bedingt günstig» bewertet und mit einem Hinweis auf einen zu prüfenden Nachteil gekennzeichnet (NTB 14-01; NAB 16-41).

In NTB 14-01, Kapitel 4.4.4, werden die Bewertungen für die HAA-Lagerperimeter Zürich Nordost (HAA-ZNO), Nördlich Lägern (HAA-NL) und Jura Ost (HAA-JO) erläutert und die Bewertungen in NTB 14-01, Tab. 4.4-3, zusammengefasst. Der Indikator 48 wird für die Lagerperimeter HAA-ZNO und HAA-NL als «günstig» bewertet, während der Lagerperimeter HAA-JO als «sehr günstig» bewertet wird.

Bezüglich dieses Indikators weisen die geologischen Standortgebiete für SMA- und HAA-Lager keine eindeutigen Nachteile auf. Die anspruchsvollere Erschliessung der Untertageanlagen beim Standortgebiet Jura-Südfuss (Durchörterung Malmkalke und Haupttrogenstein-Formation) führt zwar zu einer «bedingt günstigen» Bewertung, stellt aber den zuverlässigen und sicheren Zugang nach Untertag nicht in Frage.

Beurteilung des ENSI

Das ENSI begrüsst die von der Nagra vorgenommene Präzisierung für die Bewertung des Indikators 48 mit der Durchführung von bautechnischen Risikoanalysen für die betrachteten Standortgebiete und die abgegrenzten Lagerperimeter. Das ENSI ist mit dem gewählten Bewertungsobjekt dieses Indikators (EG/LP) einverstanden. Die Nagra betrachtet in ihrer Bewertung alle zu durchquerenden Gesteinsformationen bis und ohne Wirtgestein.

Die von der Nagra gewählte Methodik zur Analyse der bautechnischen Risiken entspricht dem Stand von Wissenschaft und Technik. Der mit dem schrittweisen Vorgehen gewählte Detaillierungsgrad der bautechnischen Risikoanalyse wird für den gegenwärtigen Projektstand einer «Vorstudie» gemäss SIA 103 als hoch beurteilt. Die Bearbeitungstiefe der Risikobewertung der von der Nagra ermittelten verbleibenden potenziell relevanten Gefährdungen unter Einbezug der berücksichtigten Massnahmen zur Risikobeherrschung ist stufengerecht.

Nach Einschätzung des ENSI (ENSI 33/457) ist die standortspezifische Risikobewertung aller Zugangskonfigurationen unter Berücksichtigung der Sensitivität der Berechnungsergebnisse, des aktuellen Kenntnisstandes zur Geologie, der vorgesehenen Bauverfahren und der geplanten Massnahmen zur Beherrschung der bautechnischen Risiken für Etappe 2 SGT stufengerecht und ausreichend plausibel.

Für die Bewertung der Eintretenswahrscheinlichkeiten der Gefährdungen mit Berücksichtigung der Massnahmen zur Risikominderung im Bauzustand und in der Betriebsphase führt die Nagra Reduktionsfaktoren ein, mit denen sie die Wirksamkeit der Massnahmen für jede Gefährdung und jede Belastungsstufe abschätzt. Eine detaillierte Herleitung dieser Reduktionsfaktoren ist jedoch im NAB 14-50 und in den ergänzenden Erläuterungen der Nagra nicht aufgezeigt. Die von der Nagra gewählte Vorgehensweise zur Bewertung der Wirksamkeit von den geplanten Massnahmen zur Risikoverminderung ist stufengerecht und plausibel. Die Bewertungen der Wirksamkeit dieser Massnahmen selbst sind jedoch nur bedingt nachvollziehbar (ENSI 33/457; Kapitel 2.11).

Die Nagra stuft die Risiken aus Karst nach eingehender Bewertung aller bautechnischen Risiken und möglichen Massnahmen als besonders wichtig ein. Das ENSI und seine Experten teilen diese Einschätzung.

Die Nagra hat die Reduktionsfaktoren für die Phase Bau primär durch die Einschätzung der Wirksamkeit der Vorauserkundung bestimmt und die Wirksamkeit der Massnahmen in der Bauphase unabhängig von der effektiven Tiefenlage der relevanten Homogenbereiche der Zugangsbauwerke bewertet (NAB 17-01, Frage 31). Das ENSI und seine Experten beurteilen die tiefenabhängige Einwirkung des Wasserdrucks, insbesondere in verkarsteten Gebirgsformationen, als massgebend für die Wirksamkeit und den Erfolg der vorauserkundenden Ab-

dichtungsinjektionen beim Vortrieb bzw. Schachtaushub. Diesem Sachverhalt wird bei der Abschätzung der Reduktionsfaktoren für die Gefährdungen aus Wasser und Schlamm in verkarsteten Gebirgsbereichen in der Bauphase nicht ausreichend Rechnung getragen. Der Erfolg von vorausseilenden und nachträglichen Abdichtungs- und Verfestigungsinjektionen ist in einem unter hohen bis sehr hohen Wasserdrücken stehenden verkarsteten Gebirge auf Basis des heutigen Wissensstands und des Stands der Technik nicht ohne Einschränkung gewährleistet. Zitierbare Erfahrungswerte zur Injektion und Abdichtung von sediment- oder schlammgefüllten Karsthohlräumen unter vergleichbaren hydrologischen Randbedingungen sind dem ENSI und seinen Experten sowie der Nagra nicht bekannt (NAB 17-01, Frage 31). Der aktuelle Wissenstand bezüglich Verkarstung in der Nordschweiz lässt keine eindeutige und standortspezifische Beurteilung zu.

Das ENSI stellt fest, dass in allen Standortgebieten bautechnische Risiken beim Erstellen der Zugangsbauwerke vorhanden sind. Insbesondere in den tiefliegenden Lagerperimetern (z. B. Nördlich Lägern und Zürich Nordost) ist es mit sehr hohen Wasserdrücken zu rechnen. Diese Risiken stellen die bautechnische Machbarkeit der Zugangsbauwerke jedoch nicht in Frage.

Aus den oben genannten Gründen kann aus Sicht des ENSI eine Bewertung der geotechnischen und hydrogeologischen Verhältnisse in überlagernden Gesteinsformationen entlang der Zugangsbauwerke anhand dieses Indikators zurzeit nur qualitativ erfolgen. Das ENSI hat eine eigene Bewertung der Standortgebiete allein aufgrund der standortspezifischen Baugrundmodelle und Gefährdungsbilder (NAB 14-72) durchgeführt. Dabei werden die von der Nagra vorgeschlagenen Massnahmen zur Risikoverminderung der Hauptgefährdungen nicht berücksichtigt, weil die Bewertungen der Wirksamkeit dieser Massnahmen selbst nur bedingt nachvollziehbar sind. Als Folge davon bewertet das ENSI den Indikator 48 bei allen betrachteten Standortgebieten für SMA- und HAA-Lager ungünstiger als die Nagra. Die beste Bewertung dieses Indikators erhält das HAA- und SMA-Standortgebiet Jura Ost («günstig»), da mit den geplanten Hauptzugängen (Konfigurationen mittels Rampen) die verkarstungsgefährdeten Gebirgsabschnitte praktisch ganz vermieden werden können, anders als im NAB 14-72 dargestellt. Die HAA-Standortgebiete Zürich Nordost und Nördlich Lägern sowie die SMA-Standortgebiete Südranden, Zürich Nordost, Nördlich Lägern, Jura-Südfuss und Wellenberg werden aufgrund der potenziell zu erwartenden anspruchsvollen geotechnischen und hydrogeologischen Gebirgsverhältnisse entlang der Zugangsbauwerke und der bestehenden Ungewissheiten in den geologisch-geotechnischen Daten mit «bedingt günstig» bewertet (Kapitel 5.3; ENSI 33/539). Diese Bewertung berücksichtigt insbesondere die langen potenziell wasserführenden und fallenden Gebirgsabschnitten mit potenziell hohen Wasserdrücken sowie die bestehenden Ungewissheiten bezüglich des Verkarstungsgrades des Malms in in der Nordschweiz.

Analog zur Nagra können nach Ansicht des ENSI den geologischen Standortgebieten für HAA- und SMA-Lager bzgl. des Indikators 48 keine eindeutigen Nachteile zugeordnet werden.

Indikator 8: Platzangebot untertags

Angaben der Nagra

Die Bewertung des Indikators «Platzangebot untertags» (Bewertungsobjekt LP) erfolgt anhand des Vergleichs zwischen der zur Verfügung stehenden Fläche des massgebenden Lagerperimeters für die Einengung (NTB 14-01) und dem standortspezifischen Platzbedarf (NAB 14-99).

Für die Festlegung des Platzbedarfs des SMA- und des HAA-Lagers wird vom «umhüllenden Inventar» (200 000 m³ SMA, 7500 m³ LMA und 20 000 m³ BE/ HAA) ausgegangen, welches der Bundesrat in Etappe 1 SGT genehmigt hatte (BFE 2011a). Das umhüllende Inventar in Etappe 2 SGT enthält diverse Volumenreserven hinsichtlich der Realisierung des Lagers (NAB 16-41) und entspricht damit zahlenmässig jenigen aus Etappe 1 SGT mit den damaligen Volumenreserven für neue KKW (NTB 14-01), welches in Etappe 1 SGT für die Abgrenzung der bevorzugten Bereiche nochmals verdoppelt wurde. Die erforderliche nutzbare Einlagerungslänge wird unter Berücksichtigung des verwendeten Lagerkammertyps abgeleitet. Bei der Anordnung der Lagerkammern werden deren Abstände zueinander, zu den übrigen untertägigen Anlagen, zu anordnungsbestimmenden geologischen Elementen und zu den Rändern der Lagerperimeter berücksichtigt. Der Platzbedarf für zusätzlich erforderliche Anlagen in der Lagerzone wird einbezogen (NAB 14-99).

Bei der standortspezifischen Abschätzung der Anzahl der anordnungsbestimmenden Störungen wird die im NAB 14-88 beschriebene Charakterisierung von Störungssystemen in den Nordschweizer Standortgebieten beachtet. Unter Einbezug von Daten aus der Umgebung des Standortgebiets und Feldbeobachtungen zum Streichen der Strukturen in geologischen Aufschlüssen wurde im NAB 14-88 die Anzahl von anordnungsbestimmenden Störungen in Streich- und Fallrichtung für die Lagerperimeter abgeschätzt; diese Zahlen wurden jedoch bei der Abschätzung des Platzbedarfs nicht direkt verwendet.

In der Zusatzdokumentation zu den Nachforderungen (NAB 16-41) werden für den Vergleich der Standortgebiete neu die Lagerperimeter HAA-NL-aL1-r und SMA-NL-aL1-r verwendet, welche im Gegensatz zu den im NTB 14-01 für den Standortgebietsvergleich verwendeten Lagerperimeter HAA-NL-mLE-r und SMA-NL-mLE-r über grösseres Platzangebot verfügen, aber bezüglich maximaler Tiefenlage ungünstiger sind.

Hinsichtlich der Robustheit wurde auch geprüft, ob der Einengungsvorschlag sich ändern würde, wenn für alle Standortgebiete der gleiche Platzbedarf angenommen würde – die Analyse hat gezeigt, dass dies zu keinem anderen Entscheid führt (NAB 17-01, Frage 25).

Die Nagra bewertet den Indikator «Platzangebot untertags» (NTB 14-01; NAB 17-01, Fragen 25 und 81; NAB 16-41) für die SMA-Standortgebiete Zürich Nordost (beide WG-Optionen) und Jura Ost mit «sehr günstig», Südranden, Jura-Südfuss (beide WG-Optionen) und Wellenberg mit «günstig», und für Nördlich Lägern die Lagerperimeter des 'Braunen Doggers' und jenen für den Opalinuston mit «bedingt günstig». Der HAA-Lagerperimeter in Jura Ost wird mit «sehr günstig», jener in Zürich Nordost mit «günstig» und jener in Nördlich Lägern mit «bedingt günstig» bewertet.

Für den Opalinuston im Standortgebiet Südranden identifiziert die Nagra aufgrund des in bevorzugter Tiefenlage knappen Platzangebots für diesen Indikator einen eindeutigen Nachteil. Für den Opalinuston im Standortgebiet Jura-Südfuss identifiziert die Nagra aufgrund des in bevorzugter Tiefenlage knappen Platzangebots und aufgrund notwendiger Platzreserven als Folge der tektonischen Überprägung ebenfalls einen eindeutigen Nachteil. Obwohl das Platzangebot im Standortgebiet Wellenberg ebenfalls knapp ausfällt («günstig»), wird der Umstand nicht als eindeutiger Nachteil eingestuft, weil die Lagerkammern grundsätzlich mehrstöckig angeordnet werden können. Im Standortgebiet Nördlich Lägern wird für das HAA-Lager und für das SMA-Lager im Opalinuston aufgrund eines ungenügenden Platzangebots in bevorzugter Tiefenlage ein eindeutiger Nachteil identifiziert (NTB 14-01).

Beurteilung des ENSI

Das ENSI erachtet die Verwendung des «umhüllenden Inventars» aus Etappe 1 SGT zur Bestimmung des Indikators «Platzangebots untertags» hinsichtlich der Lagerrealisierung als sicherheitsgerichtet. In Etappe 2 SGT hat sich das Abfallinventar reduziert (keine Abfälle aus neuen KKW, Kapitel 2.1.1), jedoch berücksichtigt die Nagra zusätzliche Volumenreserven, beispielsweise für die Zunahme der Abfallmengen (durch Reduktion des Abbrandes), Anpassungen bei den Behälterbeladungen, grössere Abstände zwischen den einzulagernden Behältern und Zwischensiegel. Das ENSI ist mit dem Bewertungsobjekt LP einverstanden.

Für die Bewertung des Indikators «Platzangebot untertags» wird die zur Verfügung stehende Fläche des massgebenden Lagerperimeters für die Einengung (Platzangebot) dem standortspezifischen Platzbedarf gegenübergestellt. Nicht zielführend erschien dem ENSI, dass vor der Nachforderung des ENSI (ENSI 33/476) aufgrund von Optimierungsanforderungen für das SMA- und das HAA-Standortgebiet Nördlich Lägern ein ungenügendes Platzangebot und damit ein eindeutiger Nachteil ausgewiesen wurde. Aus Sicht des ENSI ist im Falle eines Optimierungsschrittes mindestens ein genügendes Platzangebot vorauszusetzen.

Das ENSI erachtet die für die Abgrenzung des massgebenden Lagerperimeters verwendeten regionalen Störungszonen und die zu meidenden tektonischen Zonen mit einer Ausnahme als belastbar. Für das Standortgebiet Nördlich Lägern kommt das ENSI zum Schluss, dass die von der Nagra definierte zu meidenden tektonischen Zone im Norden des Standortgebiets aufgrund der vorliegenden Daten weder exakt abgegrenzt, noch der Grad der tektonischen Zergliederung (und somit die Bedeutung für die geologische Langzeitstabilität) belastbar belegt werden kann (Kapitel 2.4). Das ENSI sieht auch die südliche Abgrenzung des massgebenden

Lagerperimeters hinsichtlich der Tiefenlage im Hinblick auf bautechnische Machbarkeit (u. B. Gesteinsfestigkeiten und Verformungseigenschaften) als nicht belastbar an (Bewertung Indikator 1). Entsprechend ergibt sich für das Standortgebiet Nördlich Lägern eine Ausweitung der zur Verfügung stehenden Fläche für die Bewertung des Indikators «Platzangebot untertags».

Die standortspezifische Abschätzung des Platzbedarfs durch die Nagra in Etappe 2 SGT wird seitens ENSI aufgrund der aktuellen Datenlage als nicht belastbar beurteilt. Die Berücksichtigung des verwendeten Lagerkonzepts, der geotechnischen und der standortspezifischen geologischen Bedingungen erscheint grundsätzlich zielführend, sofern die Eingangsparameter wissenschaftlich abgestützt sind. Da mit den vorliegenden 2D-Seismikdaten anordnungsbestimmende Störungen weder vollständig, noch vergleichbar zwischen den Standortgebieten erfasst werden können, erachtet das ENSI die Herleitung des standortspezifischen Platzbedarfs als nicht belastbar (Kapitel 2.4; ENSI 33/539). Insbesondere werden Informationen aus dem gesamten Standortgebiet (und teilweise aus dessen naher Umgebung) auf den Lagerperimeter übertragen, der aufgrund seiner minimalen tektonischen Überprägung abgegrenzt wurde. Entsprechend erachtet es das ENSI als für Etappe 2 SGT zielführend, keine standortspezifische Differenzierung aufgrund des notwendigen Platzbedarfs vorzunehmen.

Das ENSI geht in seiner eigenen Beurteilung für die qualitative Bewertung im massgebenden Fall aufgrund der bestehenden 3D-Seismik in Zürich Nordost für das HAA-Lager bzw. für das SMA-Lager von einem einheitlichen Platzbedarf von 6 km² bzw. von 3 – 4 km² aus. Das ENSI weist grundsätzlich auf die Notwendigkeit von Platzreserven hin, damit im Rahmen der Rahmenbewilligung sinnvolle Eignungskriterien (Art. 63 KEV) definiert werden können, anhand derer aus einem Lagerperimeter mit einer Ausdehnung grösser als dem minimalen Platzbedarf das geeignetste untertägige Standortgebiet für ein Tiefenlager bestimmt werden kann.

Um die Optimierungsanforderungen hinsichtlich «Platzangebot untertags» zu erfüllen (Ziel der Optimierung ist ein mindestens genügendes «Platzangebot untertags»), bezieht sich das ENSI bis zur Festlegung der Tiefenlage hinsichtlich Bautechnik im Standortgebiet Nördlich Lägern auf jene alternative Lagerperimeter, welche unter Berücksichtigung der Referenzwerte für die Tiefenlage des Wirtgesteins, ein genügendes Platzangebot bieten (HAA-NL-aL1-r und SMA-NL-aL1-r für 'Brauner Dogger' und Opalinuston).

Entsprechend bewertet das ENSI den Indikator für die Lagerperimeter SMA-NL-BD, SMA-NL-OPA, SMA-WLB-MGL, HAA-ZNO und HAA-NL mit «günstig» und für die Lagerperimeter SMA-ZNO-OPA, SMA-ZNO-BD, SMA-JO-OPA, SMA-JS-EFF, SMA-JS-OPA und HAA-JO mit «sehr günstig». Aus Sicht des ENSI ist für das Standortgebiet Nördlich Lägern die von der Nagra ausgewiesene zu meidende tektonische Zone im Norden und die Abgrenzung des massgebenden Lagerperimeters hinsichtlich der Tiefenlage im Hinblick auf bautechnische Machbarkeit im Süden nicht belastbar. Entsprechend geht das ENSI aufgrund der vorliegenden Daten von einem ausreichenden Platzangebot untertags aus und identifiziert daher keinen eindeutigen Nachteil für das HAA- und das SMA-Standortgebiet Nördlich Lägern.

Für das SMA-Standortgebiet Südranden liegt aufgrund der Neuhauserwald-Rinne nur ein knapp ausreichendes Platzangebot vor, was seitens ENSI mit «günstig» bewertet wird. Aufgrund der im Vergleich mit den anderen Standortgebieten deutlich geringeren Platzreserven identifiziert das ENSI für dieses SMA-Standortgebiet jedoch einen eindeutigen Nachteil. Eine Betrachtung alternativer Lagerperimeter würde zu anderen eindeutigen Nachteilen führen. Einerseits führt eine untiefere Lage des Lagerperimeters zu einem eindeutigen Nachteil des Indikators «Tiefenlage unter lokaler Erosionsbasis im Hinblick auf die Bildung neuer Rinnen». Andererseits führt die zusätzliche Berücksichtigung der östlichen Teillagerfläche zwar zu ausreichenden Platzreserven, gleichzeitig jedoch auch zur Gefährdung der Langzeitsicherheit (zusätzliche Schädigung der natürlichen Barrieren) und Betriebssicherheit (erhöhtes Risikopotenzial während der Bau- und Betriebsphase), da zusätzliche Zugangsbauwerke und/oder eine weitere Tunnelstrecke (Verbindung beider Lagerperimeter) notwendig wären. Zusätzlich ist die Berücksichtigung mehrerer Teilflächen im Vergleich mit der Betrachtungsweise in den anderen Standortgebieten inkonsistent.

6.2 Zusammenfassung der identifizierten eindeutigen Nachteile für die geologischen Standortgebiete

Die Bewertungen des ENSI für die entscheidungsrelevanten Indikatoren und Merkmale und die identifizierten eindeutigen Nachteile (Kapitel 6.1) werden den Bewertungen der Nagra gegenübergestellt (Tabelle 24). Getrennt nach Lagertyp ergeben sich für die einzelnen Standortgebiete folgende eindeutigen Nachteile:

SMA-Lager

Für das SMA-Standortgebiet Südranden mit dem Wirtgestein Opalinuston identifizieren das ENSI wie auch die Nagra eindeutigen Nachteile für die Indikatoren 4 («Tiefenlage unter Fels im Hinblick auf glaziale Tiefenerosion») und 8 («Platzangebot untertags»). Abweichend von der Nagra sieht das ENSI keine eindeutigen Nachteile für die Indikatoren 2 («Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf Gesteins-Dekompaktion»), 3 («Tiefenlage unter lokaler Erosionsbasis im Hinblick auf die Bildung neuer Rinnen») und 23 («Modellvorstellungen zur Langzeitentwicklung (Geodynamik und Neotektonik; weitere Prozesse)»), jedoch für den Indikator 5 («Mächtigkeit») einen zusätzlichen eindeutigen Nachteil. Daraus leitet das ENSI eindeutigen Nachteile für die Merkmale «Wirksamkeit der geologischen Barriere», «Langzeitstabilität der geologischen Barriere» und «Bautechnische Machbarkeit eines Tiefenlagers unter Berücksichtigung der vorgeschlagenen Standortareale» ab.

Der eindeutige Nachteil bzgl. des Indikators 4 («Tiefenlage unter Fels im Hinblick auf glaziale Tiefenerosion») bleibt auch unter Berücksichtigung der Ungewissheiten der Tiefenlage bestehen, da der Lagerperimeter SMA-SR-OPA die geringsten Reserven bzgl. der Tiefenlage unter Fels gegenüber den anderen SMA-Standortgebieten aufweist. Zudem werden sich aus Sicht des ENSI die Ungewissheiten in der zukünftigen Klimaentwicklung in Etappe 3 SGT nicht signifikant reduzieren lassen. Der eindeutige Nachteil für den Indikator 5 «Mächtigkeit» bleibt auch unter Berücksichtigung der gesamten, von der Nagra ausgewiesenen Ungewissheiten in der Tiefenlage belastbar. Das ENSI erachtet den 'Braunen Dogger' im Standortgebiet Südranden nicht als barrierenwirksames Rahmengestein, da die tonreichen Abfolgen bereits innerhalb der Dekompaktionszone liegen. Der eindeutige Nachteil bzgl. des Indikators 8 («Platzangebot untertags») für Südranden erachtet das ENSI als belastbar, da auch bei vollständiger Berücksichtigung der von der Nagra abgeschätzten Ungewissheiten in der Tiefenlage das Platzangebot untertags in Südranden gegenüber den besten Standortgebieten deutlich geringer ist.

Für das Wirtgestein **Opalinuston** im SMA-Standortgebiet **Zürich Nordost** identifizieren das ENSI wie auch die Nagra keine eindeutigen Nachteile. Im Unterschied zur Nagra (Indikatoren 1 und 8) identifiziert das ENSI für das Wirtgestein **Opalinuston** im SMA-Standortgebiet **Nördlich Lägern** keine eindeutigen Nachteile.

Für das Wirtgestein **'Brauner Dogger'** in den SMA-Standortgebieten **Zürich Nordost** und **Nördlich Lägern** identifiziert das ENSI wie auch die Nagra eindeutigen Nachteile für die Indikatoren 18 («Homogenität des Gesteinsaufbaus»), 19 («Länge der massgebenden Freisetzungspfade») und 43 («Explorationsverhältnisse im geologischen Untergrund»). Abweichend von der Nagra identifiziert das ENSI auch einen eindeutigen Nachteil für den Indikator 39 («Variabilität der Gesteinseigenschaften im Hinblick auf ihre Charakterisierbarkeit»). Diese werden auch mit zusätzlichen Untersuchungen in Etappe 3 SGT bestehen bleiben. Das ENSI leitet deshalb eindeutigen Nachteile für die Merkmale «Wirksamkeit der geologischen Barriere» und «Explorier- und Charakterisierbarkeit der geologischen Barriere im Standortgebiet» ab.

Für das SMA-Standortgebiet **Jura Ost** mit dem Wirtgestein **Opalinuston** identifizieren das ENSI wie auch die Nagra keine eindeutigen Nachteile.

Für das Wirtgestein **Opalinuston** im SMA-Standortgebiet **Jura-Südfuss** identifizieren das ENSI wie auch die Nagra einen eindeutigen Nachteil für den Indikator 5 («Mächtigkeit»). Abweichend von der Nagra identifiziert das ENSI keinen eindeutigen Nachteil für den Indikator 8 («Platzangebot untertags»). Das ENSI leitet einen eindeutigen Nachteil für das Merkmal «Wirksamkeit der geologischen Barriere» ab. Der einschlusswirksame Gebirgsbereich im Standortgebiet Jura-Südfuss besteht nur aus dem Wirtgestein Opalinuston, da die Äquivalente des 'Braunen Doggers' im Standortgebiet Jura-Südfuss in der kalkreichen «Faziesraum West» liegen (Kapitel 3) und daher als nicht barrierenwirksam angesehen werden. Die deutlich geringere Mächtigkeit des Wirtgesteins Opalinuston im Standortgebiet Jura-Südfuss gegenüber allen anderen Opalinuston-Standortgebieten in der

Nordschweiz ist durch eine zentrale Bohrung im Lagerperimeter belegt (NAB 14-101). Damit erfüllt das Wirtgestein Opalinuston im Standortgebiet Jura-Südfuss die Mindestanforderungen an die Mächtigkeit nicht.

Für das Wirtgestein **Effinger Schichten** im SMA-Standortgebiet **Jura-Südfuss** identifizieren das ENSI wie auch die Nagra eindeutige Nachteile für die Indikatoren 16 («Kolloide»), 17 («Art der Transportpfade und Ausbildung des Porenraums»), 18 («Homogenität des Gesteinsaufbaus»), 19 («Länge der massgebenden Freisetzungspfade»), 20 («Transmissivität präferenzierter Freisetzungspfade»), 27 («Potenzial zur Bildung neuer Wasserwegsamkeiten (Verkarstung)»), 39 («Variabilität der Gesteinseigenschaften im Hinblick auf ihre Charakterisierbarkeit») und 43 («Explorationsverhältnisse im geologischen Untergrund»). Abweichend von der Nagra identifiziert das ENSI keinen eindeutigen Nachteil für den Indikator 22 («Selbstabdichtungsvermögen»), jedoch einen eindeutigen Nachteil für den Indikator 5 («Mächtigkeit»). Daraus leitet das ENSI eindeutige Nachteile für die Merkmale «Wirksamkeit der geologischen Barriere», «Langzeitstabilität der geologischen Barriere» und «Explorier- und Charakterisierbarkeit der geologischen Barriere im Standortgebiet» ab.

Für das SMA-Standortgebiet **Wellenberg** mit dem Wirtgestein **Mergel-Formationen des Helvetikums** identifizieren das ENSI wie auch die Nagra eindeutige Nachteile für die Indikatoren 16 («Kolloide»), 17 («Art der Transportpfade und Ausbildung des Porenraums»), 18 («Homogenität des Gesteinsaufbaus»), 20 («Transmissivität präferenzierter Freisetzungspfade»), 22 («Selbstabdichtungsvermögen»), 23 («Modellvorstellungen zur Langzeitentwicklung (Geodynamik und Neotektonik)»), 24 («Seismizität»), 39 («Variabilität der Gesteinseigenschaften im Hinblick auf ihre Charakterisierbarkeit») und 43 («Explorationsverhältnisse im geologischen Untergrund»). Abweichend von der Nagra identifiziert das ENSI keinen eindeutigen Nachteil für den Indikator 9 («Hydraulische Durchlässigkeit»). Daraus leitet das ENSI eindeutige Nachteile für die Merkmale «Wirksamkeit der geologischen Barriere», «Langzeitstabilität der geologischen Barriere» und «Explorier- und Charakterisierbarkeit der geologischen Barriere im Standortgebiet» ab.

HAA-Lager

Für die HAA-Standortgebiete **Zürich Nordost** und **Jura Ost** mit dem Wirtgestein **Opalinuston** identifizieren das ENSI wie auch die Nagra keine eindeutigen Nachteile. Im Unterschied zur Nagra (Indikatoren 1 und 8) identifiziert das ENSI für das HAA-Standortgebiet **Nördlich Lägern** mit dem Wirtgestein Opalinuston keine eindeutigen Nachteile.

Tabelle 24: Darstellung der Bewertung der Nagra und des ENSI für die entscheidungsrelevanten Indikatoren einschliesslich der Kennzeichnung der durch die Nagra bzw. durch das ENSI identifizierten eindeutigen Nachteile für alle SMA- und HAA-Lagerperimeter. *Der Bewertung des ENSI liegt im Unterschied zur Nagra der alternative Lagerperimeter HAA-ZNO-aL506-r zugrunde. Die Nagra hat ebenfalls den Lagerperimeter HAA-ZNO-aL506-r bewertet und für den Indikator 1 mit «bedingt günstig» eine andere Bewertung vorgenommen (NAB 17-01, Frage 81). Die Nagra hat die Indikatoren 29 und 31 nicht als entscheidungsrelevant eingestuft. Die Bewertung der Nagra ist zu Vergleichszwecken aufgeführt.

Entscheidungsrelevantes Merkmal / Entscheidungsrelevanter Indikator	SMA-SR-OPA		SMA-ZNO-OPA		SMA-NL-OPA		SMA-JO-OPA		SMA-JS-OPA		SMA-ZNO-BD		SMA-NL-BD		SMA-JS-EFF		SMA-WLB-MGL		HAA-ZNO*		HAA-NL		HAA-JO	
	N	E	N	E	N	E	N	E	N	E	N	E	N	E	N	E	N	E	N	E	N	E	N	E
a) Wirksamkeit der geologischen Barriere	4.4	4.4	4.5	4.5	4.5	4.5	4.4	4.4	4.3	4.0	3.7	4.0	3.8	4.0	2.8	2.5	3.3	3.1	4.5	4.5	4.5	4.5	4.4	4.4
9 Hydraulische Durchlässigkeit	4.3	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.3	4.5	4.3	4.5	3.7	3.5	3.7	2.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5
17 Art der Transportpfade und Ausbildung des Porenraums	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.3	4.5	4.3	4.5	3.3	2.5	3.1	2.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5
20 Transmissivität präferenzierter Freisetzungspfade	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.3	4.5	4.3	4.5	3.1	3.5	3.1	3.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5
22 Selbstabdichtungsvermögen	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.3	4.5	4.3	4.5	3.1	3.5	2.5	2.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5
18 Homogenität des Gesteinsaufbaus	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	2.5	3.5	2.5	3.5	2.5	2.5	2.7	2.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5
5 Mächtigkeit	3.5	3.5	4.5	4.5	4.5	4.5	3.5	3.5	2.5	0.5	4.1	4.5	4.5	4.5	2.5	0.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	3.5	3.5
19 Länge der massgebenden Freisetzungspfade	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5
16 Kolloide	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	2.5	2.5	2.5	2.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5
b) Langzeitstabilität der geologischen Barriere	2.5	2.5	3.7	2.5	3.7	2.5	3.7	2.5	3.7	2.5	3.7	3.5	3.7	3.5	2.5	2.5	2.5	2.5	3.5	2.5	3.5	2.5	3.1	2.5
23 Modellvorstellungen zur Langzeitentwicklung (Geodynamik und Neotektonik)	2.9	4.5	4.5	4.5	4.3	4.5	4.3	4.5	3.7	3.5	4.5	4.5	4.3	4.5	3.7	3.5	2.9	2.5	4.3	4.5	3.5	3.5	3.1	3.5
22 Selbstabdichtungsvermögen	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.3	4.5	4.3	4.5	3.1	3.5	2.5	2.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5
27 Potenzial zur Bildung neuer Wasserwegsamkeiten (Verkarstung)	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.3	4.5	4.3	4.5	2.5	2.5	4.3	3.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5
28 Erosion im Betrachtungszeitraum	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	3.5	3.5	4.3	4.5	4.3	4.5	4.3	4.5
29 Auflockerungszone im Nahbereich der Untertagebauten	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	4.3	3.5	4.3	3.5	4.3	3.5
3 Tiefenlage unter lokaler Erosionsbasis im Hinblick auf die Bildung neuer Rinnen	3.1	3.5	4.5	4.5	4.7	4.5	4.5	3.5	4.5	4.5	4.7	4.5	4.5	4.5	4.1	4.5	4.1	2.5	4.1	3.5	4.7	4.5	3.1	3.5
2 Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf Gesteins-Dekompaktion	2.7	4.5	4.5	4.5	4.7	4.5	4.1	4.5	4.1	4.5	4.5	4.5	4.7	4.5	4.3	4.5	4.1	2.5	4.5	4.5	4.7	4.5	3.1	4.5
4 Tiefenlage unter Fels im Hinblick auf glaziale Tiefenerosion	2.5	3.5	4.5	4.5	4.7	4.5	4.5	4.5	4.3	4.5	4.5	4.5	4.7	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	3.5	3.5	4.3	3.5	4.1	3.5
24 Seismizität	3.7	3.5	3.7	3.5	3.7	3.5	3.7	3.5	3.7	3.5	3.7	3.5	3.7	3.5	3.7	3.5	2.7	2.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5
31 Verhalten des Wirtgesteins bzgl. Gas	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	3.5	2.5	3.5	3.1	3.5	3.3	4.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5
c) Explorier- und Charakterisierbarkeit der geologischen Barriere im Standortgebiet	4.3	4.5	4.4	4.5	4.4	4.5	4.4	4.5	4.3	4.5	3.3	2.5	3.3	2.5	2.5	2.5	2.0	2.0	4.4	4.5	4.4	4.5	4.4	4.5
39 Variabilität der Gesteinseigenschaften im Hinblick auf ihre Charakterisierbarkeit	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.1	2.5	4.1	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5
43 Explorationsverhältnisse im geologischen Untergrund	4.1	4.5	4.3	4.5	4.3	4.5	4.3	4.5	4.1	4.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	1.5	1.5	4.3	4.5	4.3	4.5	4.3	4.5
d) Bautechnische Machbarkeit eines Tiefenlagers unter Berücksichtigung der vorgeschlagenen Standortareale	3.1	2.5	3.5	2.5	1.3	2.5	3.5	2.5	2.9	2.5	3.5	2.5	2.1	2.5	2.9	2.5	2.7	2.5	3.5	2.5	1.5	2.5	4.1	2.5
1 Tiefenlage im Hinblick auf bautechnische Machbarkeit (u.B. Gesteinsfestigkeiten und Verformungseigenschaften)	4.7	2.5	3.5	2.5	1.3	2.5	3.5	2.5	3.5	2.5	3.5	2.5	2.1	2.5	3.5	2.5	2.7	2.5	3.5	2.5	1.5	2.5	4.1	2.5
48 Geotechnische und hydrogeologische Verhältnisse in überlagernden Gesteinsformationen	3.5	2.5	3.5	2.5	3.5	2.5	4.3	3.5	2.9	2.5	3.5	2.5	3.5	2.5	2.9	2.5	4.1	2.5	3.5	2.5	3.5	2.5	4.3	3.5
8 Platzangebot untertags	3.1	3.5	4.1	4.5	2.1	3.5	4.7	4.5	3.3	4.5	4.5	4.5	2.1	3.5	3.3	4.5	3.1	3.5	3.5	3.5	2.5	3.5	4.1	4.5

sehr günstig (4 ≤ x ≤ 5)
 günstig (3 ≤ x < 4)
 bedingt günstig (2 ≤ x < 3)
 ungünstig (1 ≤ x < 2)
 ungenügend (0 ≤ x < 1)
 eindeutiger Nachteil

6.3 Vergleichende Gesamtbewertung der geologischen Standortgebiete und Beurteilung des Vorschlages der in Etappe 3 SGT weiter zu untersuchenden Standortgebiete

Angaben der Nagra

Das Verfahren der Nagra zur Einengung der in Etappe 1 SGT vorgeschlagenen geologischen Standortgebiete (NTB 14-01; NAB 16-41) erfolgt systematisch nach den Vorgaben des Konzeptteils SGT (BFE 2011b) und des ENSI (HSK 33/001; ENSI 33/075; ENSI 33/115; ENSI 33/170; ENSI 33/154). Die Prüfung der SMA- und HAA-Lagerperimeter hat ergeben, dass keines der Standortgebiete aufgrund der Dosisberechnungen oder der Gesamtbewertung zurückgestellt werden muss. Eine Einengung erfolgt deshalb über eindeutige Nachteile eines Standortgebiets im Vergleich zu anderen Standortgebieten im Rahmen des sicherheitstechnischen Vergleichs.

Basierend auf den abgegrenzten optimierten Lagerperimetern und ihrer Bewertung wurde detailliert aufgezeigt, dass die Standortgebiete Südranden, Nördlich Lägern, Jura-Südfuss und Wellenberg für das SMA-Lager und das Standortgebiet Nördlich Lägern für das HAA-Lager gegenüber den anderen Standortgebieten des gleichen Lagertyps eindeutige Nachteile aufweisen. Weiter weisen die Tongesteinsabfolge 'Brauner Dogger' in den Standortgebieten Zürich Nordost und Nördlich Lägern sowie die Effinger Schichten im Standortgebiet Jura-Südfuss gegenüber dem dort vorkommenden Opalinuston eindeutige Nachteile auf. Dies führt dazu, dass die Tongesteinsabfolge 'Brauner Dogger' und die Effinger Schichten als Wirtgesteine für das SMA-Lager in den betreffenden Standortgebieten nicht als prioritäre Wirtgesteine sondern nur als weitere Wirtgesteine eingestuft werden. Dies bedeutet, dass diese Wirtgesteine zwar bei der in Etappe 2 SGT durchgeführten Analyse und Einengung nicht weiter betrachtet werden, grundsätzlich aber als Wirtgesteine für Abfälle, welche geringere Anforderungen an die Barrierenwirkung stellen, zur Verfügung stehen, falls ein entsprechendes Standortgebiet in Etappe 3 SGT weiter untersucht wird.

Zusätzlich wurde geprüft, ob die Machbarkeit der Zugangsbauwerke und der Untertagebauten sowie der sichere Betrieb der Zugangsbauwerke in Frage gestellt sind. Die technische Machbarkeit der Zugangsbauwerke und Untertageanlagen kann trotz Unterschiede im Ausmass der erwarteten geologischen Erschwernisse für alle Standortgebiete und für die zugehörigen Standortareale als gegeben betrachtet werden und der sichere Betrieb der Zugangsbauwerke ist gewährleistet.

Im Rahmen der nachgereichten Unterlagen wurden ergänzende Dosisberechnungen für das Standortgebiet Nördlich Lägern dokumentiert. Diese zeigen, dass ungünstige Bedingungen im Nahfeld mit teilweise hypothetischen Annahmen, wie sie bei Verletzung der Optimierungsanforderung bezüglich maximaler Tiefenlage möglich sind, ein sicheres geologisches Tiefenlager nicht ausschliessen. Die Langzeitsicherheit ist für die verwendeten Ausbaukonzepte und Ausbaumittel bei geeigneten Standortgebieten auch bis in Tiefen von 800 m u. T. (SMA-Lager) bzw. 900 m u. T. (HAA-Lager) grundsätzlich gewährleistet. Der sicherheitstechnische Vergleich anhand der entscheiderelevanten Indikatoren und Merkmale im Rahmen der Nachforderung führt dennoch zu der Einschätzung, dass das Standortgebiet Nördlich Lägern für das HAA-Lager eindeutige Nachteile aufweist. Die Identifikation der eindeutigen Nachteile führt dazu, dass die geologischen Standortgebiete Südranden, Nördlich Lägern, Jura-Südfuss und Wellenberg für das SMA-Lager und das Standortgebiet Nördlich Lägern für das HAA-Lager zurückgestellt werden.

Nach der Einengung verbleiben somit zwei geologische Standortgebiete je für das SMA-Lager und das HAA-Lager, welche für die weiteren Untersuchungen für Etappe 3 SGT vorgeschlagen werden. Es sind dies die geologischen Standortgebiete Zürich Nordost sowie Jura Ost für das SMA-Lager mit dem prioritären Wirtgestein Opalinuston und das HAA-Lager mit dem Wirtgestein Opalinuston. Eine Analyse der vorhandenen Informationen (Dosisberechnungen und charakteristische Dosisintervalle für das Kombilager sowie die Platzverhältnisse in den Standortgebieten) zeigen, dass in beiden Standortgebieten zudem auch die Möglichkeit für ein Kombilager besteht.

Beurteilung des ENSI

Das ENSI hat die Unterlagen der Nagra geprüft und festgestellt, dass die Nagra die vorgegebenen Kriterien zu Sicherheit und technischer Machbarkeit bei der Erarbeitung der Vorschläge adäquat und stufengerecht berücksichtigt hat. Der Vorschlag der Nagra wurde gemäss den Vorgaben des Sachplans transparent und grösstenteils nachvollziehbar dargelegt. Die Nagra hat die verfügbaren relevanten geologischen Informationen und deren Berücksichtigung ausführlich erläutert. Das ENSI kommt zum Schluss, dass diese geologischen Informationen ausreichend für die Zwecke einer provisorischen Sicherheitsanalyse und den Standortvergleich in Etappe 2 SGT sind und dass die Nagra diese Informationen in ihrem Vorschlag berücksichtigt hat. Damit sind alle 41 sicherheitstechnischen Forderungen des ENSI an die Nagra zur Erreichung des notwendigen Kenntnisstands in Etappe 2 SGT erfüllt.

Das ENSI stellt fest, dass die Nagra der sicherheitstechnischen Methodik für die Auswahl von mindestens zwei Standortgebieten in Etappe 2 SGT (ENSI 33/154) gefolgt ist (Kapitel 4). Abweichend von der Nagra nimmt das ENSI keinen Zwischenschritt für die Wahl eines prioritären Wirtgesteins pro Standortgebiet vor, da die von der Nagra getroffene Auswahl der Indikatoren für die Ermittlung des prioritären Wirtgesteins in diesem Zwischenschritt einen Einfluss auf den Prozess der Entscheidungsfindung haben kann. Das ENSI bewertet daher die Lagerperimeter aller Wirtgesteine in einem gemeinsamen Schritt. Die Betrachtung ohne Festlegung des prioritären Wirtgesteins erlaubt es ausserdem, die Robustheit des Vorschlags der Nagra zu prüfen.

Die Nagra führte das standardisierte Parametervariationsverfahren zur Ermittlung der charakteristischen Dosisintervalle gemäss den behördlichen Vorgaben durch. Das ENSI hat im Rahmen der Überprüfung der Parameter und der Beurteilung der quantitativen provisorischen Sicherheitsanalyse die Ergebnisse der Nagra durch eigene Dosisberechnungen überprüft. Generell kann das ENSI die Resultate der Nagra nachvollziehen. Die von der Nagra verwendeten Bandbreiten der Parameterwerte beurteilt das ENSI vereinzelt als nicht abdeckend und verwendet in den eigenen Berechnungen ungünstigere Werte. Dadurch liegen die oberen Werte der vom ENSI berechneten charakteristischen Dosisintervalle meist höher als die von der Nagra berechneten (Abbildung 31 in Kapitel 5.2). Die charakteristischen Dosisintervalle aller Standortgebiete liegen unterhalb des Dosischutzkriteriums von 0.1 mSv/Jahr (Richtlinie ENSI-G03). Ausser für das Standortgebiet Wellenberg liegen die charakteristischen Dosisintervalle aller Standortgebiete auch unterhalb des Schwellenwerts von 0.01 mSv/Jahr (StSV). Das charakteristische Dosisintervall des Standortgebiets Wellenberg überlappt jedoch mit den Dosisintervallen aller Nordschweizer SMA-Standortgebiete. Im Rahmen von Etappe 2 SGT gelten damit alle Standortgebiete mit allen Wirtgesteinen - vorbehaltlich der qualitativen Bewertung - als sicherheitstechnisch geeignet. Alle Standortgebiete, mit Ausnahme des Wellenbergs, werden gemäss den Vorgaben für die quantitative provisorische Sicherheitsanalyse (ENSI 33/075) als sicherheitstechnisch gleichwertig betrachtet.

Die qualitative Bewertung der optimierten Lagerperimeter in den geologischen Standortgebieten erfolgt gemäss Vorgaben im Konzeptteil SGT anhand der 13 Kriterien zu Sicherheit und technischer Machbarkeit. Die 13 Kriterien werden, wie in Etappe 1 SGT, jeweils in mehrere Indikatoren unterteilt und bewertet. Die Aggregation der Einzelbewertungen der Indikatoren erfolgt durch Mittelwertbildung auf Ebene der Kriterien, Kriteriengruppen und der Gesamtbewertung. Die Gesamtbewertung erfolgt in den Stufen «sehr geeignet», «geeignet», «bedingt geeignet» sowie «weniger geeignet». Die Überprüfung der qualitativen Bewertung durch das ENSI bestätigt die Eignung aller Standortgebiete aus Etappe 1 SGT mit den jeweiligen Wirtgesteinen. Während die Nagra einige Standortgebiete in ihrer Gesamtbewertung als «sehr geeignet» betrachtet, beurteilt das ENSI alle Standortgebiete mit der Gesamtbewertung «geeignet».

Aus Sicht des ENSI sind keine Standortgebiete aufgrund der Resultate der Dosisberechnungen oder der qualitativen Bewertung zurückzustellen. Damit bestätigt das ENSI die Aussage der Nagra, dass in allen Standortgebieten grundsätzlich sichere geologische Tiefenlager erstellt werden können.

Die Zurückstellung eines Standortgebiets in Etappe 2 SGT ist daher nur über eindeutige Nachteile basierend auf den Kriterien zu Sicherheit und technischer Machbarkeit möglich.

Das ENSI kommt bezüglich der von der Nagra identifizierten eindeutigen Nachteile insbesondere bei der Beurteilung der maximalen Tiefenlage und des Platzangebots zu einer abweichenden Beurteilung (Kapitel 6.1.4). Deshalb kann das ENSI dem Vorschlag der Nagra, das Standortgebiet Nördlich Lägern zurückzustellen, nicht zustimmen.

Das Vorgehen der Nagra unter Einbezug überwiegend konservativer geomechanischer Grundlagen und vereinfachter Berechnungsannahmen bestätigt aus Sicht des ENSI grundsätzlich die bautechnische Machbarkeit in den Standortgebieten und wird im Sinn rein bautechnischer Machbarkeitsüberlegungen seitens ENSI als ausreichend angesehen. Für die quantitative Beurteilung der Tiefenlage und den Nachweis eindeutiger Nachteile aus bautechnischer Sicht sind die geomechanischen Grundlagen, insbesondere die Annahmen zu den geomechanischen Parametern, jedoch nicht belastbar. Die wenigen aus der Bohrung Schlattingen-1 stammenden belastbaren Daten zeigen deutlich günstigere geomechanische Eigenschaften, als von der Nagra angenommen. Belastbare standortspezifische geomechanische Grundlagen liegen nicht vor. Aus Sicht des ENSI gibt es derzeit keine bautechnischen Gründe, die eine Einschränkung der Tiefenlage in Etappe 2 SGT stützen würden. Daher stimmt das ENSI der Begrenzung der Tiefenlage für SMA- und HAA-Lager auf 600 bzw. 700 m u. T. durch die Nagra nicht zu und identifiziert für das Standortgebiet Nördlich Lägern keinen eindeutigen Nachteil.

Das Platzangebot im Standortgebiet Nördlich Lägern wird neben der maximalen Tiefenlage auch durch die von der Nagra im Norden des Standortgebiets angenommene zu meidende tektonische Zone beeinflusst. Diese ist aus Sicht des ENSI möglich. Jedoch kann aufgrund der vorliegenden Daten diese zu meidende tektonische Zone weder exakt abgegrenzt, noch der Grad der tektonischen Zergliederung (und somit die Bedeutung für die geologische Langzeitstabilität) belastbar belegt werden. Die Nagra hat ausserdem aus geologischen Überlegungen eine standortspezifische Abschätzung des Platzbedarfs für Tiefenlager vorgenommen. Auch diese ist aufgrund der zur Verfügung stehenden Daten nicht belastbar nachgewiesen. Damit geht das ENSI in Etappe 2 SGT von einem ausreichenden Platzangebot untertags im Standortgebiet Nördlich Lägern aus und identifiziert daher keinen eindeutigen Nachteil.

Gemäss den Vorgaben des Konzeptteils SGT (BFE 2011b) darf als Ergebnis aus Etappe 2 SGT kein Standortgebiet vorgeschlagen werden, das aufgrund der provisorischen Sicherheitsanalyse und der weiteren sicherheitstechnischen Aspekte eindeutig als weniger geeignet bewertet ist als andere Standortgebiete.

Das ENSI identifiziert basierend auf der Diskussion in Kapitel 6.1 und der Zusammenfassung je Standortgebiet in Kapitel 6.2 in Übereinstimmung mit der Nagra eindeutige Nachteile für die **SMA-Standortgebiete** Südranden, Jura-Südfuss und Wellenberg im Vergleich zu den anderen SMA-Standortgebieten. Für das SMA-Standortgebiet Zürich Nordost sieht das ENSI wie auch die Nagra eindeutige Nachteile bezüglich des Wirtgesteins 'Brauner Dogger' und keine eindeutigen Nachteile bezüglich des Wirtgesteins Opalinuston. Für das SMA-Standortgebiet Jura Ost identifiziert das ENSI wie die Nagra keine eindeutigen Nachteile. Für das SMA-Standortgebiet Nördlich Lägern sieht das ENSI wie die Nagra eindeutige Nachteile bezüglich des Wirtgesteins 'Brauner Dogger'. Im Gegensatz zur Nagra sind aus Sicht des ENSI für das SMA-Standortgebiet Nördlich Lägern bezüglich des Wirtgesteins Opalinuston keine eindeutigen Nachteile feststellbar. Aus dem Vergleich zwischen den SMA-Standortgebieten bezüglich der eindeutigen Nachteile werden die Standortgebiete Südranden, Jura-Südfuss und Wellenberg zurecht als eindeutig weniger geeignet bewertet und zurückgestellt. Aus Sicht des ENSI ist keines der drei SMA-Standortgebiete Zürich Nordost, Jura Ost und Nördlich Lägern ohne eindeutige Nachteile zurückzustellen. Die Zurückstellung des SMA-Standortgebiets Nördlich Lägern ist nach Ansicht des ENSI basierend auf den vorliegenden Daten und Kenntnissen nicht belastbar (Kapitel 6.1). Es ist davon auszugehen, dass insbesondere die fehlenden standortspezifischen Daten durch erdwissenschaftliche Untersuchungen in Etappe 3 SGT ergänzt werden können.

Das ENSI nimmt die Überlegungen der Nagra zu einem «weiteren Wirtgestein» neben dem prioritären Wirtgestein Opalinuston für SMA-Standortgebiete mit mehreren Wirtgesteinen zur Kenntnis (NTB 14-01). «Weiteres Wirtgestein» bedeutet aus Sicht der Nagra, dass dieses Wirtgestein grundsätzlich als Wirtgestein für Abfälle, welche tiefe Anforderungen an die Barrierenwirkung stellen, zur Verfügung steht, falls ein entsprechendes Standortgebiet in Etappe 3 SGT weiter betrachtet wird. Eine diesbezügliche Beurteilung des ENSI wird gegebenenfalls erst nach Einreichung eines konkreten Vorschlags der Nagra in weiteren Etappen der Lagerrealisierung erfolgen. Das ENSI weist darauf hin, dass unabhängig davon, ob ein Gestein als «weiteres Wirtgestein» betrachtet wird oder nicht, die Rahmengesteine der für Etappe 3 SGT vorgeschlagenen Standortgebiete in gleicher Tiefe wie das entsprechende Wirtgestein weiter zu untersuchen sind.

Für die **HAA-Standortgebiete** Zürich Nordost und Jura Ost identifiziert das ENSI wie die Nagra keine eindeutigen Nachteile und abweichend von der Nagra auch keine eindeutigen Nachteile für das Standorte-

biet Nördlich Lägern. Aufgrund der vorliegenden Daten sowie der bestehenden Ungewissheiten, die in Etappe 3 SGT weiter reduziert werden können, wird kein HAA-Standortgebiet als eindeutig weniger geeignet als die anderen Standortgebiete bewertet werden. Eine Zurückstellung des HAA-Standortgebiets Nördlich Lägern basierend auf den vorliegenden Daten und Kenntnissen beurteilt das ENSI als nicht belastbar (Kapitel 6.1). Daher ist keines der HAA-Standortgebiete zurückzustellen. Es ist davon auszugehen, dass insbesondere die fehlenden standortspezifischen Daten durch erdwissenschaftlichen Untersuchungen in Etappe 3 SGT ergänzt werden können.

Aus Sicht des ENSI sind die drei geologischen Standortgebiete Zürich Nordost, Jura Ost und Nördlich Lägern jeweils für ein SMA-Lager und ein HAA-Lager in Etappe 3 SGT vertieft weiter zu untersuchen.

Das ENSI nimmt die Überlegungen der Nagra zu einem Kombilager zur Kenntnis. Es nimmt im Rahmen seiner Beurteilung zu Etappe 2 SGT dazu nicht explizit Stellung, da das Ziel der Etappe 2 SGT auf der Standorteinengung liegt. Die Vor- und Nachteile eines Kombilagere im Vergleich zu zwei Lagern in separaten Standortgebieten sind von der Nagra in Etappe 3 SGT darzulegen.

6.4 Schlussfolgerung zur Überprüfung der Sicherheit und technischer Machbarkeit

Das ENSI hat die eingereichten Unterlagen zum Vorschlag der Nagra für eine Einengung der geologischen Standortgebiete detailliert geprüft. Diese Prüfung umfasste unter anderem:

- die Erfüllung der gesetzlichen Vorgaben im Rahmen der Kernenergiegesetzgebung, des Konzeptteils des Sachplans geologische Tiefenlager und der relevanten Richtlinien und Aktennotizen des ENSI,
- die Überprüfung der quantitativen provisorischen Sicherheitsanalyse, der Bewertung der 13 Kriterien zu Sicherheit und technischer Machbarkeit sowie des sicherheitstechnischen Vergleichs der geologischen Standortgebiete anhand eindeutiger Nachteile und
- die Prüfung der Robustheit der angewandten Einengungsmethodik der Nagra im Rahmen der Vorgaben des SGT und des ENSI.

Dazu wurden im Rahmen der Detailprüfung

- eigene Berechnungen zur Ermittlung der charakteristischen Dosisintervalle und den sicherheitstechnischen Anforderungen durchgeführt,
- Fachgespräche mit Vertretern der Kantone zur quartären Tiefenerosion, Neotektonik, bautechnischen Machbarkeit und zur seismischen Datenverarbeitung durchgeführt, mit dem Ziel, die Meinung breiter Fachkreise einzuholen,
- eigene Untersuchungen zum Alter der quartären Schichten und zur geodynamischen Entwicklung in der Nordschweiz vorgenommen bzw. in Gang gesetzt, um zusätzliche Fragen zu klären und
- externe Experten für die Prüfarbeiten zur Etappe 2 SGT beigezogen. Das ENSI wurde durch die Expertengruppe Geologische Tiefenlagerung (EGT), das Bundesamt für Landestopografie (swisstopo), Experten aus Universitäten, Hochschulen und privater Ingenieur- und Geologiebüros bzw. Fachpersonen aus dem In- und Ausland unterstützt. Deren Arbeiten wurden im vorliegenden Gutachten berücksichtigt und zusätzlich als separate ENSI-Expertenberichte publiziert (Anhang B).

Gemäss Sachplan geologische Tiefenlager (BFE 2011b) hat das ENSI bei der Überprüfung der Sicherheit und technischen Machbarkeit konkrete Fragen zu beantworten.

Haben die Entsorgungspflichtigen die Kriterien hinsichtlich Sicherheit und technischer Machbarkeit bei der Erarbeitung der Vorschläge adäquat und stufengerecht berücksichtigt?

Das ENSI kommt bei seiner Überprüfung zum Schluss, dass die Nagra die vorgegebenen Kriterien hinsichtlich Sicherheit und technischer Machbarkeit bei der Erarbeitung der Vorschläge adäquat und stufengerecht berücksichtigt hat. Auf Indikatorebene gibt es einzelne Abweichungen zur Nagra, für die Indikatoren 1 und 8 hat dies Auswirkungen auf die Einengung der Standortgebiete.

Ist das Vorgehen der Entsorgungspflichtigen bei der Erarbeitung der Vorschläge transparent und nachvollziehbar?

Aus Sicht des ENSI hat die Nagra die Erarbeitung der Vorschläge gemäss den Vorgaben des Sachplans transparent und grösstenteils nachvollziehbar dargelegt. Die Aspekte der bautechnischen Machbarkeit und des Lagerkonzepts sowie deren Einfluss auf die Langzeitsicherheit wurden mit den Unterlagen zur Nachforderung des ENSI präzisiert.

Haben die Entsorgungspflichtigen alle verfügbaren relevanten geologischen Informationen berücksichtigt und sind diese ausreichend für die Zwecke einer provisorischen Sicherheitsanalyse im Hinblick auf das Zwischenergebnis?

Die Nagra hat die verfügbaren relevanten geologischen Informationen und deren Berücksichtigung für die Erarbeitung des Vorschlags ausführlich dokumentiert. Das ENSI und seine Experten kommen zum Schluss, dass diese geologischen Informationen ausreichend für die Zwecke einer provisorischen Sicherheitsanalyse im Hinblick auf das Zwischenergebnis sind und dass die Nagra diese Informationen in ihrem Vorschlag berücksichtigt hat.

Können die Behörden die Resultate der provisorischen Sicherheitsanalysen nachvollziehen?

Das ENSI kann die Resultate der Nagra nachvollziehen. Die von der Nagra verwendeten Bandbreiten der Parameterwerte beurteilt das ENSI vereinzelt als nicht abdeckend und verwendet in den eigenen Berechnungen ungünstigere Werte. Dadurch liegen die oberen Werte der vom ENSI berechneten charakteristischen Dosisintervalle meist höher als die von der Nagra berechneten. Auf den Einengungsentscheid der Etappe 2 SGT haben diese Differenzen keinen Einfluss.

Können die Behörden die Resultate der Abwägungen aufgrund der qualitativen Sicherheitskriterien nachvollziehen und dem Resultat der gesamtheitlichen Bewertung zustimmen?

Das ENSI kann die Resultate der Abwägungen der Nagra aufgrund der qualitativen Sicherheitskriterien für alle Standortgebiete nachvollziehen und stuft in der gesamtheitlichen Bewertung im Unterschied zur Nagra alle Standortgebiete mit «geeignet» ein.

Können die Behörden den Standortgebietsvorschlägen aus der Sicht von Sicherheit und Machbarkeit zustimmen?

Die Standortgebiete Südranden, Jura-Südfuss und Wellenberg werden aus Sicht des ENSI zurecht als eindeutig weniger geeignet eingestuft und zurückgestellt. Das ENSI stimmt ausserdem dem Standortvorschlag Zürich Nordost und Jura Ost für ein SMA- respektive HAA-Lager zu. Allerdings beurteilt es die Zurückstellung des Standortgebiets Nördlich Lägern durch die Nagra als nicht belastbar. Aus Sicht des ENSI sind die drei geologischen Standortgebiete Zürich Nordost, Jura Ost und Nördlich Lägern jeweils für ein SMA-Lager und ein HAA-Lager in Etappe 3 SGT vertieft weiter zu untersuchen.

7 Platzierung der Oberflächenanlagen in den Standortgebieten Zürich Nordost, Jura Ost und Nördlich Lägern

Gemäss Konzeptteil des Sachplans geologische Tiefenlager (BFE 2011b) erarbeiten die Entsorgungspflichtigen in Etappe 2 SGT unter Beizug der Standortregionen Vorschläge zur Anordnung, Platzierung und Erschliessung der Oberflächenanlagen. Basierend auf dieser Zusammenarbeit hat die Nagra für alle durch den Bundesrat in Etappe 1 SGT festgelegten geologischen Standortgebiete für HAA- und SMA-Lager Vorschläge für mögliche Standortareale für Oberflächenanlagen ausgearbeitet (Planungsstudien) und im Rahmen der regionalen Partizipation diskutiert, ergänzt und ausgewertet. Für die in Etappe 3 SGT weiter zu untersuchenden geologischen Standortgebiete schlägt die Nagra für beide Lagertypen die zwei Standortgebiete Zürich Nordost und Jura Ost mit den dazugehörigen Standortarealen ZNO-6b und JO-3+ für die Oberflächenanlagen vor. Im Hinblick auf eine allfällige Weiterbearbeitung des Standortgebiets Nördlich Lägern überprüft das ENSI auch die mit diesem Standortgebiet verknüpften beiden Standortareale NL-2 und NL-6.

Nachfolgend beurteilt das ENSI die für die Lagertypen HAA und SMA als abdeckend eingestufteten Oberflächenanlagen der Standortareale ZNO-6b-Kombi, JO-3+-Kombi, NL-2-Kombi und NL-6-Kombi.

Angaben der Nagra

Das zum geologischen Standortgebiet Zürich Nordost gehörende *Standortareal ZNO-6b-Kombi* liegt 1 km vom Rhein (356 m ü. M.) entfernt zwischen den Gemeinden Rheinau, Marthalen und Benken auf 410 bis 432 m ü. M (NTB 14-01; NAB 14-29). Der Untergrund im Bereich des Standortareals besteht aus Moräne, allfälligen Seeablagerungen und torfigen Verlandungssedimenten. Der Fels der Unteren Süsswassermolasse (USM) aus Mergeln und Sandsteinen ist in 20 bis 40 m Tiefe zu erwarten.

Gemäss Grundwasserkarte des Kantons Zürich liegt das Standortareal ausserhalb von nutzbaren Grundwasservorkommen und mit Ausnahme des vorgesehenen Anlieferungsterminals (LKW und Bahn) auch ausserhalb des Gewässerschutzbereiches A_v. Im Standortareal werden gemäss aktueller Gefahrenhinweiskarte des BAFU keine Gefährdungen durch Massenbewegungen oder Überschwemmungen erwartet. Bezüglich Erdbebengefährdung ist das Standortareal der Erdbeben-Gefährdungszone 1 zugeordnet.

Nach Analyse der identifizierten Standortcharakteristiken und Gefahren kommt die Nagra zum Schluss, dass im Standortareal ZNO-6b-Kombi gemäss heutigem Kenntnisstand Bau, Betrieb und Rückbau einer Oberflächenanlage grundsätzlich technisch machbar und sicher realisierbar sind. Verschiedene standortspezifische Aspekte und Massnahmen sind bei der allfälligen Projektierung jedoch zu berücksichtigen bzw. umzusetzen. Zu den wichtigsten zählen aus heutiger Sicht: (i) allfällige Störfälle auf dem Bahntrasse in geringer Distanz zur Oberflächenanlage, (ii) grosse Baugrubentiefen und Auftriebssicherung der Oberflächenanlage sowie (iii) Entwässerung des Standortareals (NAB 14-29). Bezüglich des Zugangs nach Untertage führt die Nagra aus, dass dieser vom Standortareal ZNO-6b-Kombi zum untertägigen Lagerperimeter über eine Rampe oder über einen Schacht erfolgen kann (NTB 14-01).

Das zum geologischen Standortgebiet Jura Ost gehörende *Standortareal JO-3+-Kombi* (NTB 14-01; NAB 13-68) liegt im Unteren Aaretal zwischen den Gemeinden Villigen und Böttstein und erstreckt sich vom Hangfuss «Chästel» bis zur Kantonsstrasse K442. Das Standortareal liegt auf einer gegenüber der Aare um ca. 20 m erhöhten Terrassenschulter auf 346 m ü. M. Der Untergrund im Bereich des Standortareals besteht aus geringmächtigem Niederterrassenschotter sowie teilweise aus über 14 m mächtigen Gehängeablagerungen, welche deutliche Anzeichen von Kriech- und Rutschbewegungen aufweisen. Der darunter liegende Fels besteht aus Kalkmergeln und Mergelkalken der Wildegg-Formation bzw. aus sandigen Kalk- und Tonmergeln, oolithischen Kalken sowie Tonsteinen des Doggers.

In der nordwestlich an das Standortareal anschliessenden Geländekammer befindet sich der «Nassberg», ein gut untersuchter Kriech- und Rutschhang. Er tangiert das Standortareal nicht. Gemäss dem Kataster belasteter Standorte des Kantons Aargau sind auf dem Standortareal keine belasteten Standorte verzeichnet, erst ca. 50 m nördlich sowie 130 m nordöstlich befinden sich belastete Ablagerungsstandorte. An der östlichen Grenze des Standortareals liegt das Betriebsgelände des Paul Scherrer Instituts (PSI), welches als Betriebsstandort verzeichnet ist.

Gemäss Grundwasserkarte des Kantons Aargau liegt das *Standortareal JO-3+-Kombi* am westlichen Rand ausserhalb des ergiebigen Aaretal-Grundwasserstroms in einem Randgebiet mit geringer Grundwassermächtigkeit. In Bohrungen bis auf den Fels in 3 bzw. 12 m Tiefe wurde kein Schottergrundwasser angetroffen. Hingegen ist mit geringen Mengen an Hangsickerwasser zu rechnen, welches im nordwestlichen Bereich innerhalb der Gehängeablagerungen und Rutschmassen bzw. im südöstlichen Bereich stellenweise auf der Felsoberfläche zirkuliert. Das Standortareal befindet sich mit Ausnahme des nordwestlichsten Teils im Gewässerschutzbereich Au. Am Nord- und Nordostrand des Standortareals verläuft der «Krebsbach». Dieser müsste u. a. aufgrund des Hochwasserschutzes verlegt werden. Künftig soll er die Kantonsstrasse K442 weiter nördlich, beim Übergang zur Geländekammer «Nassberg» queren. Die Aare verläuft ca. 200 m östlich des Standortareals. Ihr Mittelwasserstand beträgt auf Höhe des Standortareals ca. 326 m ü. M. Gemäss kantonaler Gefahrenkarte Hochwasser stellt sie keine Gefahr für das Standortareal dar. Die Gefahrenkarte Hochwasser weist jedoch an das Standortareal angrenzende Flächen aus, bei denen bei Starkregen-Ereignissen die Gefahr von flächenhaftem Oberflächenabfluss besteht. In der Gefahrenhinweiskarte des Kantons Aargau wurden Gefahrenhinweisgebiete mit Rutschanfälligkeit und Übersarung (Geschiebetransport) ausgewiesen, die auch die nordwestliche Begrenzung des Standortareals betreffen. Bezüglich Erdbebengefährdung ist das Standortareal der Erdbeben-Gefährdungszone 1 zugeordnet.

Nach Analyse der identifizierten Standortcharakteristiken und Gefahren kommt die Nagra zum Schluss, dass gemäss heutigem Kenntnisstand Bau, Betrieb und Rückbau einer Oberflächenanlage technisch machbar und sicher realisierbar sind. Verschiedene standortspezifische Aspekte und Massnahmen sind bei der allfälligen Projektierung jedoch zu berücksichtigen bzw. umzusetzen. Zu den wichtigsten zählen aus heutiger Sicht: (i) Hangstabilität, (ii) Auswirkungen (insbesondere Erschütterungen) von Bau und Betrieb der Oberflächenanlage (bzw. des geologischen Tiefenlagers insgesamt) auf die sensiblen Anlagen des PSI sowie (iii) Materialbewirtschaftung inkl. Erschliessung des Standortareals (NAB 13-68).

Bezüglich dem Zugang nach Untertage führt die Nagra aus, dass dieser vom Standortareal JO-3+ zum untertägigen Lagerperimeter über eine Rampe erfolgt. Mit der Rampe wird zuerst über eine kurze Strecke Hangschutt durchfahren, anschliessend ist gemäss heutiger Planung mit Ausnahme des ersten steigend aufgefahrenen Rampenabschnitts im Dogger eine Linienführung gänzlich im Opalinuston geplant (NTB 14-01).

Das für das Standortgebiet Nördlich Lägern vorgeschlagene *Standortareal NL-2-Kombi* liegt zwischen Weiach und Zweidlen-Station in einem Kiesabbaugebiet auf der Niederterrasse des Rheins. Das natürlich gewachsene Terrain wies hier ursprünglich ein leichtes Gefälle zum Rhein auf. Mit dem Kiesabbau und der Wiederauffüllung auf das ursprüngliche Geländeniveau (ca. 367 m ü. M.) wandelt sich das Terrain ständig und ist entsprechend uneben. Das Auffüllmaterial ist setzungsempfindlich und wird auch Jahre nach Abschluss der Auffüllung noch Setzungen aufweisen. Unter dem Niederterrassenschotter folgt der Fels der Unteren Süsswassermolasse (USM), welcher stellenweise mit gering-mächtiger Grundmoräne bedeckt ist. Der Fels wird in rund 40 m Tiefe erwartet.

Gemäss Grundwasserkarte des Kantons Zürich liegt das Standortareal über dem Grundwasserstrom des Rheintals innerhalb des Gewässerschutzbereiches Au. Der Grundwasserstrom weist hier eine Breite von ca. 800 m auf und gehört zu den strategischen Interessensgebieten für die Trinkwasserversorgung des Kantons Zürich. Die nächstgelegene Brauch- und Trinkwasserfassung «Griesgraben» liegt am Westrand des Grundwasservorkommens stromabwärts in ca. 1.3 km Entfernung zum Standortareal und ist für die Wasserversorgung der Gemeinde Weiach bedeutend. Die Grundwassermächtigkeit beträgt im Bereich des Standortareals ca. 8 bis 12 m. Der mittlere Grundwasserspiegel liegt auf ca. 333 m ü. M. Östlich an das Standortareal angrenzend ist ein Schutzareal für künftige Grundwasserfassungen ausgeschieden.

Im gesamten Bereich des Standortareals kommen die geplanten Gebäude der Oberflächenanlagen in die mächtigen, locker gelagerten Kiesgrubenauffüllungen und deutlich über dem Grundwasserspiegel zu liegen. Für die Foundation der Gebäude steht eine Pfahlfundation oder eine Bodenverbesserung (z. B. Materialersatz oder Rüttelstopfsäulen) im Vordergrund. Pfahlfundationen dürften stellenweise in das Grundwasser hinunterreichen. Die genaue laterale und vertikale Begrenzung der künstlichen Auffüllungen ist nur näherungsweise bekannt und muss mittels Sondierungen in einer späteren Phase noch erkundet werden. Die Bauten befinden sich gemäss SIA 261 in der Erdbeben-Gefährdungszone 1. Im Standortareal werden keine Gefährdungen durch

Massenbewegungen oder Überschwemmungen erwartet. Für die künstlichen und sehr steilen Kiesgrubenböschungen wird punktuell auf eine Gefährdung durch Spontanrutschungen und Hangmuren hingewiesen. Diese sind infolge fortschreitenden Kiesabbaus nicht aktuell und im Realisierungsfall zu überprüfen. Nach Analyse der identifizierten Standortcharakteristiken und Gefahren kommt die Nagra zum Schluss, dass im Standortareal NL-2-Kombi gemäss heutigem Kenntnisstand Bau und Betrieb sowie Rückbau einer Oberflächenanlage technisch machbar und sicher realisierbar sind. Verschiedene standortspezifische Aspekte und Massnahmen sind bei der allfälligen Projektierung jedoch zu berücksichtigen bzw. umzusetzen. Zu den wichtigsten zählen aus heutiger Sicht: (i) Störfall Bahntransporte aufgrund geringer Distanz des Standortareals zum Bahntrasse, (ii) Sicherheit gegen Flutung der abgesenkten Anlagen bei extremen Niederschlagsereignissen (iii) Erschwerte Zugänglichkeit und Fluchtmöglichkeiten im Ereignisfall aufgrund der abgesenkten Anlage. Bezüglich des Zugangs nach Untertage führt die Nagra aus, dass dieser über eine Rampe oder über einen Schacht erfolgen kann.

Das zweite für das geologische Standortgebiet Nördlich Lägern vorgeschlagene *Standortareal NL-6-Kombi* liegt zwischen den Ortschaften Zweidlen und Windlach auf der Ostseite des «Ämpergs» in einem Seitentälchen, genannt «Haberstal». Der Fels der Oberen Meeresmolasse (OMM) ist hier bedeckt mit Lockergesteinen bestehend aus Gehängeablagerungen und evtl. Bachschuttablagerungen. Der genaue Felsverlauf und die Lockergesteinsmächtigkeiten können derzeit lediglich abgeschätzt und müssten in der nächsten Projektphase erkundet werden. An den Flanken und im hintersten Bereich des Tälchens dürften die Lockergesteinsmächtigkeiten nur sehr gering sein. Im östlichen Bereich des Standortareals sind die Gehängeablagerungen vermutlich mit den Niederterrassenschotter des «Windlacherfelds» seitlich verzahnt. Das Standortareal wird von West nach Ost durch den «Graben im Haberstal» durchflossen. Dieses grösstenteils eingedolte Gewässer leitet zudem das Drainagewasser aus dem Standortareal ab und mündet in den «Dorfbach» resp. den «Zweidler Graben», welche via Glatt in den Rhein entwässern.

Das Standortareal liegt am westlichen Rand des von Süden nach Norden in der Talsohle innerhalb der Niederterrassenschotter verlaufenden Grundwasserstroms von «Windlach» im Gewässerschutzbereich A_u. Der Grundwasserstrom ist mehrheitlich 10 bis 20 m mächtig und bis zu 650 m breit. Aufgrund der Randlage des Standortareals ist die Grundwassermächtigkeit hier sehr gering (< 2 m) und es wird kein nutzbares Grundwasser ausgewiesen. Hier ist mit vergleichsweise geringen Mengen an Hangsickerwasser in den Gehängeablagerungen und an Felswasser in der OMM zu rechnen. Die Lage des Hangsicker- resp. Felswasserspiegels ist noch nicht bekannt. Die vorhandenen Drainagen deuten auf einen hoch liegenden Hangwasserspiegel innerhalb der Gehängeablagerungen hin.

Die Gebäude der Oberflächenanlagen werden voraussichtlich im Fels fundiert. Die mehrheitlich locker gelagerten Gehängeablagerungen und allfälligen Bachschuttablagerungen eignen sich nicht für die Foundation von grösseren Gebäudelasten. Der darunterliegende Fels der OMM ist hingegen sehr gut tragfähig und wenig setzungsempfindlich. Die genauen Fundationsverhältnisse müssen mittels Sondierungen noch erkundet werden. Es ist davon auszugehen, dass der Hangsickerwasser- oder Felswasserspiegel über der geplanten Foundation der Untergeschosse der Oberflächenanlage zu liegen kommt. Zur Gewährleistung einer einwandfreien Umsickerung sind geeignete Massnahmen (z. B. Sickerbahnen) vorzusehen. Die Untergeschosse sind wasserdicht auszubilden.

Gemäss aktuellem Planungsstand wird eine mögliche Anordnung und Ausgestaltung der Oberflächenanlagen aufgezeigt. Dreiseitig um das Standortareal herum sind Geländeanschnitte von bis zu maximal 21 m erforderlich. Die Art des Baugrubenabschlusses ist von den effektiv angetroffenen Verhältnissen wie z. B. Lockergesteinsmächtigkeit, Wasserverhältnissen und Felsqualität abhängig. Für den temporären Bauzustand kommt dafür eine Nagelwand bis hin zu einer rückverankerten Pfahlwand in Frage. Für den Endzustand sind spezielle Stützbauwerke erforderlich.

Das Standortareal befindet sich gemäss SIA 261 in der Erdbeben-Gefährdungszone 1. Es werden im Standortareal keine Gefährdungen durch Massenbewegungen oder Überschwemmungen erwartet.

Nach Analyse der identifizierten Standortcharakteristiken und Gefahren kommt die Nagra zum Schluss, dass im Standortareal NL-6-Kombi gemäss heutigem Kenntnisstand Bau und Betrieb sowie Rückbau einer Oberflächenanlage technisch machbar und sicher realisierbar sind. Verschiedene standortspezifische Aspekte und

Massnahmen sind bei der allfälligen Projektierung aufzunehmen bzw. umzusetzen (u. a. Fundationsverhältnisse). Je nach Anordnung und Ausbildung der Zugangsbauwerke kann das Tiefenlager durch unterschiedliche Konfigurationen erschlossen werden (Rampe oder Schächte).

Beurteilung des ENSI

Das ENSI und seine Experten haben die vier Standortareale ZNO-6b-Kombi, JO-3+-Kombi, NL-2-Kombi und NL-6-Kombi für die Platzierung der Oberflächenanlagen bzgl. Sicherheit, Sicherung und technischer Machbarkeit geprüft (ENSI 33/456; ENSI 33/467).

Aufgrund der grossen horizontalen und vertikalen Entfernung des *Standortareals ZNO-6b-Kombi* von Fließgewässern ist nachvollziehbar, dass keine Hochwassergefährdung ausgewiesen wird. Die mögliche Gefährdung durch Oberflächenabfluss aufgrund lokalen Starkregens muss hingegen genauer analysiert und ein Eindringen von Wasser gegebenenfalls durch bauliche Massnahmen verhindert werden. Aus Sicht der Sicherung ergeben sich für das ENSI gegenwärtig keine Vorbehalte, welche das Standortareal ZNO-6b-Kombi oder die mögliche Auslegung der Oberflächenanlage generell in Frage stellen. Die bautechnische Einschätzung des Standortareals ZNO-6b-Kombi ist stufengerecht (Vorstudie) und nachvollziehbar dokumentiert. Im Standortareal sind zum jetzigen Zeitpunkt keine Gefährdungen durch Massenbewegungen, Überschwemmungen oder Bodenverflüssigung anzunehmen. Es handelt sich um einen im Allgemeinen gut tragfähigen und kaum setzungsfähigen Baugrund. Die erforderlichen tiefen Einschnitte im Lockergestein sind zwar geotechnisch anspruchsvoll, aber im Vergleich zu bereits realisierten Bauten und dem Stand der Technik wird die technische Machbarkeit durch das ENSI als gegeben beurteilt.

Aufgrund der Höhendifferenz zwischen dem *Standortareal JO-3+-Kombi* und der Aare ist es aus Sicht des ENSI nachvollziehbar, dass keine Hochwassergefährdung durch die Aare besteht. Für den Krebsbach wird hingegen korrekterweise der Schluss gezogen, dass Hochwasserschutzmassnahmen erforderlich sind. Das ENSI merkt an, dass die Gefährdung nicht ausschliesslich durch die Ausuferung des Bachs im Teil vor der Unterquerung der Kantonsstrasse hervorgerufen wird, sondern auch durch eine Ausuferung bachaufwärts, nordwestlich des Standortareals. Die von der Nagra vorgeschlagene Verlegung des Krebsbachs ist gegenüber dieser Gefährdung aus Sicht des ENSI zu wenig wirkungsvoll. Mit einem angepassten Verlegungskonzept kann die Hochwassergefährdung jedoch auf ein tolerierbares Mass reduziert werden. Aus Sicht der Sicherung ergeben sich für das ENSI gegenwärtig keine Vorbehalte, welche das Standortareal JO-3+-Kombi oder die möglichen bezeichneten Designs der Oberflächenanlage generell in Frage stellen. Die bautechnische Einschätzung des Standortareals JO-3+-Kombi ist stufengerecht und nachvollziehbar dokumentiert. Im Standortareal sind keine Gefährdungen durch Bodenverflüssigung vorhanden. Es handelt sich um einen im Allgemeinen gut tragfähigen und kaum setzungsfähigen Baugrund. Der Hanganschnitt in einer tiefgründig rutschanfälligen Lockergesteinsbedeckung ist jedoch geotechnisch anspruchsvoll. Die bautechnische Machbarkeit kann im Vergleich mit realisierten Bauten als gegeben beurteilt werden.

Im *Standortareal NL-2-Kombi* sind nach Ansicht des ENSI keine Gefährdungen durch Massenbewegungen, Überschwemmungen oder Bodenverflüssigung vorhanden. Beim gewachsenen natürlichen Untergrund der Niederterrassenschotter handelt es sich um einen im Allgemeinen gut tragfähigen und kaum setzungsfähigen Baugrund. Hingegen ist eine Foundation in der künstlichen Auffüllung (aufgefüllte Kiesgrube, Qualität der Auffüllung unbekannt und sicher heterogen) mit grossen bautechnischen Ungewissheiten behaftet und geotechnisch problematisch (ENSI 33/456). Das ENSI teilt die Einschätzung der Nagra, dass auch Jahre nach Abschluss der Auffüllarbeiten mit weiteren Konsolidationsvorgängen (fortschreitende Setzungen) zu rechnen ist. Eine allfällige Tiefenfoundation in die Niederterrassenschotter unter die ehemalige Abbaukote würde Einbauten ins Grundwasser erfordern (NL-2-Kombi liegt im Gewässerschutzbereich A₁, NAB 14-05). Unter der Voraussetzung, dass nicht wieder aufgefüllt bzw. die Auffüllung vollständig entfernt wird und die Foundation auf dem gewachsenen Niederterrassenschotter erfolgen kann, wäre das Standortareal geotechnisch geeignet.

Im *Standortareal NL-6-Kombi* sieht das ENSI keine Gefährdungen durch Massenbewegungen oder Bodenverflüssigung. Beim gewachsenen natürlichen Untergrund des Molassefels handelt es sich um einen im Allgemeinen gut tragfähigen und kaum setzungsfähigen Baugrund. Die Mächtigkeit und Qualität einer allfälligen

Muldenfüllung aus Lockergesteinen im Haberstal müsste noch abgeklärt werden. Das ENSI geht aber davon aus, dass die Lockergesteinsbedeckung über dem Fels im Haberstal nur geringmächtig ist und im Rahmen der Erstellung der Bauten unter den Foundationen vollständig entfernt wird. Auch wenn das Standortareal gemäss der BAFU-Karte der Überschwemmungsgebiete ausserhalb von hochwassergefährdeten Gebieten liegt, besteht nach Ansicht des ENSI aufgrund der Anordnungssituation ein potenzielles Überschwemmungsrisiko durch den Haberstalgraben z. B. infolge Verstopfung der Eindolung. Dies ist zu überprüfen und mit technischen Mitteln (Verlegung z. B. seitlich entlang des Hangeinschnitts und genügend grosse Dimensionierung der Eindolung) auf ein tolerierbares Mass zu reduzieren. Die Hanganschnitte erfolgen vermutlich zur Hauptsache im Fels der Oberen Meeresmolasse. Die Mächtigkeit der Verwitterungsschicht an den Talflanken könnte aber unterschiedlich sein. Die über 20 m hohen Felsanschnitte sind zwar geotechnisch anspruchsvoll, die bautechnische Machbarkeit ist aber nicht in Frage gestellt. Eingriffe in Grundwasservorkommen können sowohl beim Bau der Oberflächenanlagen wie auch für die Zugangsbauwerke vermieden werden. Aus Sicht der Sicherung ergeben sich für das ENSI gegenwärtig keine Vorbehalte.

Zusammenfassend kommt das ENSI zum Schluss, dass die geologischen und bautechnischen Einschätzungen für die vorgeschlagenen Standortareale in den Standortgebieten Zürich Nordost, Jura Ost und Nördlich Lägern stufengerecht und nachvollziehbar sind. Die erkannten standortspezifischen Naturgefahren-Risiken sind aus technischer Sicht beherrschbar. Dies wird zwar stufengerecht vorerst nur pauschal beurteilt, müssen aber im Rahmen der weiteren Projektierung vertieft bearbeitet und detailliert aufgezeigt werden. Von den beiden Standortarealen im Standortgebiet Nördlich Lägern ist aus geologischer und bautechnischer Sicht das Standortareal NL-6-Kombi fundationstechnisch vorteilhafter. Das ENSI erachtet das Standortareal NL-2-Kombi unter der Voraussetzung, dass nicht wieder aufgefüllt bzw. die Auffüllung vollständig entfernt wird und die Foundation auf dem gewachsenen Niederterrassenschotter erfolgen kann, als geotechnisch geeignet.

Im Rahmen der weiteren Abklärungen sind die Erkenntnisse im Hinblick auf Etappe 3 SGT zu vertiefen. Dazu sind stufengerechte Abklärungen u. a. zu folgenden Aspekten notwendig:

- Fundationsverhältnisse der Oberflächenanlagen,
- Geotechnische Beurteilung und Planung der Hanganschnitte, die einen sicheren und störungsfreien Bau und Betrieb der Anlage gewährleisten, sowie
- Beherrschbarkeit von standortspezifischen Natur- und zivilisatorischen Gefahren.

Das ENSI erwartet deshalb, dass Gefährdungen mittels eines systematischen und umfassenden Vorgehens in Etappe 3 SGT vollständig identifiziert und die relevanten Gefährdungen anhand klarer Beurteilungskriterien bewertet werden.



8 Beurteilung des Standortuntersuchungskonzepts für Etappe 3 SGT

Gemäss Sachplanverfahren (BFE 2011b) sind die für Etappe 3 SGT vorgeschlagenen Standortgebiete mit Hilfe von erdwissenschaftlichen Methoden vertieft weiter zu untersuchen. Ziel dieser Untersuchungen ist die Erhebung einer hinreichenden Datenbasis für den Vorschlag jeweils eines Standortgebiets pro Lagertyp (SMA und HAA) für ein Rahmenbewilligungsgesuch (RBG). Diese Daten müssen eine verlässliche Basis für die Wahl des Standorts sowie für die Beurteilung der Sicherheit und technischen Machbarkeit in Etappe 3 SGT bilden. Die Nagra hat dazu die Berichte NAB 14-83 und NAB 16-28 eingereicht. Als Teil der Gesuchsunterlagen zu späteren RBG sind ein Bericht zum Vergleich der zur Auswahl stehenden Optionen hinsichtlich Sicherheit des geplanten Tiefenlagers und eine Bewertung der für die Auswahl des Standortgebiets ausschlaggebenden Eigenschaften einzureichen. Für die erdwissenschaftlichen Untersuchungen in Etappe 3 SGT sind auch die Hinweise in den anderen Kapiteln des ENSI-Gutachtens zu berücksichtigen.

8.1 Ziele der Standortcharakterisierungen für Etappe 3 SGT

Angaben der Nagra

Mit den Standortgebietuntersuchungen für Etappe 3 SGT soll eine belastbare Datengrundlage für folgende übergeordnete Zielsetzungen geschaffen werden (NAB 14-83):

- Wahl der Standortgebiete für die Vorbereitung der RBG,
- Nachweis der Eignung der gewählten Standortgebiete nach den Kriterien der Langzeitsicherheit sowie der technischen Machbarkeit und Betriebssicherheit,
- Abgrenzung der Lagerbereiche für die RBG,
- Bestimmung der Anordnung und Auslegung der Anlagen in ihren Grundzügen,
- Beschreibung des Ist-Zustandes vor Baubeginn (hydrogeologische Parameter, natürliche Umweltradioaktivität, usw.).

Für die Beurteilung der Langzeitsicherheit und für den sicherheitstechnischen Vergleich der Standortgebiete in Etappe 3 SGT haben die erdwissenschaftlichen Untersuchungen zum Ziel, Informationen bezüglich folgender Aspekte weiter zu vertiefen bzw. zu erheben:

- Geometrie geeigneter Lagerbereiche,
- Strukturen innerhalb und in direkter Umgebung der Lagerbereiche,
- Eigenschaften (inkl. Homogenität) des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs,
- Zustandsparameter des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs für die Analyse der Barrierenwirkung,
- Langzeitentwicklung (u. a. Erosionsszenarien, Reaktivierung tektonischer Elemente),
- Rohstoffvorkommen im Zusammenhang mit den Permokarbontrögen und ihren Rändern und mögliche Nutzungskonflikte (Kohlenwasserstoffe, Geothermie),
- Unterlagen für die Anlagenplanung: geomechanische Bedingungen und geotechnische Daten für die Planung der Oberflächeninfrastruktur, der Zugangsbauwerke und des Lagerbereichs.

Beurteilung des ENSI

Die Angaben der Nagra im NAB 14-83 und NAB 16-28 hat das ENSI in Zusammenarbeit mit seinen Experten (ENSI 33/455) überprüft und das ENSI beurteilt die dargelegten Ziele der Standortcharakterisierung für Etappe 3 SGT als nachvollziehbar und sinnvoll. Die Zielsetzungen werden in Form von Ziel-Mittel-Matrizen standortspezifisch erläutert, was nach Ansicht des ENSI zweckmässig und für Etappe 2 SGT stufengerecht ist. Die Umsetzung der Zielsetzungen wird das ENSI u. a. im Rahmen der Beurteilung der Gesuche für bewilligungspflichtige erdwissenschaftliche Untersuchungen (Sondiergesuche) bzw. im Rahmen des Freigabeverfahrens zu den Tiefbohrungen abschliessend beurteilen.

8.2 Untersuchungsmethoden

Angaben der Nagra

Die für ein RBG erforderlichen erdwissenschaftlichen Datengrundlagen lassen sich in Etappe 3 SGT in den weiter zu untersuchenden Standortgebieten mit 3D-Seismik, Tiefbohrungen, untiefen Flachbohrungen für die Quartärsedimente sowie durch begleitende Untersuchungen an der Oberfläche erheben. Die Verteilung und Geometrie anordnungsbestimmender Störungszonen innerhalb des Untersuchungsperimeters werden mit Hilfe der 3D-Seismik ermittelt. Mit den Tiefbohrungen werden die Gesteinseigenschaften und Zustandsparameter sowie geometrische Informationen entlang des Bohrpfadef erfasst. Der geologische Aufbau des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs kann anhand von Kernproben und mit Hilfe von Bohrlochmessungen bestimmt werden. Um steil einfallende Störungen zu erfassen, sind Schrägbohrungen oder abgelenkte Bohrungen vorgesehen. Für die Erkundung der oberflächennahen Geologie, insbesondere in Bezug auf die Lockergesteine und deren geotechnische Eigenschaften sowie im Hinblick auf eine Verbesserung des Verständnisses von Erosions-szenarien werden untiefe Bohrungen eingesetzt.

Die Untersuchungen in den Standortgebieten werden für Fragen der geologischen Langzeitentwicklung durch regionale Studien weiter ergänzt. Dazu gehören das Schwachbebennetz des Schweizerischen Erdbebendienstes (SED), das Netzwerk der permanenten GNSS-Stationen (Global Navigation Satellite System) zur Positionsbestimmung, periodische geodätische Messkampagnen (Präzisions-Nivellements), ergänzende Oberflächenkartierungen, die Analyse hochauflösender digitaler Geländemodelle, geophysikalische Messungen und Aufschlussaufnahmen. Schliesslich gehören dazu auch vertiefte Analysen zur regionalen Tektonik, zur Neotektonik und zum Aufbau des Grundgebirges.

Beurteilung des ENSI

Die aufgeführten Untersuchungsmethoden sind für das ENSI nachvollziehbar und plausibel. Mit Hilfe der Ziel-Mittel-Matrizen (NAB 14-83; NAB 16-28) können die Untersuchungsziele den Untersuchungsmethoden zugeordnet werden. Dabei wird transparent ersichtlich, dass zur Zielerreichung verschiedene Methoden und Mittel eingesetzt werden können. Nach Ansicht des ENSI entsprechen die aufgeführten Methoden und Mittel dem heutigen Stand von Wissenschaft und Technik, das ENSI kann daher dem methodischen Vorgehen der Nagra im Grundsatz zustimmen.

8.3 Untersuchungskonzepte für die vorgeschlagenen Standortgebiete

Angaben der Nagra

Für die in Etappe 3 SGT weiter zu untersuchenden Standortgebiete Zürich Nordost und Jura Ost wurden Konzepte für die Standortuntersuchungen ausgearbeitet (NAB 14-83). Für den Fall, dass der Bundesrat am Ende der Etappe 2 SGT zum Schluss kommt, Nördlich Lägern solle auch weiter untersucht werden, wurde vorsorglich auch ein Konzept für dieses Standortgebiet ausgearbeitet (NAB 16-28). Die Konzepte umfassen eine geologische Beschreibung der Situation, eine Beurteilung wichtiger Standortmerkmale, Untersuchungsziele sowie die zugeordneten Untersuchungsmethoden wie Sondierbohrungen und 3D-Seismik und schliesslich Beschreibungen der einzelnen Bohrungen, Seismikmessungen und sonstige Untersuchungen mit ihrer räumlichen

Ausdehnung. Die Untersuchungsziele werden dabei nach Fachdisziplinen geordnet aufgelistet, wobei die Ziele auch den übergeordneten Zielsetzungen für Etappe 3 SGT genügen müssen (Langzeitsicherheit, technische Machbarkeit und Betriebssicherheit, Abgrenzung der Lagerbereiche und Anordnung der Anlage in ihren Grundzügen). Für die Sondierbohrungen werden jeweils mehrere Umsetzungsvarianten vorgestellt. Die zu wählende Variante bzw. ihre genaue Ausgestaltung (Bohrreihenfolge, genaue Bohrpfade und Tiefe der Bohrungen) wird im Verlauf der Standortuntersuchungen wiederholt überprüft (unter Berücksichtigung der Auswertung der 3D-Seismik und der Befunde aus den schon abgeteuften Bohrungen) und wo erforderlich überarbeitet. Die Arbeitsprogramme der Bohrungen und die Untersuchungsdetails werden entsprechend angepasst.

Für das Standortgebiet Zürich Nordost ist zunächst eine Ergänzung der bestehenden 3D-Seismik über die bisher nicht oder noch nicht optimal abgedeckten Teile des SMA-Lagerperimeters vorgesehen. Zur Charakterisierung der HAA- und SMA-Lagerperimeter werden zusätzlich zur bereits bestehenden Bohrung Benken sieben Bohrungsperimeter (BP-1 bis BP-7) für Tiefbohrungen im Standortgebiet definiert. Die Bohrungsperimeter sind dabei in einem etwa gleichmässigen Raster um die Lagerperimeter HAA und SMA verteilt. Von diesen Bohrungsperimetern ist es nach Einschätzung der Nagra ausreichend, ca. vier Tiefbohrungen abzuteufen, um in den für die Vorbereitung der Rahmenbewilligungsgesuche ausgewählten Standortgebieten die festgelegten Untersuchungsziele zu erreichen.

Wichtige Merkmale für die Untersuchung des Standortgebiets Zürich Nordost sind neben der Erfassung tektonischer Strukturen die Bestätigung der Tiefenlage und Mächtigkeit des Opalinustons, die Bedeutung glazial übertiefer Quartärrinnen für die Erosionsszenarien, die Mächtigkeit und Faziesverteilung der oberen Rahmengesteine und deren Barriereneigenschaften sowie die Grundgebirgsgeologie (Kristallin/Permokarbondrog und Randstörungen) im Hinblick auf Störungsreaktivierung und Nutzungskonflikte. Mit untiefen Bohrungen, geophysikalischen Vorerkundungen, Schurf- und Aufschlussuntersuchungen soll das Verständnis der Entwicklung der lokalen Erosionsbasis über die letzten 2.5 Mio. Jahre durch Untersuchung der Paläorinnen (z. B. Klettgau-Rinne, Rheinfall-Rinne, Neuhauserwald-Rinne, Rudolfingen-Rinne, Marthalen-Rinne und Andelfinger-Rinne) und der Deckenschotter-Vorkommen in der Region verbessert werden. Mit untiefen Bohrungen können ferner im Bereich der Oberflächenanlage auch der Baugrund sowie die geotechnischen Bedingungen für den Bau der oberen Teile der Zugangsbauwerke erkundet werden.

Für das Standortgebiet Jura Ost ist zunächst eine ausgedehnte 3D-Seismik zur Schaffung eines geologisch-tektonischen Gesamtüberblickes über die dreidimensionale Geometrie des Untergrundes vorgesehen. Der Seismikperimeter deckt dabei die Lagerperimeter HAA und SMA sowie ihre Umgebung grosszügig ab (einschliesslich Nordrand der Jura-Hauptüberschiebung im Süden und Mandach-Überschiebung im Norden). Zur Charakterisierung der vorgeschlagenen HAA- und SMA-Lagerperimeter werden acht Bohrungsperimeter (BP-1 bis BP-8) definiert, wobei nach heutiger Einschätzung ca. fünf Tiefbohrungen erforderlich sein können, um die für Etappe 3 SGT erforderlichen Ziele zu erreichen. Die Bohrungsperimeter sind, mit Ausnahme von BP-7 und BP-8, in einem etwa gleichmässigen Raster um die HAA- und SMA-Lagerperimeter verteilt. BP-7 liegt im Zentrum des HAA-Lagerperimeters. Der weiter nördlich liegende Bohrungsperimeter BP-8 dient der Charakterisierung des Rampenkorridors zwischen der Oberflächenanlage JO-3+ und den HAA- und SMA-Lagerperimetern. Wichtige Merkmale für die Untersuchungen des Standortgebiets Jura Ost sind neben tektonischen Aspekten die Bestätigung der Tiefenlage und Qualität des Opalinustons, die Mächtigkeit und Faziesverteilung in den Rahmengesteinen (insbesondere in der Passwang-Formation), die Tiefenlage des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs im Hinblick auf Dekompaktion und Freilegungsszenarien, die Bedeutung übertiefer glazialer Felsrinnen für die Erosionsszenarien sowie die Grundgebirgsgeologie unter dem Lagerperimeter (Permokarbondrog und seine Randzonen) im Hinblick auf Störungsreaktivierung und Nutzungskonflikte. Mit Quartäruntersuchungen (Bohrungen, Schurf-Untersuchungen an natürlichen Aufschlüssen) können die Quartärablagerungen des Unteren Aaretals, des Riniker Feldes, des Bruggerberges, des Iberig, der Langenloo und des Fricktals hinsichtlich der quartärgeologischen Geschichte und Entwicklung der lokalen Topographie für die Ermittlung der Erosionsszenarien erkundet werden. Untiefe Bohrungen können ferner für die bautechnische Erkundung in der Umgebung der Oberflächenanlage eingesetzt werden, falls dies erforderlich ist.

Für das Standortgebiet Nördlich Lägern ist eine ausgedehnte 3D-Seismik zur Schaffung eines geologisch-tektonischen Gesamtüberblickes über die dreidimensionale Geometrie des Untergrundes im östlichen Teil des

Standortgebiets vorgesehen. Die Anordnung der 3D-Seismikmessungen umfasst dabei nicht nur die Lagerperimeter HAA und SMA sondern auch die nördlich angrenzende zu meidende tektonische Zone (inkl. Weiach Flexur) und die südlichen Bereiche, wo der Opalinuston in grösserer Tiefenlage vorliegt. Ausserdem werden auch die das Standortgebiet begrenzenden tektonischen Elemente (Siglistorfer-Antiklinale, Eglisau Störung und Stadel-Irchel-Antiklinale bzw. Baden-Irchel-Herdern-Lineament) abgebildet, um ihren Einfluss auf die Lagerbereiche abschätzen zu können. Zur Charakterisierung der vorgeschlagenen HAA- und SMA-Lagerperimeter werden sieben Bohrungsperimeter für Tiefbohrungen (BP-1 bis BP-7) angeordnet, wobei nach heutiger Einschätzung ca. vier Tiefbohrungen ausreichend sein werden, um die für die Einreichung der Rahmenbewilligungsgesuche erforderlichen Ziele zu erreichen. Die Bohrungsperimeter sind so um die betrachteten HAA- und SMA-Lagerperimeter herum verteilt, dass die Erkundung im weiteren Verlauf gegebenenfalls weiter fokussiert werden kann. Wichtige Merkmale für die Standortuntersuchungen sind neben der Erfassung tektonischer Strukturen die Bestätigung der Tiefenlage und Mächtigkeit des Opalinustons, die Bedeutung glazial übertiefer Quartärrinnen für die Erosionsszenarien (Glattal-Rinne), die Mächtigkeit und Faziesverteilung der oberen Rahmengesteine und deren Barriereneigenschaften sowie die Grundgebirgsgeologie (Kristallin/Permokarbondrog und Randstörungen) im Hinblick auf Störungsreaktivierung und Nutzungskonflikte. Mit untiefen Bohrungen, geophysikalischen Erkundungen, Schurf- und Aufschlussuntersuchungen soll das Verständnis der Entwicklung der lokalen Erosionsbasis über die letzten 2.5 Mio. Jahre durch Untersuchung der Paläorinnen und der Deckenschotter-Vorkommen in der Region verbessert werden. Mit untiefen Bohrungen können, soweit erforderlich, im Bereich der Oberflächenanlagen auch der Baugrund sowie die geotechnischen Bedingungen für den Bau der Zugangsbauwerke erkundet werden.

In allen drei Standortgebieten werden die Untersuchungen durch weitere erdwissenschaftliche Arbeiten an der Oberfläche ergänzt (u. a. Kartierungen, LiDAR-Auswertungen, geophysikalische Messungen, standort-spezifische und regionale geowissenschaftliche Studien wie GPS- und Schwachbeben-Messungen).

Beurteilung des ENSI

Das ENSI und seine Experten beurteilen die dargelegten Untersuchungskonzepte für die drei Standortgebiete Zürich Nordost, Jura Ost und Nördlich Lägern als inhaltlich nachvollziehbar und zielführend. Die Konzepte beschreiben die vorgesehenen geowissenschaftlichen Untersuchungen in den Grundzügen und weisen eine ausreichende Flexibilität auf. Im Verlauf der Standortuntersuchungen können neue Erkenntnisse aus den 3D-Seismik-Messkampagnen sowie Erkenntnisse aus bereits ausgeführten Bohrungen berücksichtigt werden. Nach Ansicht des ENSI sind die Ausführungen der Nagra mit der Ziel-Mittel-Matrix ausreichend dokumentiert und für Etappe 2 SGT stufengerecht, da ein höherer Detaillierungsgrad erst im Verlaufe der weiteren Verfahrensschritte (Sondiergesuche, Arbeitsprogramme der Bohrungen, Auflagen und Freigaben der Behörde) erfolgen wird.

Die ausgewiesenen Bohrungsperimeter für Tiefbohrungen sind etwa gleichmässig um die von der Nagra optimierten und als massgebend bezeichneten SMA- und HAA-Lagerperimeter platziert. Unter Berücksichtigung bestehender Tiefbohrungen (z. B. Benken, Weiach oder Riniken) ist diese Anordnung vernünftig gewählt. Sie lässt unterschiedliche Kombinationen bzgl. Reihenfolge der Bohrungen zu. Aufgrund des konzeptionellen Charakters der Bohrungsperimeter, ist es aus Sicht des ENSI nicht zielführend diese detaillierter zu diskutieren. Die Beurteilung der konkreten Bohrplatzwahl erfolgt mit dem notwendigen Bewilligungsverfahren gemäss Art. 35 KEG (Sondiergesuche).

Da die 1997 aufgenommene 3D-Seismik den im NTB 14-01 abgegrenzten Lagerperimeter SMA-ZNO-OPA nicht vollständig abdeckt, hat die Nagra entschieden, im Standortgebiet Zürich Nordost eine ergänzende 3D-Seismik durchzuführen. Nach Ansicht des ENSI müssen die Ergebnisse beider 3D-Seismik Kampagnen hinsichtlich ihrer Qualität vergleichbar sein. In diesem Sinne wird das ENSI bei der Prüfung von Gesuchsunterlagen der Vergleichbarkeit von Seismik-Kampagnen unterschiedlichen Alters eine entsprechend hohe Bedeutung beimessen. In den Standortgebieten Jura Ost und Nördlich Lägern decken die vorgeschlagenen Gebiete für die 3D-seismischen Erkundungen das Standortgebiet nicht flächendeckend ab, sondern konzentrieren sich auf die jeweils östlichen Gebietsteile, in denen auch die von der Nagra abgegrenzten Lagerperimeter liegen. Das ENSI ist mit dieser Einschränkung der Gebiete der 3D-seismischen Erkundungen aufgrund seiner Beurteilungen der beiden Standortgebiete einverstanden (Kapitel 5.1). Das ENSI macht darauf aufmerksam, dass sowohl Anzahl als auch

Standorte der zur seismischen Erkundung notwendigen Aufzeitbohrungen nicht in den Konzepten der Standortuntersuchungen ausgewiesen werden. Da diese Bohrungen typischerweise bis in die Felsoberfläche reichen, liefern sie ergänzende geologische Erkenntnisse bzgl. der Lockergesteinsmächtigkeit sowie der Felsunterlage, welche entsprechend berücksichtigt werden sollten.

Die Nagra schlägt in den drei Standortgebieten Jura Ost, Zürich Nordost und Nördlich Lägern un tiefe Bohrungen für quartärgeologische Untersuchungen vor. Grundsätzlich sind Stratigraphie und Alter der Sedimentfüllungen übertiefer Rinnen in den Standortgebieten und deren Umfeld eine bedeutende Grundlage für eine gesamthafte genetische Analyse der eiszeitlichen Erosions- und Ablagerungsgeschichte. Das ENSI erachtet es als zielführend, die Ansatzpunkte der un tiefen Bohrungen, wo nötig, vorgängig mit geophysikalischen Methoden zu erkunden, um Tiefe und Geometrie der Rinnen korrekt erfassen zu können. Für ein verbessertes Prozessverständnis glazialer Tiefenerosion sollten im Standortgebiet Zürich Nordost auch die Existenz und Lage der vermuteten Felshochzonen zwischen der Rudolfingen- und Flach-Rinne bzw. zwischen der Niderholz-Rinne und der Flaach-Rinne bestätigt werden.

Die Baugrunduntersuchungen in den vorgeschlagenen Standortarealen der Oberflächenanlagen sind im Untersuchungskonzept nur grob umrissen. Eine Detaillierung des Vorgehens kann im Rahmen der weiteren Planungsstufen unter Berücksichtigung der relevanten Gefährdungsbilder der bautechnischen Risikoanalysen erfolgen. Zu den kritischen Stellen der Zugangsbauwerke gehören insbesondere die Lockergesteinsstrecken und die Strecken in verkarstungsfähigen Gesteinen (Malm). Das ENSI beurteilt die Gefährdungen im Zusammenhang mit Karst als noch nicht abschliessend geklärt (Kapitel 2.11). Entsprechend sollten die geotechnischen und hydrogeologischen Untersuchungen in den Standortgebieten Aufschluss über die Charakteristik der Karststrukturen des Malms geben (u. a. Grösse, räumliche Ausdehnung, Füllung, Wasseranfall). Die zu erwartenden Karstphänomene sind deshalb in Etappe 3 SGT vertieft zu untersuchen. Ziel dieser Untersuchungen ist, das Konzept- und Prozessverständnis von Karstphänomenen zu verbessern. Dazu sind standortspezifische Daten im Hinblick auf bautechnische Gefährdungsanalysen der Zugangsbauwerke zu erheben.

Nach Ansicht des ENSI und seiner Experten (ENSI 33/472) sind betreffend der Langzeitstabilität eines HAA-Lagers auch allfällige Karstphänomene der Gesteine des Muschelkalks und deren Auswirkungen auf ein Tiefenlager durch vertiefende Untersuchungen zu berücksichtigen. In den Untersuchungskonzepten wird zwar die Verkarstung der Formationen Malm und Hauptrogenstein thematisiert, für die tieferliegenden Horizonte des Muschelkalks fehlt hingegen eine solche Zielsetzung. Das ENSI geht davon aus, dass diese Thematik in den Sondiergesuchen bzw. in den präzisierenden Arbeitsprogrammen der auszuführenden Tiefbohrungen entsprechend berücksichtigt wird.

Die Standorte der Schachtkopfanlagen sind zum heutigen Zeitpunkt noch nicht festgelegt. Durch die Bezeichnung der Standortareale für die Oberflächenanlagen sind die Startpunkte von allfälligen Rampen aber weitgehend festgelegt. Für Etappe 3 SGT ist die bautechnische Beurteilung des Untergrundes für die Zugangsbauwerke einschliesslich der vorgesehenen Schächte durch Sondierung des Baugrundes stufengerecht abzuklären und zu verifizieren.

Der Schutz des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs vor unnötigen Eingriffen oder Schichtverletzungen wird im Konzept der Standortuntersuchungen für Etappe 3 SGT nach Ansicht des ENSI nachvollziehbar und stufengerecht für die aktuell noch grobe Auslegung des Untersuchungskonzepts beschrieben. Das ENSI erwartet, dass dem Aspekt Verletzung der Barriereigenschaften durch Tiefbohrungen sowie den vorgesehenen Massnahmen zu deren Begrenzung im Rahmen der Sondiergesuche eingehend Rechnung getragen wird.



9 Glossar & Abkürzungsverzeichnis

ANDRA	Agence Nationale pour la gestion des déchets radioactifs, Organisation, die in Frankreich für die Endlagerung der dort anfallenden radioaktiven Abfälle zuständig ist (www.andra.fr).
ARE	Bundesamt für Raumentwicklung (www.are.admin.ch).
ATA	Alphatoxische Abfälle: Radioaktive Abfälle mit einem hohen Gehalt an Alphastrahlern (Art. 31 KEV).
AUZ	Auflockerungszone (siehe EDZ)
Barrieren	Barrieren bilden das passive Sicherheitssystem eines Lagers zum Schutz von Mensch und Umwelt über lange Zeit. Es sind technische und natürliche (geologische) Einschluss- und Rückhaltesysteme, welche die radioaktiven Abfälle nach dem Multibarrieren-Konzept von der Biosphäre isolieren.
BD	'Brauner Dogger', in Etappe 1 SGT vorgeschlagenes Wirtgestein.
BE	Brennelemente bzw. abgebrannte Brennelemente, die ohne Wiederaufarbeitung in ein HAA-Lager verbracht werden.
BFE	Bundesamt für Energie, verfahrensleitende Behörde im Sachplan geologische Tiefenlager (www.bfe.admin.ch).
Biosphärenmodell	Transport- und Expositionsmodell zur Umrechnung von Radionuklidfreisetzungen aus dem geologischen Untergrund (Geosphäre) in den Lebensraum des Menschen (Biosphäre) in eine Strahlenexposition für die zu betrachtende Bevölkerungsgruppe. Grundlage bildet ein Transport- und Akkumulationsmodell für die Berechnung der Radionuklid- ausbreitung im menschlichen Lebensraum (Wasser, Luft, Boden) und ein Modell für die Berechnung der Strahlendosis unter Berücksichtigung der Radionuklid- aufnahme über das Trinkwasser, die Nahrung und die Atemluft sowie unter Berücksichtigung der direkten Bestrahlung.
BTK	Biosphärentransferkoeffizient
C_{org}	Organischer Kohlenstoff
C_{org-c}	In ausgewählten aktivierten metallischen Komponenten vorhandenes $^{14}C_{org}$, für das eine konstante Freisetzungsrate kongruent zur Auflösung der Abfallmatrix angenommen wird.
Ca	Calcium
Cl	Chlor
CH_4	Methan
CERN	Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire, internationale Organisation für Kernforschung bei Genf auf dem Gebiet von Schweiz und Frankreich, mit diversen grösseren Beschleunigeranlagen, aus deren Betrieb sich radioaktive Abfälle ergeben (home.cern).
Charakteristisches Dosisintervall	Für jedes Standortgebiet ergibt sich aus den Dosisberechnungen ein charakteristisches Dosisintervall. Dieses wird durch das innerhalb des Betrachtungszeitraums berechnete Dosismaximum für den Referenzfall und dasjenige für die Parametervariation bestimmt.

CO ₂	Kohlendioxid
Cs	Cäsium
DHM	Digitales Höhenmodell. Digitaler Datensatz, welcher die Form der Erdoberfläche in den drei Raumdimensionen Länge, Breite und Höhe beschreibt.
Dosis	Mass für die Beurteilung des gesundheitlichen Risikos durch ionisierende Strahlung. In diesem Gutachten ist die effektive Dosis gemeint: Summe der mit den Wichtungsfaktoren gewichteten Äquivalentdosen in allen Organen und Geweben. Die Einheit der Dosis ist das Sievert (Sv).
Dosisberechnung	Der quantitative Teil der provisorischen Sicherheitsanalysen besteht aus Dosisberechnungen für jedes Standortgebiet. Dazu ist die aus der realistischerweise zu erwartende Entwicklung des Tiefenlagers (Referenzfall für die Dosisberechnungen, RF) resultierende zeitabhängige Dosiskurve zu berechnen. Um die Robustheit des Referenzszenariums sowie den Einfluss von Ungewissheiten und Variabilitäten zu beurteilen, ist ein auf dem RF aufbauendes, standardisiertes Parametervariationsverfahren durchzuführen. Aus den Dosismaxima des RF und des Parametervariationsverfahrens ergibt sich für jedes Standortgebiet im Betrachtungszeitraum ein charakteristisches Dosisintervall.
Eawag	Eidgenössische Anstalt für Wasserversorgung, Abwasserreinigung und Gewässerschutz (www.eawag.ch).
EDTA	Ethylendiamintetraessigsäure, organische Verbindung, die durch Komplexbildung die Mobilität von Radionukliden erhöhen kann.
EDZ	Der Begriff «Excavation Damaged Zone» beschreibt die durch den Ausbruch beeinträchtigte Gebirgszone um einen aufgefahrenen Tunnel. In dieser werden Zustandsgrössen wie Spannung, Poren-druck, Temperatur, Wassersättigung und Zusammensetzung des Porenwassers durch die Nähe zur Exkavation temporär verändert und mit strukturellen Gefügeänderungen verbunden ist, die zu einer dauerhaften Veränderung der hydraulischen und mechanischen Gesteinseigenschaften führen. Der Begriff «Auflockerungs-zone» (AUZ) entspricht dem Begriff «Excavation Damaged Zone» (EDZ) NTB 14-02-IV.
EFF	Effinger Schichten, in Etappe 1 SGT vorgeschlagenes Wirtgestein.
EG	Einschlusswirksamer Gebirgsbereich, Teil der geologischen Barriere, der bei zu erwartender Entwicklung des geologischen Tiefenlagers für den betrachteten Isolationszeitraum, im Zusammenwirken mit technischen und geologischen Barrieren, den Einschluss der Abfälle sicherstellt. Zum EG gehören das Wirtgestein sowie die oberen und unteren Rahmengesteine.
EGT	Expertengruppe geologischen Tiefenlagerung, Nachfolgeorganisation der früheren Kommission für nukleare Entsorgung (KNE), die EGT berät das ENSI in erdwissenschaftlichen Fragen und verfasst zuhanden des ENSI Stellungnahmen zur geologischen Beurteilung der Standortgebiete und zur bautechnischen Machbarkeit der geologischen Tiefenlager (www.egt-schweiz.ch).
EGTS	Die Nagra schlägt zur Erhöhung der Gastransportkapazität im Tiefenlager (Begrenzung des Gasdruckes) ein «Engineered Gas Transport System» vor. Das EGTS wird durch die Anordnung, Ausgestaltung und Materialzusammensetzung von Verfüllstrecken, Versiegelungen und Verschlusselementen bestimmt.
Einengungsmethodik	Die von der Nagra angewandte Methodik für die Einengung der Standortgebiete in Etappe 2 SGT.

Einengungsvorschlag	Vorschlag der Nagra von mindestens zwei Standortgebieten pro Lagertyp in Etappe 2 SGT.
ENSI-G03	Richtlinien des ENSI zu «Spezifischen Auslegungsgrundsätzen für ein geologisches Tiefenlager und Anforderungen an die Sicherheitsanalyse».
Entsorgungsnachweis	Der Entsorgungsnachweis war Aufgabe der Entsorgungspflichtigen und hat aufgezeigt, dass die in der Schweiz produzierten Abfälle grundsätzlich auch in der Schweiz entsorgt werden können. Der Entsorgungsnachweis ist für SMA (1988) als auch HAA (2006) separat erbracht worden.
ESchT	Expertengruppe-Schweizer-Tiefenlager, einberufen durch das deutsche Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB), die ESchT soll Fragen des BMUB und der deutschen Begleitkommission Schweiz (BeKo-Schweiz) zum Sachplan «geologische Tiefenlager der Schweiz» beantworten sowie das Standortauswahlverfahren fachlich begleiten (www.escht.de).
Etappe 1 SGT	Die Etappe 1 des Sachplanverfahrens geologisches Tiefenlager dauerte von 2008 bis 2011 und umfasste eine erste Standorteinengung: Von der Nagra wurden 6 Standortgebiete vorgeschlagen. Der Vorschlag wurde vom ENSI im Rahmen des Gutachtens ENSI 33/070 beurteilt und vom Bundesrat gutgeheissen.
Etappe 2 SGT	Die Etappe 2 des Sachplanverfahrens geologisches Tiefenlager läuft seit Ende 2011. Ziel von Etappe 2 SGT ist eine Standorteinengung von den aus Etappe 1 SGT übernommenen 6 Standortgebieten auf mindestens 2 Standortgebiete für jeweils ein HAA-Lager und ein SMA-Lager.
Etappe 3 SGT	Die Etappe 3 des Sachplanverfahrens geologisches Tiefenlager beginnt gemäss aktueller Planung im Jahr 2019. Ziel von Etappe 3 SGT ist die Standortwahl für jeweils ein HAA-Lager und ein SMA-Lager. Dies mündet in Rahmenbewilligungsgesuchen gemäss KEG.
EWS	Erdwärmesonde
Fernfeld	Das Fernfeld umfasst das Wirtgestein, die dazugehörigen Rahmengesteine sowie die nicht barrierenwirksame Geosphäre bis zum Rand der Biosphäre. Das Fernfeld wird für die Berechnungen der Radionuklid-Ausbreitung definiert, um die jeweiligen Modellannahmen für die verschiedenen Bereiche zu definieren.
Gekoppelte Prozesse	Nach Verschluss eines Tiefenlagers für radioaktive Abfälle wird das Nahfeld in der Übergangsphase bis zur Einstellung quasi-stationärer Verhältnisse durch thermische, hydraulische, mechanische und chemische Wechselwirkungen, sogenannte THMC-Prozesse beeinflusst. Dazu gehören beispielsweise die Temperaturentwicklung um das HAA-Lager, die Wiederaufsättigung, Zweiphasenfluss, die pH-Fahne oder die mechanische Deformation.
Geologisches Standortgebiet	Das geologische Standortgebiet wird gemäss Konzeptteil SGT durch die für die Lagerung der radioaktiven Abfälle geeigneten geologischen Gesteinskörper im Untergrund definiert.
Geologisches Tiefenlager	Anlage im geologischen Untergrund zur sicheren Entsorgung radioaktiver Abfälle, die verschlossen werden kann, sofern der dauernde Schutz von Mensch und Umwelt durch passive Barrieren sichergestellt wird (Art. 3 KEG).
Gew.-%	Gewichtsprozent: Anteil eines Stoffes in einem Gemisch oder einer Lösung, der in Gramm je 100 g Mischung gemessen wird.

GIS	Geoinformationssystem
GNSS	Global Navigation Satellite System
HAA	Hochaktive Abfälle, darunter fallen nach Art. 31 KEV abgebrannte Brennelemente und verglaste Spaltprodukte aus der Wiederaufarbeitung. Durch den radioaktiven Zerfall entsteht eine grosse Wärmeentwicklung.
HAA-ZNO	Für die Beurteilung verwendeter HAA-Lagerperimeter im Standortgebiet Zürich Nordost mit dem Wirtgestein Opalinuston.
HAA-NL	Für die Beurteilung verwendeter HAA-Lagerperimeter im Standortgebiet Nördlich Lägern mit dem Wirtgestein Opalinuston.
HAA-JO	Für die Beurteilung verwendeter HAA-Lagerperimeter im Standortgebiet Jura Ost mit dem Wirtgestein Opalinuston.
«harte Bänke»	Sedimentäre Schichten mit reduziertem Tonmineralgehalt (< 20 Gew.-%), was zu einer beschränkten Selbstabdichtung und somit schon bei kleinen Versätzen zu einer stark erhöhten hydraulischen Durchlässigkeit führen kann (NTB 14-01).
HSK	Hauptabteilung für die Sicherheit der Kernanlagen. Vorgängerorganisation des ENSI (bis 2008).
I	Iod
IRF	Instant release fraction, Anteil an Radionukliden, der bei einem Versagen der Endlagerbehälter im HAA-Lager unmittelbar freigesetzt wird.
ISA	Isosaccharinsäure, organische Verbindung, die durch Komplexbildung die Mobilität von Radionukliden erhöhen kann.
JO	Standortgebiet Jura Ost
JS	Standortgebiet Jura-Südfuss
K	Kalium
KBA	Kalkbankabfolgen, werden von der Nagra für die Effinger Schichten definiert und bestehen dort überwiegend aus Kalkbänken, welche durch geringmächtige Zwischenlagen aus Kalkmergeln voneinander getrennt werden.
K_d	Sorptionskoeffizient, je höher der K_d -Wert, desto stärker bleibt ein Element an der Festkörperoberfläche haften, d. h. desto weniger mobil ist es.
KEG	Kernenergiegesetz vom 21. März 2003, in Kraft seit 1. Februar 2005, SR 732.1, das Gesetz regelt die friedliche Nutzung der Kernenergie und bestimmt das Vorgehen bei der Entsorgung radioaktiver Abfälle.
KEV	Kernenergieverordnung vom 10. November 2004, in Kraft seit 1. Februar 2005, SR 732.11
KKW	Kernkraftwerk
KMA	Kalkmergelabfolgen, werden von der Nagra für die Effinger Schichten definiert und bestehen aus einer Wechsellagerung von mengenmässig dominierenden Kalkmergeln mit relativ regelmässig alternierend auftretenden, geringmächtigen Kalkbänken.
KNE	Kommission Nukleare Entsorgung, siehe EGT
KNS	Kommission für nukleare Sicherheit, die KNS verfasst Stellungnahmen zu den Gutachten des ENSI (www.kns.admin.ch).

konservative Annahme	Annahmen werden als konservativ bezeichnet, wenn sie dazu führen, dass die betrachteten Auswirkungen (z. B. auf die resultierende Dosis) mit hoher Wahrscheinlichkeit überschätzt werden. Konservative Annahmen stellen oft Vereinfachungen eines Sachverhalts dar, die zum Zweck der Überbrückung von Daten- oder Verständnislücken eingesetzt werden können.
Konzeptualisierung	Aufbauend auf die geologischen Kenndaten wird eine Konzeptualisierung der Geologie in den Standortgebieten vorgenommen, welche die Grundlage für die Dosisberechnungen und die qualitative Bewertung bildet. Dabei wird zwischen drei Konzeptualisierungen unterschieden: Referenz-Konzeptualisierung, d. h. die aufgrund der Erfahrungsbasis plausibelste Konzeptualisierung, ungünstige Konzeptualisierung, d. h. eine Konzeptualisierung mit ungünstiger Wirkung auf das Barrierensystem, günstige Konzeptualisierung, d. h. eine Konzeptualisierung mit günstiger Wirkung auf das Barrierensystem.
Lagerbereich	Bereich innerhalb des Lagerperimeters, in dem der radioaktive Abfall eingelagert wird.
Lagerperimeter	Bereich innerhalb des Standortgebiets, dessen Eigenschaften Nagra und ENSI im Rahmen der qualitativen Bewertung beurteilen.
Lithofazielle Einheit	Ein Wirtgestein kann aus verschiedenen lithofaziellen Einheiten, d. h. sich in ihrer Gesteinszusammensetzung unterscheidenden Einheiten zusammengesetzt sein. Aufgrund ihres unterschiedlichen Mineralgehalts, der Korngrösse, ihres Porenraums und Wassergehalts etc. verfügen diese Einheiten auch über unterschiedliche Eigenschaften mit Relevanz für deren langfristige Barrierenwirkung.
LMA	Langlebige mittelaktive Abfälle, als LMA werden diejenigen ATA und SMA bezeichnet, die in einem separaten Teil des HAA-Lagers eingelagert werden.
LP	Lagerperimeter (siehe dort)
MA	Mindestanforderungen für die Bewertung der Indikatoren, diese wurden von der Nagra in Etappe 1 SGT für die Identifikation geeigneter geologisch-tektonischer Grossräume, potenzieller Wirtgesteine und geeigneter Konfigurationen (damalige Schritte 3 bis 5) definiert und dort angewendet, sie werden (identisch oder modifiziert) in Etappe 2 SGT erneut angewendet.
mFE	massgebender Fall für die Einengung, umfasst die für die Einengung massgebende Konzeptualisierung, kombiniert mit den massgebenden Werten für ausgewählte Parameter und Referenzwerten für alle anderen Parameter. So wohl für die qualitative Bewertung als auch für die Dosisberechnungen wird ein mFE definiert, wobei sich diese zum Teil unterscheiden.
MGL	Mergel-Formationen des Helvetikums, in Etappe 1 SGT vorgeschlagenes Wirtgestein.
MIF	Radioaktive Abfälle aus Medizin, Industrie und Forschung.
MIRAM	Modellhaftes Inventar für radioaktive Materialien, zusammenfassende Datenbank zu den bereits vorhandenen und noch zu erwartenden radioaktiven Abfällen in der Schweiz.
mLE	massgebender Lagerperimeter für die Einengung, optimierter Lagerperimeter, welcher als Ausgangspunkt für die Bewertung dient.

mSv	Millisievert, Sievert ist die Masseinheit für die biologischen Schäden bei der Absorption ionisierender Strahlung (in lebenden Zellen) und wird meistens in tausendstel Sievert (mSv) angegeben.
Na	Natrium
NAB	Nagra Arbeitsbericht
Nagra	Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle. Im Hinblick auf die dauernde und sichere Entsorgung von radioaktiven Abfällen haben die Betreiber der fünf schweizerischen Kernkraftwerke und die Schweizerische Eidgenossenschaft 1972 die Nagra gegründet. Die Nagra schlägt gemäss den Vorgaben des Konzeptteils des Sachplans geologische Standortgebiete und Standorte vor und reicht das Rahmenbewilligungsgesuch ein (www.nagra.ch).
Nahfeld	Das Nahfeld in einem geologischen Tiefenlager umfasst die Abfallbinde, die technischen Barrieren, insbesondere Verfüllungen und die Auflockerungszone des Wirtgesteins. Das Nahfeld wird für die Berechnungen der Radionuklidausbreitung definiert, um die jeweiligen Modellannahmen für die verschiedenen Bereiche zu definieren.
NEA	Nuclear Energy Agency, Teilorganisation der OECD (Organization for Economic Co-operation and Development) (www.oecd-nea.org)
NL	Standortgebiet Nördlich Lägern
NTB	Nagra Technischer Bericht
Oberflächenanlage	Gebäude bei den Zugängen zu den unterirdischen Lagerbereichen (Administrations- und Betriebsgebäude, Verpackungsanlage, Besucherzentrum, Anlieferungsterminal usw.). Die Schachtköpfe, abseits vom Standortareal, gehören zur Oberflächeninfrastruktur, aber nicht zur Oberflächenanlage.
Oberflächeninfrastruktur	Oberbegriff für alle Anlagen an der Oberfläche (Oberflächenanlage, Schachtköpfe, Deponien, Erschliessung).
OFA	Oberflächenanlage
OPA	Opalinuston, in Etappe 1 SGT vorgeschlagenes Wirtgestein
PICNIC	Programm der Nagra zur Berechnung des Radionuklidtransports in der Geosphäre.
Provisorische Sicherheitsanalyse	Die für Etappe 2 SGT definierte provisorische Sicherheitsanalyse umfasst die Dosisberechnungen zur Ermittlung des charakteristischen Dosisintervalls (quantitative provisorische Sicherheitsanalyse) sowie die qualitative Bewertung anhand der 13 Kriterien zu Sicherheit und technischer Machbarkeit für jedes Standortgebiet.
PSI	Paul Scherrer Institut, Forschungszentrum für Natur- und Ingenieurwissenschaften. Das PSI sammelt die schweizerischen radioaktiven Abfällen aus Medizin, Industrie und Forschung und betreibt das Bundeszwischenlager (www.psi.ch).
Rahmengestein	Ober- und/oder unterhalb des Wirtgesteins liegende Gesteinsschichten, deren Eigenschaften (insbesondere deren Tonmineralgehalt) zusätzlich zum Wirtgestein wesentlich zur Barrierenwirkung der geologischen Schichten beitragen.

RF	Referenzfall, wird durch die Referenz-Konzeptualisierung und die Referenz-Parameterwerte definiert und für die Berechnung des charakteristischen Dosisintervalls verwendet, bildet die Grundlage der Parametervariation.
Robustheit	Eigenschaft des betrachteten Systems, falls es sich unempfindlich gegenüber Ungewissheiten, Vorgängen und Ereignissen verhält.
RTI	Radiotoxizitätsindex, Mass für die Auswirkung der radiologischen Strahlung auf den Menschen.
RW	Referenzwert, der plausibelste Wert z. B. aufgrund der Erfahrungsbasis.
RZ	Referenzzuteilung der radioaktiven Abfälle, definiert im NTB 08-05, Tabelle 3.3–6.
Se	Selen
Sedimente	Gesteine, die durch Ablagerung an Land oder im Wasser entstehen; man unterscheidet nach ihrem Ursprung zwischen (a) klastischen Sedimenten, die aus der mechanischen Zerstörung von anderen Gesteinen durch Wind, Wasser oder Eis transportiert und abgelagert wurden (z. B. Tongesteine), (b) biogenen Sedimenten, d. h. aus Resten von toten Organismen gebildete Ablagerungen (z. B. Kalke), und (c) chemischen Sedimenten, die durch Ausfällung gelöster Stoffe entstanden sind (z. B. Salze).
SGT	Sachplan geologische Tiefenlager, umfasst sowohl den 2008 von BFE verabschiedeten Konzeptteil als auch das Verfahren selbst.
Sicherheitstechnischer Vergleich	Wird gleichbedeutend mit der vergleichenden Gesamtbewertung der Standortgebiete verwendet (siehe Gesamtbewertung).
SKA	Sandkalkabfolgen: «harte Bänke» des 'Braunen Doggers', die SKA fassen seitens Nagra die sandig-kalkigen Bänke sowie eisenoolithische Intervalle zusammen (NTB 14-02-VI), das ENSI schlägt eine differenziertere Darstellung vor.
SMA	Schwach- und mittelaktive Abfälle: Diese Abfälle enthalten vorwiegend radioaktive Stoffe mit kürzeren Halbwertszeiten. Sie stammen aus dem Betrieb und späteren Abbruch der Kernkraftwerke sowie aus Medizin, Industrie und Forschung (gesetzlich definiert in Art. 31. KEV).
SMA-JO-OPA	Für die Beurteilung verwendeter SMA-Lagerperimeter im Standortgebiet Jura Ost mit dem Wirtgestein Opalinuston.
SMA-JS-EFF	Für die Beurteilung verwendeter SMA-Lagerperimeter im Standortgebiet Jura-Südfuss mit dem Wirtgestein Effinger Schichten.
SMA-JS-OPA	Für die Beurteilung verwendeter SMA-Lagerperimeter im Standortgebiet Jura-Südfuss mit dem Wirtgestein Opalinuston.
SMA-NL-BD	Für die Beurteilung verwendeter SMA-Lagerperimeter im Standortgebiet Nördlich Lägern mit dem Wirtgestein 'Brauner Dogger'.
SMA-NL-OPA	Für die Beurteilung verwendeter SMA-Lagerperimeter im Standortgebiet Nördlich Lägern mit dem Wirtgestein Opalinuston.
SMA-SR-OPA	Für die Beurteilung verwendeter SMA-Lagerperimeter im Standortgebiet Südranden mit dem Wirtgestein Opalinuston.
SMA-WLB-MGL	Für die Beurteilung verwendeter SMA-Lagerperimeter im Standortgebiet Wellenberg mit dem Wirtgestein der Mergel-Formationen des Helvetikums.

SMA-ZNO-BD	Für die Beurteilung verwendeter SMA-Lagerperimeter im Standortgebiet Zürich Nordost mit dem Wirtgestein 'Brauner Dogger'.
SMA-ZNO-OPA	Für die Beurteilung verwendeter SMA-Lagerperimeter im Standortgebiet Zürich Nordost mit dem Wirtgestein Opalinuston.
SR	Standortgebiet Südranden
Sr	Strontium
STA	Sandig-tonige Abfolgen, Überbegriff für Abfolgen des 'Braunen Doggers' mit einem Tonmineralgehalt von 20 bis 40 Gew.-%.
Sorptionskoeffizient	Auch Verteilungskoeffizient, K_d , genannt (siehe dort).
swisstopo	Bundesamt für Landestopografie (www.swisstopo.admin.ch)
TA	Tonige Abfolge, Überbegriff für tonreiche (> 40 Gew.-% Tonminerale) Abfolgen innerhalb des 'Braunen Doggers'.
USM	Untere Süsswassermolasse, geologische Formation des nordalpinen Vorlandbeckens, deren Sedimente ca. 30 bis 20 Millionen Jahre alt sind.
VA	Verschärfte Anforderungen für die Bewertung der Indikatoren, diese wurden von der Nagra in Etappe 1 SGT für die Identifikation geeigneter geologisch-tektonischer Grossräume, potenzieller Wirtgesteine und geeigneter Konfigurationen definiert und dort angewendet, sie werden (identisch oder modifiziert) in Etappe 2 SGT erneut angewendet.
Vol.-%	Volumenprozent, auf das Volumen bezogene prozentuale Betrachtung.
WG	Wirtgestein, Gesteinsformation, die das Lager mit seinen Abfällen aufnimmt und die Hauptbarriere für die Rückhaltung der radioaktiven Stoffe darstellt und für den Schutz der technischen Barrieren massgebend ist.
WLB	Standortgebiet Wellenberg
ZNO	Standortgebiet Zürich Nordost
Zugangsbauwerke	Zugänge zum Hauptlager, zum Pilotlager und zu den Testbereichen.

10 Referenzen

- AF Consult (2012):* HA Experiment: Hydraulic Database Phases 1 – 16 Version 1.0. (1990/04 - 12/2011), Technical Note 2010-74 Mont Terri Project, St-Ursanne.
- AG SiKa, KES (2011):* Sachplan geologische Tiefenlager (SGT) Etappe 2 – Fachbericht zu den ergänzenden Untersuchungen im Hinblick auf die Einengung, Fachbericht Arbeitsgruppe Sicherheit Kantone und Kantonale Expertengruppe Sicherheit, Zürich.
- Allenbach R. (2001):* Synsedimentary tectonics in an epicontinental sea: A new interpretation of the Oxfordian basins of Northern Switzerland. *Eclogae Geologicae Helveticae* 94, 265-287.
- Allenbach R.P. (2002):* The ups and downs of „Tectonic Quiescence“—recognizing differential subsidence in the epicontinental sea of the Oxfordian in the Swiss Jura Mountains. *Sedimentary Geology* 150, 323-342.
- Allia V. (1996):* Sedimentologie und Ablagerungsgeschichte des Opalinustons in der Nordschweiz, Dissertation Universität Basel, Basel.
- Anagnostou G. (2016a):* Sachplan Geologische Tiefenlager, Etappe 2 - Comparative rock-support interaction analyses (revised) - (Revision includes: axisymmetric effective stress analyses considering cutoff of negative pore pressures) Auftragsbericht ETH Zürich, Zürich.
- Anagnostou G. (2016b):* Sachplan Geologische Tiefenlager, Etappe 2 - Ground response curves and rock-support interaction analyses for the tunnel profiles F, D and K09, Auftragsbericht ETH Zürich, Zürich.
- Anagnostou G. (2016c):* Sachplan Geologische Tiefenlager, Etappe 2 - Ground response curves for a material exhibiting a sublinear strength envelope at a low confinement, Auftragsbericht ETH Zürich, Zürich.
- Axpo (2012):* Prognose der Untergrundtemperaturen für das Versorgungsgebiet der Axpo AG, Axpo Interner Bericht, Axpo AG, Neue Energien, Glattburg.
- BAG (2015):* Auswirkungen einer verlängerten Abklinglagerung auf die radioaktiven Abfälle, Bericht der Untergruppe «Abklinglager».
- Ballentine C.J., Mazurek M., Gautschi A. (1994):* Thermal constraints on crustal rare gas release and migration: Evidence from Alpine fluid inclusions. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 58, 4333-4348.
- BFE (2011a):* Sachplan geologische Tiefenlager – Bericht über die Ergebnisse der Anhörung zu Etappe 1, Bericht 003891809 Bundesamt für Energie, Bern.
- BFE (2011b):* Sachplan geologische Tiefenlager – Konzeptteil, Bundesamt für Energie, Bern.
- Bradbury M., Baeyens B. (2011):* Predictive sorption modelling of Ni(II), Co(II), Eu(III), Th(IV) and U(VI) on MX-80 bentonite and Opalinus Clay: A „bottom-up“ approach. *Applied Clay Science* 52, 27-33.
- Bradbury M., Baeyens B., Thoenen T. (2010):* Sorption data bases for generic Swiss argillaceous, crystalline and calcareous rock systems, PSI Bericht Nr. 10-03 Paul Scherrer Institut, Villigen.
- Burkhalter R.M. (1996):* Die Passwang-Alloformation (unteres Aalénien bis unteres Bajocien) im zentralen und nördlichen Jura. *Eclogae Geologicae Helveticae* 89, 875-934. DOI: 10.5169/seals-167927.
- Carlson L., Karnland O., Oversby V.M., Rance A.P., Smart N.R., Schnellmann M. (2007):* Experimental studies of the interactions between anaerobically corroding iron and bentonite. *Physics and Chemistry of the Earth* 32, 334-345.

-
- Dewhurst D., Yang Y., Aplin A.C. (1999):* Permeability and fluid flow in natural mudstones. Geological Society, London, Special Publications 158, 23-43.
- EGT (2016):* Sachplan Geologische Tiefenlager, Etappe 2 – Stellungnahme der EGT zum Vorschlag weiter zu untersuchender geologischer Standortgebiete, Expertenbericht zuhanden des ENSI, Expertengruppe Geologische Tiefenlagerung, Brugg.
- ENSI-B05:* Anforderungen an die Konditionierung radioaktiver Abfälle, Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat, Richtlinie, Würenlingen, 2007.
- ENSI-G03:* Spezifische Auslegungsgrundsätze für geologische Tiefenlager und Anforderungen an den Sicherheitsnachweis, Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat, Richtlinie, Würenlingen, 2009.
- ENSI 10/677:* Stellungnahme zur Kostenstudie 2011 über die Stilllegungs- und Entsorgungskosten der Kernanlagen in der Schweiz, Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat, Brugg, 2012.
- ENSI 33/43:* Sachplan geologische Tiefenlager, Etappe 1: Beurteilung der für das Einengungsverfahren verwendeten Indikatoren und der von der Nagra festgelegten Mindestanforderungen und Bewertungsskalen, Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat, Technische Beurteilung, Brugg, 2010.
- ENSI 33/54:* Sachplan geologische Tiefenlager, Etappe 1: Überprüfung des Abfallinventars, Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat, Technische Beurteilung, Brugg, 2010.
- ENSI 33/063:* Sachplan Geologische Tiefenlager (SGT) Etappe 1: Beurteilung der glazialen Tiefenerosion im Rahmen der Festlegung der geologischen Standortgebiete, Dr. von Moos AG Beratende Geologen und Ingenieure, Expertenbericht zuhanden des ENSI, Zürich, 2009.
- ENSI 33/070:* Sicherheitstechnisches Gutachten zum Vorschlag geologischer Standortgebiete, Sachplan geologische Tiefenlager, Etappe 1, Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat, Brugg, 2010.
- ENSI 33/075:* Anforderungen an die provisorischen Sicherheitsanalysen und den sicherheitstechnischen Vergleich, Sachplan geologische Tiefenlager Etappe 2, Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat, Brugg, 2010.
- ENSI 33/115:* Stellungnahme zu NTB 10-01 «Beurteilung der geologischen Unterlagen für die provisorischen Sicherheitsanalysen in Etappe 2 SGT», Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat, Stellungnahme, Brugg, 2011.
- ENSI 33/142:* 1. Fachsitzung zum Thema Bewertungsmethodik (23. August 2011), Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat, Protokoll, Brugg, 2011.
- ENSI 33/154:* Präzisierungen zur sicherheitstechnischen Methodik für die Auswahl von mindestens zwei Standortgebieten je für HAA und SMA in Etappe 2 SGT, Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat, Aktennotiz, Brugg, 2013.
- ENSI 33/155:* Ablauf der Überprüfung des geologischen Kenntnisstands vor Einreichen der sicherheitstechnischen Unterlagen für Etappe 2 SGT, Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat, Aktennotiz, Brugg, 2013.
- ENSI 33/170:* Anforderungen an die bautechnischen Risikoanalysen und an ergänzende Sicherheitsbetrachtungen für die Zugangsbauwerke in Etappe 2 SGT, Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat, Aktennotiz, Brugg, 2013.
- ENSI 33/219:* Verification of Nagra's Biosphere Modelling Results - Project „Opalinus Clay“, AMPHOS21 Consulting S.L., Expertenbericht zuhanden des ENSI, Barcelona, 2012.

- ENSI 33/366*: Zwischenhalt-Fachsitzung: „Gasdruckaufbau und Gastransport im Tiefenlager“, Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat, Protokoll, Brugg, 2014.
- ENSI 33/445*: Audit des Verfahrens zur Ermittlung der Nuklidvektoren von Betriebsabfällen der Kernkraftwerke, Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat, Aktennotiz, Brugg, 2015.
- ENSI 33/452*: Überprüfung des Schichtmodells und des GIS-Verschnittprozesses der Nagra, Dr. von Moos AG Beratende Geologen und Ingenieure, Expertenbericht zuhanden des ENSI, Zürich, 2016.
- ENSI 33/453*: Prüfung Langzeitstabilität und Quartärgeologie, Dr. von Moos AG Beratende Geologen und Ingenieure, Expertenbericht zuhanden des ENSI, Zürich, 2015.
- ENSI 33/454*: Nutzungskonflikte, Dr. von Moos AG Beratende Geologen und Ingenieure, Expertenbericht zuhanden des ENSI, Zürich, 2015.
- ENSI 33/455*: Beurteilung der Explorationskonzepte für Etappe 3 SGT, Dr. von Moos AG Beratende Geologen und Ingenieure, Expertenbericht zuhanden des ENSI, Zürich, 2015.
- ENSI 33/456*: Bautechnische Beurteilung der Standortareale für Oberflächenanlagen, Dr. von Moos AG Beratende Geologen und Ingenieure, Expertenbericht zuhanden des ENSI, Zürich, 2016.
- ENSI 33/457*: Prüfbericht zum Arbeitsbericht NAB 14-50 Bautechnische Risikoanalyse, Basler & Hofmann, Ingenieure und Planer AG, Expertenbericht zuhanden des ENSI, Zürich, 2015.
- ENSI 33/458*: Ergänzende Sicherheitsbetrachtungen für die Zugangsbauwerke, Basler & Hofmann, Ingenieure und Planer AG, Expertenbericht zuhanden des ENSI, Zürich, 2015.
- ENSI 33/459*: Expert review of Waste and Near-field topics, AMPHOS21 Consulting S.L., Expertenbericht zuhanden des ENSI, Zürich, 2015.
- ENSI 33/460*: Assessment of Geomechanical Properties, Maximum Depth below Ground Surface and EDZ Impact on Long Term Safety, ETH Zürich, Ingenieurgeologie, Expertenbericht zuhanden des ENSI, Zürich, 2015.
- ENSI 33/461*: Assessment of Geomechanical Properties of Intact Opalinus Clay, ETH Zürich, Ingenieurgeologie; Dr. von Moos AG Beratende Geologen und Ingenieure, Expertenbericht zuhanden des ENSI, Zürich, 2015.
- ENSI 33/462*: Sedimentologische und stratigraphische Aspekte des 'Braunen Doggers', Etappe 2, Sachplanverfahren, Expertenbericht zuhanden des ENSI, 2016.
- ENSI 33/463*: Evaluation of a gas experiment Phase I, Final Report - Literature review and scoping calculations, AMPHOS21 Consulting S.L., Expertenbericht zuhanden des ENSI, Zürich, 2015.
- ENSI 33/464*: Beurteilung der Datenverarbeitung und Interpretation der 2D-Seismik der Nagra, Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat, Expertenbericht, Brugg, 2016.
- ENSI 33/465*: Methodik (Multikriterienanalyse), Technische Universität Clausthal, Institut für Endlagerforschung, Expertenbericht zuhanden des ENSI, Clausthal-Zellerfeld, 2015.
- ENSI 33/467*: Sachplan geologische Tiefenlager (SGT) Etappe 2: Beurteilung der Standortareale und der Platzierung einer Oberflächenanlage - Ausgewählte externe Gefährdungen und Sicherheitsaspekte, Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat, Aktennotiz, Brugg, 2015.
- ENSI 33/468*: Überprüfung des modellhaften Inventars für radioaktive Materialien MIRAM 14, Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat, Aktennotiz, Brugg, 2016.

-
- ENSI 33/470*: Review of the kinematic interpretation of the tectonic structures in northern Switzerland, swisstopo, Expertenbericht zuhanden des ENSI, Wabern, 2016.
- ENSI 33/472*: Grundlagen zur Beurteilung von Tiefenlagerprojekten im Hinblick auf Karstphänomene, Schweizerisches Institut für Speläologie und Karstforschung, Expertenbericht zuhanden des ENSI, La Chaux-de-Fonds, 2015.
- ENSI 33/474*: The Pleistocene small mammals from Irchel, Switzerland - A taxonomic and biostratigraphic revision, Universidad de Zaragoza, Departamento de Ciencias de la Tierra, Área de Paleontología, Expertenbericht zuhanden des ENSI, Saragossa, Spanien, 2016.
- ENSI 33/476*: Nachforderung zum Indikator „Tiefenlage im Hinblick auf bautechnische Machbarkeit“ in Etappe 2 SGT, Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat, Aktennotiz, Brugg, 2015.
- ENSI 33/489*: Kompilation der lithologischen Variabilität und Eigenschaften des Opalinus-Ton im Felslabor Mont Terri, swisstopo, Expertenbericht zuhanden des ENSI, Wabern, 2014.
- ENSI 33/530*: Nachforderung des ENSI zum Indikator Tiefenlage im Hinblick auf bautechnische Machbarkeit, Basler & Hofmann, Ingenieure und Planer AG, Expertenbericht zuhanden des ENSI, Zürich, 2016.
- ENSI 33/531*: Beurteilung der nachgereichten geologischen und felsmechanischen Unterlagen zur maximalen Tiefenlage ETH Zürich, Ingenieurgeologie, Expertenbericht zuhanden des ENSI, Zürich, 2016.
- ENSI 33/539*: Qualitative Bewertung der optimierten Lagerperimeter in den geologischen Standortgebieten, Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat, Aktennotiz, Brugg, 2017.
- Favero V., Ferrari A., Laloui L. (2016)*: On the hydro-mechanical behaviour of remoulded and natural Opalinus Clay. *Engineering Geology* 208, 128-135.
- Ferrari A., Favero V., Laloui L. (2016)*: One-dimensional compression and consolidation of shales. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences* 88, 286-300.
- Fisher Q.J., Knipe R.J. (2001)*: The permeability of faults within siliciclastic petroleum reservoirs of the North Sea and Norwegian Continental Shelf.
- Föllmi K.B. (2016)*: Sedimentary condensation *Earth Science Reviews* 152, 143-180. DOI: 10.1016/j.earsci-rev.2015.11.016
- Gimmi T., Kosakowski G. (2011)*: How mobile are sorbed cations in clays and clay rocks? *Environmental Science & Technology* 45, 1443-1449.
- Gygi R.A., Coe A.L., Vail P.R. (1998)*: Sequence stratigraphy of the Oxfordian and Kimmeridgian stages (Lage Jurassic) in northern Switzerland, in De Graicanski P.C., Hardenbol J., Jacolin T., and Vail P.R., eds., *Mesozoic and Cenozoic Sequence Stratigraphy of European Basins. Soc. Sediment. Geol. Spec. Publ., Volume 60*, p. 427-455.
- HSK 30/9*: Gutachten zum Gesuch um Rahmenbewilligung für ein SMA-Endlager am Wellenberg, Hauptabteilung für die Sicherheit der Kernanlagen, Würenlingen, 1996.
- HSK 30/13*: Geosynthese Wellenberg NTB 96-01 : Beurteilung der Wasserfließwege, Hauptabteilung für die Sicherheit der Kernanlagen, Technische Beurteilung, Villigen, 1999.
- HSK 35/78*: Projekt Entsorgungsnachweis: Abfallinventar hochaktiver Abfälle, Hauptabteilung für die Sicherheit der Kernanlagen, Technische Beurteilung, Würenlingen, 2003.

- HSK 35/86*: Projekt Entsorgungsnachweis: Maximale Löslichkeiten im Nahfeld LMA (Zement), Hauptabteilung für die Sicherheit der Kernanlagen, Technische Beurteilung, Würenlingen, 2004.
- HSK 35/90*: Projekt Entsorgungsnachweis: Berechnung von Zerfall und Wärmeleistung von abgebrannten Brennelementen und verglasten HAA, Hauptabteilung für die Sicherheit der Kernanlagen, Beurteilung, Villigen, 2005.
- HSK 33/001*: Sachplan geologische Tiefenlager: Herleitung, Beschreibung und Anwendung der sicherheitstechnischen Kriterien für die Standortevaluation, Hauptabteilung für die Sicherheit der Kernanlagen, Würenlingen, 2007.
- Huber M., Huber A. (1998)*: Beurteilung des Konzeptes „Wasserfliesswege WLB“ (Geosynthese Wellenberg NTB 96-01), Expertenbericht zuhanden der HSK, Büro Dres. M. & A. Huber beratende Geologen, Zürich.
- IAEA (2004)*: Application of the Concepts of Exclusion, Exemption and Clearance, Safety Standards Safety guide No. RS-G-1.7 International Atomic Energy Agency, Vienna.
- IAEA (2014)*: Radiation Protection and Safety of Radiation Sources: International Basic Safety Standards, General Safety Requirements Part 3 No. GSR Part 3 International Atomic Energy Agency, Vienna.
- Itasca (2016)*: Parameterstudie Gebirgskennlinien und Vergleich Gebirgsverhalten - Profil F, D und K09, Auftragsbericht Itasca Consultants GmbH, Gelsenkirchen.
- KEG*: Kernenergiegesetz vom 21. März 2003, Schweiz, SR 732.1.
- KEV*: Kernenergieverordnung vom 10. Dezember 2004, Schweiz, SR 732.11.
- KNE (2011)*: Sachplan Geologische Tiefenlager (SGT) – Stellungnahme der KNE zur Klärung der Notwendigkeit ergänzender Untersuchungen für die provisorischen Sicherheitsanalysen in Etappe 2 SGT, Expertenbericht zuhanden des ENSI, Kommission Nukleare Entsorgung, Brugg.
- KNS (2011)*: Stellungnahme zur Notwendigkeit ergänzender geologischer Untersuchungen in Etappe 2 - Sachplan geologische Tiefenlager Etappe 2, KNS 23/247 Eidgenössische Kommission für nukleare Sicherheit, Brugg.
- Milnes A.G. (1999)*: Geosynthese Wellenberg 1996 (Nagra Technischer Bericht 96-01) - Kommentare zum geologischen Datensatz für die Sicherheitsanalyse, Expertenbericht zuhanden der HSK, GEA Consulting, Stockholm.
- Mosar J. (2010)*: Beurteilung der Tektonik im Standortgebiet Wellenberg (Kt. NW/OW) hinsichtlich eines Tiefenlagers für schwach- und mittelradioaktive Abfälle, Expertenbericht zuhanden der Baudirektion Nidwalden, Département de Géosciences, Université de Fribourg, Fribourg.
- NAB 04-11*: Entsorgungsprogramm 2005 – Lagerkonzepte SMA: Unterlagen zur Beurteilung Standortoptionen aus baulicher und wirtschaftlicher Sicht – felsmechanische Berechnung Kavernenquerschnitte, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Arbeitsbericht, Zürich, 2004.
- NAB 08-01*: Biosphärenmodellierung in den sicherheitstechnischen Betrachtungen für die Vororientierung zum Sachplan geologische Tiefenlager, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Arbeitsbericht, Wettingen, 2008.
- NAB 08-25*: EWS Bohrung Oftringen – Felsmechanische Tests, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Arbeitsbericht, Wettingen, 2008.

NAB 09-13: Reference pore water for the Effingen Member (Standortregion Südjura) for the provisional safety-analysis in the framework of the sectoral plan - interim results (SGT-ZE), Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Arbeitsbericht, Wettingen, 2009.

NAB 09-14: Reference pore waters for the Opalinus Clay and 'Brown Dogger' for the provisional safety-analysis in the framework of sectoral plan - interim results (SGT-ZE), Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Arbeitsbericht, Wettingen, 2009.

NAB 09-15: Reference pore water for the Helvetic marls for the provisional safety analysis in the framework of sectoral plan - interim results (SGT-ZE), Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Arbeitsbericht, Wettingen, 2010.

NAB 10-15: Beurteilung der geologischen Unterlagen für die provisorischen Sicherheitsanalysen in SGT Etappe 2 Biosphärenmodellierung: Grundlagen für die Testrechnungen, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Arbeitsbericht, Wettingen, 2010.

NAB 10-21: Ancillary rock and pore-water studies on drillcores from northern Switzerland, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Arbeitsbericht, Wettingen, 2011.

NAB 11-08: Bohrung Gösgen KB-5a: Felsmechanische Untersuchungen an Kernen der Effinger Schichten, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Arbeitsbericht, Wettingen, 2012.

NAB 11-20: Aufbau und Auswertung der Gesteinsparameter-Datenbank für Opalinuston, den 'Braunen Dogger', Effinger Schichten und Mergel-Formationen des Helvetikums, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Arbeitsbericht, Wettingen, 2011.

NAB 12-04 Rev.1: Geologische Profile Wellenberg 2012 Rev. 1, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Arbeitsbericht, Wettingen, 2014.

NAB 12-05: Analyse des rezenten Spannungsfeldes der Nordschweiz, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Arbeitsbericht, Wettingen, 2013.

NAB 12-07: Sachplan geologische Tiefenlager Etappe 2: Vorschläge zur Platzierung der Standortareale für die Oberflächenanlage der geologischen Tiefenlager sowie zu deren Erschliessung: Vorgehen und Informationen zur Erarbeitung der Vorschläge: Eine Übersicht, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Arbeitsbericht, Wettingen, 2012.

NAB 12-26: Biosphere Modelling for C-14: Description of the Nagra Model, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Arbeitsbericht, Wettingen, 2013.

NAB 12-27: Nagra's Biosphere Assessment Code SwiBAC 1.2: Model Definition, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Arbeitsbericht, Wettingen, 2013.

NAB 12-39: Gesteinsparameter der Wirtgesteine Opalinuston, 'Brauner Dogger', Effinger Schichten und Helvetische Mergel als Grundlage für die Sorptionsdatenbank, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Arbeitsbericht, Wettingen, 2013.

NAB 12-40: Untere Rahmengesteine des Opalinustons: Hydrogeologische Einheiten, Gesteinsparameter und Mächtigkeiten, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Arbeitsbericht, Wettingen, 2013.

NAB 12-41: Characterisation of Cenozoic brittle deformation of potential geological siting regions for radioactive waste repositories in Northern Switzerland based on structural geological analysis of field outcrops, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Arbeitsbericht, Wettingen, 2012.

- NAB 12-50*: Geotechnical characterization of core samples from the Schlattingen SLA-1 by LMS/EPFL, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Arbeitsbericht, Wettingen, 2012.
- NAB 12-51*: Sedimentologie und Stratigraphie des 'Brauner Doggers' und seiner westlichen Äquivalente, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Arbeitsbericht, Wettingen, 2013.
- NAB 12-54*: Rock and porewater characterisation on drillcores from the Schlattingen borehole, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Arbeitsbericht, Wettingen, 2013.
- NAB 12-55*: Temperaturen an den Grenzflächen der Wirtgesteine und unteren potenziellen Aquiferen, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Arbeitsbericht, Wettingen, 2012.
- NAB 12-57*: Palynostratigraphie des Mittleren Jura: Teil I – Bohrungen Benken, Schlattingen-1 und Weiach sowie einige Aufschlussproben der Lägern und deren Korrelation; Teil II – Bohrung Riniken, Aufschlussproben Bernhardholz, Dangstetten und Lägern, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Arbeitsbericht, Wettingen, 2012.
- NAB 13-04*: Biosphärenmodellierung für die provisorische Sicherheitsanalyse, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Arbeitsbericht, Wettingen, 2014.
- NAB 13-06*: Self-sealing of faults and fractures in argillaceous formations: Evidence from the petroleum industry, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Arbeitsbericht, Wettingen, 2013.
- NAB 13-09*: Seismische Datenverarbeitung der Nagra 2D-Seismik 2011/12 in Zeit, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Arbeitsbericht, Wettingen, 2013.
- NAB 13-10*: Regionale strukturgeologische Zeitinterpretation der Nagra 2D-Seismik 2011/12, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Arbeitsbericht, Wettingen, 2013.
- NAB 13-14*: Hydrogeologie Malm-Aquifer Südranden, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Arbeitsbericht, Wettingen, 2014.
- NAB 13-16*: Sedimentologie und Stratigraphie der Effinger Schichten, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Arbeitsbericht, Wettingen, 2013.
- NAB 13-18*: Geomechanical laboratory tests on Opalinus Clay cores from the bore hole Schlattingen SLA-1, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Arbeitsbericht, Wettingen, 2013.
- NAB 13-23*: Regional Hydrogeological Model of Northern Switzerland, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Arbeitsbericht, Wettingen, 2014.
- NAB 13-24*: Hydrogeological model Zürich Nordost und Südranden, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Arbeitsbericht, Wettingen, 2014.
- NAB 13-25*: Hydrogeological model Nördlich Lägern, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Arbeitsbericht, Wettingen, 2014.
- NAB 13-26*: Hydrogeological model Jura Ost, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Arbeitsbericht, Wettingen, 2014.
- NAB 13-27*: Hydrogeological Model Jura Südfuss, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Arbeitsbericht, Wettingen, 2014.
- NAB 13-28*: Documentation of the Nagra regional 3D geological model 2012, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Arbeitsbericht, Wettingen, 2013.

NAB 13-37: A model for radionuclide release from spent UO₂ and MOX fuel, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Arbeitsbericht, Wettingen, 2014.

NAB 13-43: Hydrogeologische Daten der Tiefenaquifere als Grundlage für die hydrogeologischen Modelle SGT Etappe 2, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Arbeitsbericht, Wettingen, 2013.

NAB 13-45: Diagnostic analyses of the geomechanical database from cores of the SLA-1 borehole, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Arbeitsbericht, Wettingen, 2013.

NAB 13-49: Nagra Biosphere Modelling: Review of Generic Data, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Arbeitsbericht, Wettingen, 2013.

NAB 13-50: Wasserführende Systeme in den Effinger Schichten, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Arbeitsbericht, Wettingen, 2013.

NAB 13-56: Thermo-hydraulic modelling of the temperature distribution in the siting region Nördlich Lägern, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Arbeitsbericht, Wettingen, 2014.

NAB 13-61: Standortareal WLB-1-SMA im Planungssperimeter Wellenberg für die Oberflächenanlage eines geologischen Tiefenlagers SMA – Planungsstudie, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Arbeitsbericht, Wettingen, 2013.

NAB 13-63: Hydrochemie und Isotopenhydrogeologie von Tiefengrundwässern in der Nordschweiz und im angrenzenden Süddeutschland, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Arbeitsbericht, Wettingen, 2014.

NAB 13-64: Standortareal JS-1-SMA im Planungssperimeter Jura-Südfuss für die Oberflächenanlage eines geologischen Tiefenlagers SMA – Planungsstudie, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Arbeitsbericht, Wettingen, 2013.

NAB 13-66: Standortareal JO-3+-SMA im Planungssperimeter Jura Ost für die Oberflächenanlage eines geologischen Tiefenlagers SMA – Planungsstudie, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Arbeitsbericht, Wettingen, 2013.

NAB 13-67: Standortareal JO-3+-HAA im Planungssperimeter Jura Ost für die Oberflächenanlage eines geologischen Tiefenlagers HAA – Planungsstudie, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Arbeitsbericht, Wettingen, 2013.

NAB 13-68: Standortareal JO-3+-Kombi im Planungssperimeter Jura Ost für die Oberflächenanlage eines geologischen Tiefenlagers Kombi – Planungsstudie, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Arbeitsbericht, Wettingen, 2013.

NAB 13-70: Härterippen in den Effinger Schichten am Jura-Südfuss zwischen Olten und Auenstein, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Arbeitsbericht, Wettingen, 2013.

NAB 13-75: Charakterisierung der Lockergesteinsaquifere für die Modellierung der Biosphäre, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Arbeitsbericht, Wettingen, 2014.

NAB 13-80: Seismische Datenverarbeitung der Nagra 2D-Seismik 2011/12 in Tiefe, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Arbeitsbericht, Wettingen, 2014.

NAB 13-81: Standortareal SR-4-SMA im Planungssperimeter Südranden für die Oberflächenanlage eines geologischen Tiefenlagers SMA – Planungsstudie, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Arbeitsbericht, Wettingen, 2013.

- NAB 13-83*: Gas related property distributions in the proposed host rock formations of the candidate siting regions in Northern Switzerland and in the Helvetic Zone, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Arbeitsbericht, Wettingen, 2013.
- NAB 13-92*: Sensitivity analyses of gas release from a L/ILW repository in the Opalinus Clay in the candidate siting regions of Northern Switzerland, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Arbeitsbericht, Wettingen, 2014.
- NAB 13-97*: Thermo-hydraulic modelling of the temperature distribution in the siting region Zürich Nordost and Südranden, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Arbeitsbericht, Wettingen, 2013.
- NAB 14-02*: Digitales Höhenmodell Basis Quartär der Nordschweiz - Version 2014 und ausgewählte Auswertungen, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Arbeitsbericht, Wettingen, 2014.
- NAB 14-03*: Standortareal NL-2-SMA im Planungssperimeter Nördlich Lägern für die Oberflächenanlage eines geologischen Tiefenlagers SMA – Planungsstudie, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Arbeitsbericht, Wettingen, 2014.
- NAB 14-04*: Standortareal NL-2-HAA im Planungssperimeter Nördlich Lägern für die Oberflächenanlage eines geologischen Tiefenlagers HAA – Planungsstudie, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Arbeitsbericht, Wettingen, 2014.
- NAB 14-05*: Standortareal NL-2-Kombi im Planungssperimeter Nördlich Lägern für die Oberflächenanlage eines geologischen Tiefenlagers Kombi – Planungsstudie, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Arbeitsbericht, Wettingen, 2014.
- NAB 14-06*: Standortareal NL-6-SMA im Planungssperimeter Nördlich Lägern für die Oberflächenanlage eines geologischen Tiefenlagers SMA – Planungsstudie, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Arbeitsbericht, Wettingen, 2014.
- NAB 14-07*: Standortareal NL-6-HAA im Planungssperimeter Nördlich Lägern für die Oberflächenanlage eines geologischen Tiefenlagers HAA – Planungsstudie, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Arbeitsbericht, Wettingen, 2014.
- NAB 14-08*: Standortareal NL-6-Kombi im Planungssperimeter Nördlich Lägern für die Oberflächenanlage eines geologischen Tiefenlagers Kombi – Planungsstudie, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Arbeitsbericht, Wettingen, 2014.
- NAB 14-09*: Einfluss der Salinität des Porenwassers der Wirtgesteine auf die Langzeitsicherheit der Tiefenlager, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Arbeitsbericht, Wettingen, 2014.
- NAB 14-10*: Sensitivity analyses of gas release from a SF/HLW repository in the Opalinus Clay in the candidate siting regions of Northern Switzerland, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Arbeitsbericht, Wettingen, 2014.
- NAB 14-11*: Thermo-hydraulic simulations of the near-field of a SF/HLW repository during early- and late-time post-closure period, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Arbeitsbericht, Wettingen, 2014.
- NAB 14-16*: Long-term Evolution of the Engineered Gas Transport System, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Arbeitsbericht, Wettingen, 2014.

NAB 14-21: Scientific basis for the production of gas due to corrosion in a deep geological repository, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Arbeitsbericht, Wettingen, 2014.

NAB 14-25: Erosion und Landschaftsentwicklung Nordschweiz: Zusammenfassung der Grundlagen im Hinblick auf die Beurteilung der Langzeitstabilität eines geologischen Tiefenlagers (SGT Etappe 2), Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Arbeitsbericht, Wettingen, 2014.

NAB 14-26: Seismotektonik der Zentralschweiz, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Arbeitsbericht, Wettingen, 2014.

NAB 14-27: Standortareal ZNO-6b-SMA im Planungssperimeter Zürich Nordost für die Oberflächenanlage eines geologischen Tiefenlagers SMA – Planungsstudie, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Arbeitsbericht, Wettingen, 2014.

NAB 14-28: Standortareal ZNO-6b-HAA im Planungssperimeter Zürich Nordost für die Oberflächenanlage eines geologischen Tiefenlagers HAA – Planungsstudie, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Arbeitsbericht, Wettingen, 2014.

NAB 14-29: Standortareal ZNO-6b-Kombi im Planungssperimeter Zürich Nordost für die Oberflächenanlage eines geologischen Tiefenlagers Kombi – Planungsstudie, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Arbeitsbericht, Wettingen, 2014.

NAB 14-33: Geologisches 3D-Modell Wellenberg, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Arbeitsbericht, Wettingen, 2014.

NAB 14-34: Tiefenkonvertierung der regionalen Strukturinterpretation der Nagra 2D-Seismik 2011/12, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Arbeitsbericht, Wettingen, 2014.

NAB 14-36: Provisorische Sicherheitsanalysen für SGT Etappe 2: Elektronischer Daten- und Resultateordner (EDR), Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Arbeitsbericht, Wettingen, 2014.

NAB 14-39: Thermo-hydraulic modelling of the temperature distribution in the siting region Jura Ost, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Arbeitsbericht, Wettingen, 2014.

NAB 14-50: Bautechnische Risikoanalyse zur Realisierung der Zugangsbauwerke, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Arbeitsbericht, Wettingen, 2014.

NAB 14-51: Ergänzende Sicherheitsbetrachtungen für die Untertageanlagen der geologischen Tiefenlager in der Betriebsphase: Vorgaben, Vorgehen und Dokumentation der Ergebnisse, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Arbeitsbericht, Wettingen, 2014.

NAB 14-52 Rev. 1: Geochemische Nahfeld-Daten zu den SMA und ATA für die provisorischen Sicherheitsanalysen in SGT Etappe 2, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Arbeitsbericht, Wettingen, 2014.

NAB 14-57: Reflexionsseismische Analyse der Effinger Schichten, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Arbeitsbericht, Wettingen, 2014.

NAB 14-58: Reflexionsseismische Analyse des 'Braunen Doggers', Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Arbeitsbericht, Wettingen, 2014.

NAB 14-59: Aktualisierte Abschätzung des Tonmineralgehalts anhand von Bohrlochmessungen in Bohrungen der Nordschweiz (update NAB 12-56), Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Arbeitsbericht, Wettingen, 2014.

NAB 14-72: Sachplan geologische Tiefenlager - Etappe 2: Standortspezifische Baugrundmodelle für die Zugangsbauwerke: Geologische Profile nach SIA 199 (Rampen und Schächte), Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Arbeitsbericht, Wettingen, 2014.

NAB 14-81: Beurteilung der Tiefenlage in Bezug auf die geotechnischen Bedingungen: Grundlagen für die Abgrenzung und Bewertung der Lagerperimeter, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Arbeitsbericht, Wettingen, 2014.

NAB 14-83: Konzepte für die Standortuntersuchungen der Etappe 3, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Arbeitsbericht, Wettingen, 2014.

NAB 14-87: Development and evolution of the Excavation Damaged Zone (EDZ) in the Opalinus Clay – A synopsis of the state of knowledge from Mont Terri, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Arbeitsbericht, Wettingen, 2014.

NAB 13-88: Local stress field sensitivity analysis – Case study Nördlich Lägern, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Arbeitsbericht, Wettingen, 2014.

NAB 14-95: Sedimentologie und Stratigraphie des Frühen Juras in der Nordschweiz: Staffelegg-Formation und sich nach Osten anschliessende Vorkommen, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Arbeitsbericht, Wettingen, 2015.

NAB 14-98: Sensitivity study of gas release from a L/ILW repository – Comparison of the host rock formations in the candidate siting regions, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Arbeitsbericht, Wettingen, 2014.

NAB 14-99: Unterlagen zum Platzbedarf in den Lagerperimetern der geologischen Standortgebiete, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Arbeitsbericht, Wettingen, 2014.

NAB 14-100: Geotechnische Beschreibung der oberflächennahen Zugangstunnelabschnitte basierend auf den Planungsstudien der Oberflächenanlagen, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Arbeitsbericht, Wettingen, 2014.

NAB 14-101: Geologie, Stratigraphie & bohrlochgeophysikalisches Logging der Bohrung Gösgen SB-4 (Rohdaten), Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Arbeitsbericht, Wettingen, 2014.

NAB 14-104: Erläuterungen zur Verpackung radioaktiver Abfälle im Endlagerbehälter, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Arbeitsbericht, Wettingen, 2014.

NAB 14-105: Regionale geologische Profilschnitte durch die Nordschweiz und 2D-Bilanzierung der Fernschubdeformation im östlichen Faltenjura: Arbeitsbericht zu SGT-Etappe 2, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Arbeitsbericht, Wettingen, 2015.

NAB 15-17 Rev 1: Understanding and Quantifying the Corrosion of Carbon Steel in Grouts relevant to the Swiss L/ILW Repository, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Arbeitsbericht, Wettingen, 2015.

NAB 16-28: Konzepte der Standortuntersuchungen für SGT Etappe 3 – Nördlich Lägern, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Arbeitsbericht, Wettingen, 2016.

NAB 16-41: ENSI-Nachforderung zum Indikator „Tiefenlage im Hinblick auf bautechnische Machbarkeit“ in SGT Etappe 2 - Zusammenfassende Darstellung der Zusatzdokumentation (Hauptbericht), Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Arbeitsbericht, Wettingen, 2016.

NAB 16-42: ENSI-Nachforderung zum Indikator „Tiefenlage im Hinblick auf bautechnische Machbarkeit“ in SGT Etappe 2 - Prüfung der Lager- und Barrierenkonzepte, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Arbeitsbericht, Wettingen, 2016.

NAB 16-43: ENSI-Nachforderung zum Indikator „Tiefenlage im Hinblick auf bautechnische Machbarkeit“ in SGT Etappe 2 - Geomechanische Unterlagen, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Arbeitsbericht, Wettingen, 2016.

NAB 16-44: ENSI-Nachforderung zum Indikator „Tiefenlage im Hinblick auf bautechnische Machbarkeit“ in SGT Etappe 2 - Standortspezifische geologische Modelle und geologische Gefährdungsbilder, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Arbeitsbericht, Wettingen, 2016.

NAB 16-45: ENSI-Nachforderung zum Indikator „Tiefenlage im Hinblick auf bautechnische Machbarkeit“ in SGT Etappe 2 - Projektkonzepte für die Lagerkammern und Versiegelungsstrecken und deren Bewertung, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Arbeitsbericht, Wettingen, 2016.

NAB 16-46: ENSI-Nachforderung zum Indikator „Tiefenlage im Hinblick auf bautechnische Machbarkeit“ in SGT Etappe 2 - Vortriebs- und Sicherungskonzepte für die Profile F, K09, K04, K04a und D [Ergänzende Unterlagen zu NAB 16-45], Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Arbeitsbericht, Wettingen, 2016.

NAB 17-01: Sachplan geologische Tiefenlager, Etappe 2: Fragen des ENSI und seiner Experten und zugehörige Antworten der Nagra, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Arbeitsbericht, Wettingen, 2017.

Nagra (1994): WLB: Geology, mineralogy and geochemistry of the Wellenberg, Nagra unpubl. Interner Bericht, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Wettingen.

Nagra (1996): WLB: Three-dimensional stress field modelling of the Wellenberg site – Phase 2, Nagra unpubl. Interner Bericht, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Wettingen.

Nagra (2015a): SGT Etappe 2: GIS-Analyse zum Einengungsprozess der Lagerperimeter, Wellenberg, Nagra unpubl. Interner Bericht, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Wettingen.

Nagra (2015b): SGT Etappe 2: GIS-Analyse zum Einengungsprozess der Lagerperimeter, Nordschweiz, Nagra unpubl. Interner Bericht, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Wettingen.

Nagra (2015c): Zusammenstellung von Angaben zur Gasbildung im Rahmen der Behördenbegleitung SGT Etappe 2, Nagra unpubl. interne Arbeitsnotiz, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Wettingen.

NEA (2010): Self-Sealing of Fractures in Argillaceous Formations in the Context of Geological Disposal of Radioactive Waste, NEA No. 6184 OECD Nuclear Energy Agency, Paris.

NTB 00-01: Sondierbohrung Benken – Untersuchungsbericht (Textband & Beilagenband), Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Technischer Bericht, Wettingen, 2001.

NTB 00-03: 3D-Seismik: Räumliche Erkundung der mesozoischen Sedimentschichten im Zürcher Weinland, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Technischer Bericht, Wettingen, 2001.

NTB 02-03: Projekt Opalinuston: Synthese der geowissenschaftlichen Untersuchungsergebnisse – Entsorgungsnachweis für abgebrannte Brennelemente; verglaste hochaktive sowie langlebige mittelaktive Abfälle, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Technischer Bericht, Wettingen, 2002.

NTB 02-05: Project Opalinus Clay: Safety Report – Demonstration of Disposal feasibility for spent fuel; vitrified high-level waste and long-lived intermediate level waste (Entsorgungsnachweis), Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Technischer Bericht, Wettingen, 2002.

NTB 04-06: Effects of Post-disposal Gas Generation in a Repository for Spent Fuel, High-level Waste and Long-lived Intermediate Level Waste Sited in Opalinus Clay, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Technischer Bericht, Wettingen, 2004.

NTB 08-04: Vorschlag geologischer Standortgebiete für das SMA- und das HAA-Lager – Geologische Grundlagen (Textband & Beilagenband), Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Technischer Bericht, Wettingen, 2008.

NTB 08-05: Vorschlag geologischer Standortgebiete für das SMA- und das HAA-Lager: Begründung der Abfallzuteilung, der Barrierensysteme und der Anforderungen an die Geologie; Bericht zur Sicherheit und technischen Machbarkeit, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Technischer Bericht, Wettingen, 2008.

NTB 09-03: Sorption Data Bases for Generic Swiss Argillaceous Rock Systems, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Technischer Bericht, Wettingen, 2010.

NTB 09-07: Comparison of the reference Opalinus Clay and MX-80 bentonite sorption data bases used in the Entsorgungsnachweis with sorption data bases predicted from sorption measurements on illite and montmorillonite, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Technischer Bericht, Wettingen, 2010.

NTB 10-01: Beurteilung der geologischen Unterlagen für die provisorischen Sicherheitsanalysen in SGT Etappe 2 – Klärung der Notwendigkeit ergänzender geologischer Untersuchungen, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Technischer Bericht, Wettingen, 2010.

NTB 12-01: The Long Term Geochemical Evolution of the Nearfield of the HLW Repository, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Technischer Bericht, Wettingen, 2014.

NTB 12-03: Effective Diffusion Coefficients and Porosity Values for Argillaceous Rocks and Bentonite: Measured and Estimated Values for Provisional Safety Analyses for SGT-E2, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Technischer Bericht, Wettingen, 2014.

NTB 12-04: Sorption Data Bases for Argillaceous Rocks and Bentonite for the Provisional Safety Analyses for SGT-E2, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Technischer Bericht, Wettingen, 2014.

NTB 12-05: Comparison of Sorption Measurements on Argillaceous Rocks and Bentonite with Predictions Using the SGT-E2 Approach to Derive Sorption Data Bases, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Technischer Bericht, Wettingen, 2014.

NTB 12-07: Geochemical Synthesis for the Effingen Member in Boreholes at Oftringen, Gösgen and Küttigen, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Technischer Bericht, Wettingen, 2012.

NTB 13-02: An Assessment of the Impact of the Long Term Evolution of Engineered Structures on the Safety-Relevant Functions of the Bentonite Buffer in a HLW Repository, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Technischer Bericht, Wettingen, 2014.

NTB 14-01: SGT Etappe 2: Vorschlag weiter zu untersuchender geologischer Standortgebiete mit zugehörigen Standortarealen für die Oberflächenanlage: Sicherheitstechnischer Bericht zu SGT-Etappe 2: Sicherheitstechnischer Vergleich und Vorschlag der in Etappe 3 weiter zu untersuchenden geologischen Standortgebiete, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Technischer Bericht, Wettingen, 2014.

NTB 14-02-I: SGT Etappe 2: Vorschlag weiter zu untersuchender geologischer Standortgebiete mit zugehörigen Standortarealen für die Oberflächenanlage: Geologische Grundlagen: Dossier I: Einleitung und Zusammenfassung, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Technischer Bericht, Wettingen, 2014.

NTB 14-02-II: SGT Etappe 2: Vorschlag weiter zu untersuchender geologischer Standortgebiete mit zugehörigen Standortarealen für die Oberflächenanlage: Geologische Grundlagen: Dossier II: Sedimentologische und Tektonische Verhältnisse, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Technischer Bericht, Wettingen, 2014.

NTB 14-02-III: SGT Etappe 2: Vorschlag weiter zu untersuchender geologischer Standortgebiete mit zugehörigen Standortarealen für die Oberflächenanlage: Geologische Grundlagen: Dossier III: Geologische Langzeitentwicklung, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Technischer Bericht, Wettingen, 2014.

NTB 14-02-IV: SGT Etappe 2: Vorschlag weiter zu untersuchender geologischer Standortgebiete mit zugehörigen Standortarealen für die Oberflächenanlage: Geologische Grundlagen: Dossier IV: Geomechanische Unterlagen, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Technischer Bericht, Wettingen, 2014.

NTB 14-02-V: SGT Etappe 2: Vorschlag weiter zu untersuchender geologischer Standortgebiete mit zugehörigen Standortarealen für die Oberflächenanlage: Geologische Grundlagen: Dossier V: Hydrogeologische Verhältnisse, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Technischer Bericht, Wettingen, 2014.

NTB 14-02-VI: SGT Etappe 2: Vorschlag weiter zu untersuchender geologischer Standortgebiete mit zugehörigen Standortarealen für die Oberflächenanlage: Geologische Grundlagen: Dossier VI: Barriereneigenschaften der Wirt- und Rahmengesteine, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Technischer Bericht, Wettingen, 2014.

NTB 14-02-VII: SGT Etappe 2: Vorschlag weiter zu untersuchender geologischer Standortgebiete mit zugehörigen Standortarealen für die Oberflächenanlage: Geologische Grundlagen: Dossier VII: Nutzungskonflikte, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Technischer Bericht, Wettingen, 2014.

NTB 14-02-VIII: SGT Etappe 2: Vorschlag weiter zu untersuchender geologischer Standortgebiete mit zugehörigen Standortarealen für die Oberflächenanlage: Geologische Grundlagen: Dossier VIII: Charakterisierbarkeit und Explorierbarkeit, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Technischer Bericht, Wettingen, 2014.

NTB 14-03: SGT Etappe 2: Vorschlag weiter zu untersuchender geologischer Standortgebiete mit zugehörigen Standortarealen für die Oberflächenanlage: Charakteristische Dosisintervalle und Unterlagen zur Bewertung der Barrierensysteme, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Technischer Bericht, Wettingen, 2014.

NTB 14-04: Modellhaftes Inventar für radioaktive Materialien – MIRAM 14, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Technischer Bericht, Wettingen, 2014.

NTB 14-06: Solubility of Radionuclides in a Bentonite Environment for Provisional Safety Analyses for SGT-E2, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Technischer Bericht, Wettingen, 2014.

NTB 14-07: Solubility of Radionuclides in a Concrete Environment for Provisional Safety Analyses for SGT-E2, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Technischer Bericht, Wettingen, 2014.

- NTB 14-08*: Sorption Data Base for the Cementitious Near Field of L/ILW and ILW Repositories for Provisional Safety Analyses for SGT-E2, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Technischer Bericht, Wettingen, 2014.
- NTB 14-09*: Provisional Safety Analyses for SGT Stage 2. Models: Codes and General Modelling Approach, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Technischer Bericht, Wettingen, 2014.
- NTB 14-11*: Geochemical Evolution of the L/ILW Near Field, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Technischer Bericht, Wettingen, 2014.
- NAB 14-12*: Ergänzende Untersuchungen in den EWS-Bohrungen: Effingen, Gasingen-Galten, Herznach, Tegerfelden-1, Tegerfelden-2, Wölflinswil-1, Wölflinswil-2 (AG) und Hemmental-2 (SH) - Stratigraphie und Bohrlochgeophysik - Rohdatenbericht, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Arbeitsbericht, Wettingen, 2014.
- NAB 14-88*: Simulation of layout determining fault networks based on 2D-seismic interpretations: Implications for subsurface space reserves in geological siting regions in northern Switzerland, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Arbeitsbericht, Wettingen, 2014.
- NTB 93-05*: Hydrological investigations at Wellenberg: Hydraulic packer testing in boreholes SB3;SB4 and SB6 – Methods and field results, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Technischer Bericht, Wettingen, 1992.
- NTB 93-28*: Untersuchungen zur Standorteignung im Hinblick auf die Endlagerung schwach- und mittelaktiver Abfälle – Geologische Grundlagen und Datensatz zur Beurteilung der Langzeitsicherheit des Endlagers für schwach- und mittelaktive Abfälle am Standort Wellenberg (Gemeinde Wolfenschiessen;NW), Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Technischer Bericht, Wettingen, 1993.
- NTB 96-01*: Geosynthese Wellenberg 1996: Ergebnisse der Untersuchungsphasen I und II, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Technischer Bericht, Wettingen, 1997.
- Nussbaum C., Bossart P. (2004)*: Compilation of K-values from packer tests in the Mont Terri rock laboratory, Technical Note 2005-10 Mont Terri Project, St-Ursanne.
- ONDRAF (2009)*: Review of sorption values for the cementitious near field of a near surface radioactive waste disposal facility, Geological disposal programme NIRON-TR report 2008–23 E Belgian Agency for Radioactive Waste and Enriched Fissile Materials (ONDRAF), Brussels.
- ONDRAF (2010)*: Additional sorption parameters for the cementitious barriers of a near-surface repository, Geological disposal programme NIRON-TR 2010-06 E Belgian Agency for Radioactive Waste and Enriched Fissile Materials (ONDRAF).
- Pearson F.J., Arcos D., Bath A., Boisson J.-Y., Fernández A.M., Gäbler H.-E., Gaucher E., Gautschi A., L. Grif-fault, Hernán P., Waber H.N. (2003)*: Mont Terri Project – Geochemistry of Water in the Opalinus Clay Formation at the Mont Terri Rock Laboratory. Berichte des BWG, Serie Geologie 5.
- Pfiffner A. (2011)*: Structural map of the Helvetic zone of the Swiss Alps - Explanatory notes, Bundesamt für Landestopografie swisstopo, Wabern.
- Pfiffner O.A., Burkhard M., Hänni R., Kammer A., Kligfield R., Mancktelow N.S., Menkveld J.W., Ramsay J.G., Schmid S.M., Zurbruggen R. (2010)*: Structural Map of the Helvetic Zone of the Swiss Alps, including Vorarlberg (Austria) and Haute Savoie (France), ohne Erläuterungen, Karte swisstopo, Wabern.
- Reisdorf A.G., Wetzel A., Schlatter R., Jordan P. (2011)*: The Staffelegg Formation: a new stratigraphic scheme for the Early Jurassic of northern Switzerland. *Swiss Journal of Geosciences* 104, 97-146. DOI: 10.1007/s00015-011-0057-1.

-
- SIA 199: Erfassen des Gebirges im Untertagebau, Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein, Norm, Schweiz, 1998.
- SIA 261: Einwirkung auf Tragwerke, Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein, Norm, Zürich, 2003.
- SIA 197: Projektierung Tunnel – Grundlagen, Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein, Norm, Zürich, 2004.
- SIA 112: Modell Bauplanung – Verständigungsnorm, Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein, Norm, Zürich, 2014.
- SKB (2010): Spent nuclear fuel for disposal in the KBS-3 repository, Technical Report SKB-TR-10-13 Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co., Stockholm.
- Steiner W., Metzger R. (1988): Erfahrungen aus Tunneln in quellendem Gestein. Bericht der Ingenieurgesellschaft Wisenberg-Tunnel an die SBB.
- Strasser A., Védrine S., Stienne N. (2012): Rate and synchronicity of environmental changes on a shallow carbonate platform (Lage Oxfordian, Swiss Jura Mountains). *Sedimentology* 59, 185-211.
- StSG: Strahlenschutzgesetz vom 22. März 1991, Schweiz, SR 814.50.
- StSV: Strahlenschutzverordnung vom 22. Juni 1994, Schweiz, SR 814.501.
- UVEK: Verordnung des UVEK über die Gefährdungsannahmen und die Bewertung des Schutzes gegen Störfälle in Kernanlagen vom 17. Juni 2009, Schweiz, SR 732.112.2.
- van Dorp F., Brennwald M.S. (2009): Plant uptake of carbon-14 released from underground disposal of radioactive waste. *Radioprotection* 44, 853-855.
- Van Loon L.R., Baeyens B., Bradbury M.H. (2005): Diffusion and retention of sodium and strontium in Opalinus clay: Comparison of sorption data from diffusion and batch sorption measurements, and geochemical calculations. *Applied Geochemistry* 20, 2351-2363.
- Weh (2002): Beurteilung der geologischen Unterlagen Wellenberg, Unpubl. Bericht z. Hd. Dr. P. Steiner, MNA.
- Wetzel A., Allenbach R., Allia V. (2003): Reactivated basement structures affecting the sedimentary facies in a tectonically „quiescent“ epicontinental basin: an example from NW Switzerland. *Sedimentary Geology* 157, 153-172. DOI: 10.1016/S0037-0738(02)0023-0.
- Wetzel A., Allia V. (2003): Der Opalinuston in der Nordschweiz. *Eclogae Geologicae Helvetiae* 96, 451-469.

Anhang A: Tabellen

Tabelle A1: Tabellarische Zusammenstellung der Bewertungen von Nagra (N) und ENSI (E) für die Kriterien-
gruppen «Eigenschaften des WG/EG», «Langzeitstabilität», «Zuverlässigkeit der geologischen Aussagen» und
«Bautechnische Eignung» und die dazugehörigen Kriterien und Indikatoren. *Der Bewertung des ENSI liegt im
Unterschied zur Nagra der alternative Lagerperimeter HAA-ZNO-aL506-r zugrunde.

Kriteriengruppe Kriterium Indikator	Bewertungs- objekt		SMA-SR- OPA		SMA-ZNO- OPA		SMA-NL- OPA		SMA-JO- OPA		SMA-JS- OPA		SMA-ZNO- BD		SMA-NL- BD		SMA-JS- EFF		SMA- WLB-MGL	
	N	E	N	E	N	E	N	E	N	E	N	E	N	E	N	E	N	E	N	E
KG1 Eigenschaften des WG/EG			3.9	4.2	4.4	4.5	4.2	4.3	4.3	4.3	4.0	4.0	4.1	4.2	3.9	4.1	3.3	3.2	3.7	3.3
1.1 Räumliche Ausdehnung			3.3	3.5	4.3	4.5	3.3	4.0	4.1	4.0	2.9	2.5	4.3	4.5	3.3	4.0	2.9	2.5	3.8	4.0
5 Mächtigkeit	EG/ LPmin	EG	3.5	3.5	4.5	4.5	4.5	4.5	3.5	3.5	2.5	0.5	4.1	4.5	4.5	4.5	2.5	0.5	4.5	4.5
8 Platzangebot untertags	LP	LP	3.1	3.5	4.1	4.5	2.1	3.5	4.7	4.5	3.3	4.5	4.5	4.5	2.1	3.5	3.3	4.5	3.1	3.5
1.2 Hydraulische Barrierenwirkung			3.7	4.5	4.5	4.5	4.6	4.5	4.2	4.5	4.2	4.5	4.4	4.5	4.5	4.5	4.0	4.2	4.1	2.5
9 Hydraulische Durchlässigkeit	WG- ss/LP	WG- ss	4.3	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.3	4.5	4.3	4.5	3.7	3.5	3.7	2.5
2 Tiefenlage unter Terrain im Hin- blick auf Gesteins-Dekompression	EG/ LPmin	WG- ss	2.7	4.5	4.5	4.5	4.7	4.5	4.1	4.5	4.1	4.5	4.5	4.5	4.7	4.5	4.3	4.5	4.1	2.5
10 Grundwasserstockwerke	EG/ LP	WG- ss	4.1	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.1	4.5	4.1	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.1	4.5	4.5	2.5
1.3 Geochemische Bedingungen			4.3	4.3	4.3	4.3	4.3	4.3	4.3	4.3	4.3	4.3	4.3	4.2	4.3	4.2	3.6	3.3	3.6	3.5
11 Mineralogie	WG- ss/LP	WG- ss	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	3.5	4.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5
12 pH	WG- ss/LP	WG- ss	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	3.5	4.5	4.5
13 Redox-Bedingungen	WG- ss/LP	WG- ss	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5
14 Salinität	WG- ss/LP	WG- ss	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5
15 Mikrobielle Prozesse	WG- ss/LP	WG- ss	4.1	4.5	4.1	4.5	4.1	4.5	4.1	4.5	4.1	4.5	4.1	4.5	4.1	4.5	3.3	2.5	3.3	2.5
16 Kolloide	WG- ss/LP	WG- ss	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	2.5	2.5	2.5	2.5
1.4 Freisetzungspfade			4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	3.4	3.7	3.4	3.7	2.7	2.7	3.2	3.1
17 Art der Transportpfade und Aus- bildung des Porenraums	WG- ss/LP	WG- ss	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.3	4.5	4.3	4.5	3.3	2.5	3.1	2.5
20 Transmissivität präferenzierter Freisetzungspfade	WG- ss/LP	WG- ss	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.3	4.5	4.3	4.5	3.1	3.5	3.1	3.5
22 Selbstabdichtungsvermögen	WG- ss/LP	WG- ss	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.3	4.5	4.3	4.5	3.1	3.5	2.5	2.5
18 Homogenität des Gesteinsaufbaus	WG/ LP	WG	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	2.5	3.5	2.5	3.5	2.5	2.5	2.7	2.5
19 Länge der massgebenden Freiset- zungspfade	WG- ss/LP	WG- ss	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	4.5	4.5
KG2 Langzeitstabilität			3.6	3.9	4.0	4.0	3.9	3.9	3.9	3.8	4.0	3.9	4.0	4.1	3.9	4.0	3.8	3.8	3.7	3.6
2.1 Beständigkeit der Standort- und Gesteinseigenschaften			3.7	4.2	4.2	4.2	4.2	4.2	4.2	4.2	4.0	3.8	4.2	4.2	4.1	4.2	3.3	3.2	3.3	2.8
23 Modellvorstellungen zur Langzeit- entwicklung (Geodynamik und Neotektonik)	EG/LP	EG	2.9	4.5	4.5	4.5	4.3	4.5	4.3	4.5	3.7	3.5	4.5	4.5	4.3	4.5	3.7	3.5	2.9	2.5
24 Seismizität	EG/LP	EG/LP	3.7	3.5	3.7	3.5	3.7	3.5	3.7	3.5	3.7	3.5	3.7	3.5	3.7	3.5	3.7	3.5	2.7	2.5
27 Potenzial zur Bildung neuer Was- serwegsamkeiten (Verkarstung)	WG/ LP	WG	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.3	4.5	4.3	4.5	2.5	2.5	4.3	3.5
2.2 Erosion			3.4	3.8	4.5	4.5	4.6	4.5	4.5	4.2	4.4	4.5	4.5	4.5	4.6	4.5	4.5	4.5	4.0	3.5
28 Erosion im Betrachtungszeitraum	EG/LP	EG	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	3.5	3.5
3 Tiefenlage unter lokaler Erosions- basis im Hinblick auf die Bildung neuer Rinnen	WG	WG	3.1	3.5	4.5	4.5	4.7	4.5	4.5	3.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.7	4.5	4.5	4.5	4.1	2.5
4 Tiefenlage unter Fels im Hinblick auf glaziale Tiefenerosion	WG	WG	2.5	3.5	4.5	4.5	4.7	4.5	4.5	4.5	4.3	4.5	4.5	4.5	4.7	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5
2.3 Lagerbedingte Einflüsse			3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.8	3.5	3.8	3.2	3.5	3.3	3.8
29 Auflockerungszone im Nahbereich der Untertagebauten	WG- ss/LP	WG- ss	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.1	3.5	3.1	3.5
30 Chemische Wechselwirkungen	WG- ss/LP	WG- ss	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	3.5	3.5	3.5	3.5
31 Verhalten des Wirtgesteins bzgl. Gas	WG- ss/LP	WG	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	3.5	2.5	3.5	3.1	3.5	3.3	4.5
32 Verhalten des Wirtgesteins bzgl. Temperatur	WG- ss/LP	WG/ EG																		
2.4 Nutzungskonflikte			3.9	3.9	3.8	3.9	3.5	3.5	3.5	3.5	4.1	3.9	3.8	3.9	3.5	3.5	4.1	3.9	4.2	4.3
33 Rohstoffvorkommen innerhalb des Wirtgesteins	WG/ LP	WG/ LP	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5
34 Rohstoffvorkommen unterhalb des Wirtgesteins	EG/LP	EG/LP	3.5	3.5	3.5	3.5	2.5	2.5	2.5	2.5	3.5	3.5	3.5	3.5	2.5	2.5	3.5	3.5	3.5	3.5

Kriteriengruppe Kriterium Indikator	Bewertungs- objekt		SMA-SR- OPA		SMA-ZNO- OPA		SMA-NL- OPA		SMA-JO- OPA		SMA-JS- OPA		SMA-ZNO- BD		SMA-NL- BD		SMA-JS- EFF		SMA- WLB-MGL		
			N	E	N	E	N	E	N	E	N	E	N	E	N	E	N	E	N	E	
35	Rohstoffvorkommen oberhalb des Wirtgesteins	EG/LP	EG/LP	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	3.1	3.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5
36	Mineral- und Thermalwassernutzungen	EG/LP	EG/LP	3.7	3.5	3.1	3.5	3.1	3.5	4.5	4.5	4.5	4.5	3.1	3.5	3.1	3.5	4.5	4.5	4.5	4.5
37	Geothermie und weitere energiebezogene Nutzungen des Untergrunds	EG/LP	EG/LP	3.3	3.5	3.3	3.5	2.7	2.5	2.7	2.5	3.3	2.5	3.3	3.5	2.7	2.5	3.3	2.5	4.1	4.5
KG3	Zuverlässigkeit der geologischen Aussagen			4.1	4.3	4.4	4.3	4.3	4.3	4.4	4.3	4.2	4.2	3.7	3.5	3.7	3.5	3.3	3.3	2.9	2.8
3.1	Charakterisierbarkeit der Gesteine			4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	3.6	3.0	3.6	3.0	2.8	3.0	3.3	3.0
39	Variabilität der Gesteinseigenschaften im Hinblick auf ihre Charakterisierbarkeit	WG-ss/LP	WG	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.1	2.5	4.1	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5
40	Erfahrungen	WG/LP	WG	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	3.1	3.5	3.1	3.5	3.1	3.5	4.1	3.5
3.2	Explorierbarkeit der räumlichen Verhältnisse			4.1	4.0	4.1	4.0	4.1	4.0	4.3	4.0	4.0	4.0	3.2	3.0	3.2	3.0	3.2	3.0	1.8	2.0
43	Explorationsverhältnisse im geologischen Untergrund	WG/LP	WG	4.1	4.5	4.3	4.5	4.3	4.5	4.3	4.5	4.1	4.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	1.5	1.5
44	Explorationsbedingungen an Oberfläche	LP	WG	4.1	3.5	3.9	3.5	3.9	3.5	4.3	3.5	3.9	3.5	3.9	3.5	3.9	3.5	3.9	3.5	2.1	2.5
3.3	Prognostizierbarkeit der Langzeitveränderungen			3.7	4.5	4.5	4.5	4.4	4.5	4.4	4.5	4.1	4.0	4.3	4.5	4.2	4.5	3.9	4.0	3.6	3.5
23	Modellvorstellungen zur Langzeitentwicklung (Geodynamik und Neotektonik)	EG/LP	EG	2.9	4.5	4.5	4.5	4.3	4.5	4.3	4.5	3.7	3.5	4.5	4.5	4.3	4.5	3.7	3.5	2.9	2.5
46	Unabhängige Evidenzen der Langzeitsolation	WG/LP	EG	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.1	4.5	4.1	4.5	4.1	4.5	4.3	4.5
KG4	Bautechnische Eignung			4.1	2.8	3.8	2.8	3.2	2.8	3.9	3.0	3.6	2.8	3.8	2.8	3.4	2.8	3.8	2.8	3.5	2.3
4.1	Felsmechanische Eigenschaften und Bedingungen			4.1	2.5	3.5	2.5	2.3	2.5	3.4	2.5	3.4	2.5	3.5	2.5	2.8	2.5	3.9	2.5	3.5	2.5
47	Gesteinsfestigkeiten und Verformungseigenschaften	WG-ss/LP		3.5		3.5		3.3		3.3		3.3		3.5		3.5		4.3		4.3	
1	Tiefenlage im Hinblick auf bautechnische Machbarkeit (u.B. Gesteinsfestigkeiten und Verformungseigenschaften)	WG-ss/LPmax	WG-ss	4.7	2.5	3.5	2.5	1.3	2.5	3.5	2.5	3.5	2.5	3.5	2.5	2.1	2.5	3.5	2.5	2.7	2.5
4.2	Untertägige Erschließung und Wasserhaltung			4.0	3.0	4.0	3.0	4.0	3.0	4.4	3.5	3.7	3.0	4.0	3.0	4.0	3.0	3.7	3.0	3.4	2.0
48	Geotechnische und hydrogeologische Verhältnisse in überlagernden Gesteinsformationen	EG/LP	EG/LP	3.5	2.5	3.5	2.5	3.5	2.5	4.3	3.5	2.9	2.5	3.5	2.5	3.5	2.5	2.9	2.5	4.1	2.5
49	Natürliche Gasführung (im Wirtgestein)	WG/LP	WG	4.5	3.5	4.5	3.5	4.5	3.5	4.5	3.5	4.5	3.5	4.5	3.5	4.5	3.5	4.5	3.5	2.7	1.5
KG1-4	Gesamtbewertung			3.9	3.8	4.1	3.9	3.9	3.8	4.1	3.9	3.9	3.7	3.9	3.6	3.7	3.6	3.5	3.3	3.4	3.0

sehr günstig ($4 \leq x \leq 5$)
 günstig ($3 \leq x < 4$)
 bedingt günstig ($2 \leq x < 3$)
 ungünstig ($1 \leq x < 2$)
 ungenügend ($0 \leq x < 1$)
 eindeutiger Nachteil

Kriteriengruppe Kriterium Indikator	Bewertungsobjekt	HAA-ZNO*		HAA-NL		HAA-JO			
		N	E	N	E	N	E		
KG1	Eigenschaften des WG/EG			4.3	4.3	4.2	4.3	4.1	4.3
1.1	Räumliche Ausdehnung			4.0	4.0	3.5	4.0	3.8	4.0
5	Mächtigkeit	EG/ LPmin	EG	4.5	4.5	4.5	4.5	3.5	3.5
8	Platzangebot untertags	LP	LP	3.5	3.5	2.5	3.5	4.1	4.5
1.2	Hydraulische Barrierenwirkung			4.5	4.5	4.6	4.5	3.9	4.5
9	Hydraulische Durchlässigkeit	WG-ss/ LP	WG-ss	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5
2	Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf Gesteins-Dekompression	EG/ LPmin	WG-ss	4.5	4.5	4.7	4.5	3.1	4.5
10	Grundwasserstockwerke	EG/LP	WG-ss	4.5	4.5	4.5	4.5	4.1	4.5
1.3	Geochemische Bedingungen			4.3	4.3	4.3	4.3	4.3	4.3
11	Mineralogie	WG-ss/ LP	WG-ss	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5
12	pH	WG-ss/ LP	WG-ss	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5
13	Redox-Bedingungen	WG-ss/ LP	WG-ss	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5
14	Salinität	WG-ss/ LP	WG-ss	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5
15	Mikrobielle Prozesse	WG-ss/ LP	WG-ss	4.1	4.5	4.1	4.5	4.1	4.5
16	Kolloide	WG-ss/ LP	WG-ss	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5
1.4	Freisetzungspfade			4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5
17	Art der Transportpfade und Ausbildung des Porenraums	WG-ss/ LP	WG-ss	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5
20	Transmissivität präferenzierter Freisetzungspfade	WG-ss/ LP	WG-ss	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5
22	Selbstabdichtungsvermögen	WG-ss/ LP	WG-ss	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5
18	Homogenität des Gesteinsaufbaus	WG/LP	WG	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5
19	Länge der massgebenden Freisetzungspfade	WG-ss/ LP	WG-ss	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5
KG2	Langzeitstabilität			3.9	3.8	3.8	3.7	3.7	3.7
2.1	Beständigkeit der Standort- und Gesteinseigenschaften			4.1	4.2	3.8	3.8	3.7	3.8
23	Modellvorstellungen zur Langzeitentwicklung (Geodynamik und Neotektonik)	EG/LP	EG	4.3	4.5	3.5	3.5	3.1	3.5
24	Seismizität	EG/LP	EG/LP	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5

Kriteriengruppe Kriterium Indikator		Bewertungsobjekt		HAA-ZNO*		HAA-NL		HAA-JO	
		N	E	N	E	N	E	N	E
27	Potenzial zur Bildung neuer Wasserwegsamkeiten (Verkarstung)	WG/LP	WG	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5
2.2	Erosion			4.0	3.8	4.4	4.2	3.8	3.8
28	Erosion im Betrachtungszeitraum	EG/LP	EG	4.3	4.5	4.3	4.5	4.3	4.5
3	Tiefenlage unter lokaler Erosionsbasis im Hinblick auf die Bildung neuer Rinnen	WG	WG	4.1	3.5	4.7	4.5	3.1	3.5
4	Tiefenlage unter Fels im Hinblick auf glaziale Tiefenerosion	WG	WG	3.5	3.5	4.3	3.5	4.1	3.5
2.3	Lagerbedingte Einflüsse			3.5	3.3	3.5	3.3	3.5	3.3
29	Auflockerungszone im Nahbereich der Untertagebauten	WG-ss/LP	WG-ss	4.3	3.5	4.3	3.5	4.3	3.5
30	Chemische Wechselwirkungen	WG-ss/LP	WG-ss	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5
31	Verhalten des Wirtgesteins bzgl. Gas	WG-ss/LP	WG	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5
32	Verhalten des Wirtgesteins bzgl. Temperatur	WG-ss/LP	WG/EG	2.7	2.5	2.7	2.5	2.7	2.5
2.4	Nutzungskonflikte			4.0	4.1	3.5	3.5	3.7	3.7
33	Rohstoffvorkommen innerhalb des Wirtgesteins	WG/LP	WG/LP	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5
34	Rohstoffvorkommen unterhalb des Wirtgesteins	EG/LP	EG/LP	4.5	4.5	2.5	2.5	2.5	2.5
35	Rohstoffvorkommen oberhalb des Wirtgesteins	EG/LP	EG/LP	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5
36	Mineral- und Thermalwassernutzungen	EG/LP	EG/LP	3.1	3.5	3.1	3.5	4.5	4.5
37	Geothermie und weitere energiebezogene Nutzungen des Untergrunds	EG/LP	EG/LP	3.3	3.5	2.7	2.5	2.7	2.5
KG3	Zuverlässigkeit der geologischen Aussagen			4.4	4.3	4.2	4.2	4.2	4.2
3.1	Charakterisierbarkeit der Gesteine			4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5
39	Variabilität der Gesteinseigenschaften im Hinblick auf ihre Charakterisierbarkeit	WG-ss/LP	WG	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5
40	Erfahrungen	WG/LP	WG	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5
3.2	Explorierbarkeit der räumlichen Verhältnisse			4.2	4.0	4.1	4.0	4.3	4.0

Kriteriengruppe Kriterium Indikator		Bewertungsobjekt		HAA-ZNO*		HAA-NL		HAA-JO	
				N	E	N	E	N	E
43	Explorationsverhältnisse im geologischen Untergrund	WG/LP	WG	4.3	4.5	4.3	4.5	4.3	4.5
44	Explorationsbedingungen an Oberfläche	LP	WG	4.1	3.5	3.9	3.5	4.3	3.5
3.3	Prognostizierbarkeit der Langzeitveränderungen			4.4	4.5	4.0	4.0	3.8	4.0
.23	Modellvorstellungen zur Langzeitentwicklung (Geodynamik und Neotektonik)	EG/LP	EG	4.3	4.5	3.5	3.5	3.1	3.5
46	Unabhängige Evidenzen der Langzeitisolation	WG/LP	EG	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5
KG4	Bautechnische Eignung			3.8	2.8	3.2	2.8	4.1	3.0
4.1	Felsmechanische Eigenschaften und Bedingungen			3.5	2.5	2.4	2.5	3.7	2.5
47	Gesteinsfestigkeiten und Verformungseigenschaften	WG-ss/ LP		3.5		3.3		3.3	
1	Tiefenlage im Hinblick auf bautechnische Machbarkeit (u.B. Gesteinsfestigkeiten und Verformungseigenschaften)	WG-ss/ LPmax	WG-ss	3.5	2.5	1.5	2.5	4.1	2.5
4.2	Untertägige Erschliessung und Wasserhaltung			4.0	3.0	4.0	3.0	4.4	3.5
48	Geotechnische und hydrogeologische Verhältnisse in überlagernden Gesteinsformationen	EG/LP	EG/LP	3.5	2.5	3.5	2.5	4.3	3.5
49	Natürliche Gasführung (im Wirtgestein)	WG/LP	WG	4.5	3.5	4.5	3.5	4.5	3.5
KG1-4	Gesamtbewertung			4.1	3.8	3.9	3.7	4.0	3.8

 sehr günstig
($4 \leq x \leq 5$)

 günstig
($3 \leq x < 4$)

 bedingt günstig
($2 \leq x < 3$)

 ungünstig
($1 \leq x < 2$)

 ungenügend
($0 \leq x < 1$)

 eindeutiger
Nachteil



Anhang B: Expertenberichte

1	ENSI 33/452	Überprüfung des Schichtmodells und des GIS-Verschnittprozesses der Nagra	K. Dubach, M. Wurst, B. Rick (Dr. von Moos AG)
2	ENSI 33/453	Prüfung Langzeitstabilität und Quartärgeologie	H.-R. Graf, S. Frank (Dr. von Moos AG)
3	ENSI 33/454	Nutzungskonflikte	V. Lützenkirchen, F. Matousek, B. Rick (Dr. von Moos AG)
4	ENSI 33/455	Beurteilung der Explorationskonzepte für Etappe 3 SGT	B. Rick, H.-R. Graf (Dr. von Moos AG)
5	ENSI 33/456	Bautechnische Beurteilung der Standortareale für Oberflächenanlagen	B. Rick (Dr. von Moos AG)
6	ENSI 33/457	Prüfbericht zum Arbeitsbericht NAB 14-50 Bautechnische Risikoanalyse	M. Sommer, S. Janele, P. Jost (Basler & Hofmann AG)
7	ENSI 33/458	Ergänzende Sicherheitsbetrachtungen für die Zugangsbauwerke	P. Zwicky, P. Jost (Basler & Hofmann AG)
8	ENSI 33/459	Expert review of Waste and Near-field topics	L. Duro, J. Bruno, D. Arcos (Amphos21 Consulting S.L.)
9	ENSI 33/460	Assessment of Geomechanical Properties, Maximum Depth below Ground Surface and EDZ Impact on Long Term Safety	F. Amann, S. Löw, M. Perras (ETH Zürich, Ingenieurgeologie)
10	ENSI 33/461	Assessment of Geomechanical Properties of Intact Opalinus Clay	F. Amann (ETH Zürich Ingenieurgeologie) M. Vogelhuber (Dr. von Moos AG)
11	ENSI 33/462	Sedimentologische und stratigraphische Aspekte des 'Braunen Doggers', Etappe 2, Sachplanverfahren	R. Burkhalter (swisstopo), P. Bitterli
12	ENSI 33/463	Evaluation of a gas experiment Phase I, Final Report – Literature review and scoping calculations	G. Román-Ross, A. Idiart, F. Grandia, O. Silva, L. Duro (Amphos21 Consulting S.L.)
13	ENSI 33/464	Beurteilung der Datenverarbeitung und Interpretation der 2D-Seismik der Nagra	E. Kissling (ETH Zürich, Institut für Geophysik), A.-G. Milnes (ETH Zürich emeritiert), M. Riede (DEA Deutsche Erdöl AG), A. Sommaruga (swisstopo expert), , F. Wenzel (Karlsruher Institut für Technologie),
14	ENSI 33/465	Methodik (Multikriterienanalyse)	K.-J. Röhlig (TU Clausthal)
15	ENSI 33/470	Review of the kinematic interpretation of the tectonic structures in northern Switzerland	C. Nussbaum, P. Bossart (swisstopo)

16	ENSI 33/472	Grundlagen zur Beurteilung von Tiefenlagerprojekten im Hinblick auf Karstphänomene	P.Y. Jeannin, A. Malard, U. Eichenberger (Schweizerisches Institut für Speläologie und Karstforschung), B. Rick (Dr. von Moos AG)
17	ENSI 33/474	The Pleistocene small mammals from Irchel, Switzerland – A taxonomic and biostratigraphic revision	G. Cuenca-Bescós (University of Zaragoza)
18	ENSI 33/489	Kompilation der lithologischen Variabilität und Eigenschaften des Opalinus-Ton im Felslabor Mont Terri	D. Jaeggi, P. Bossart, L. Wymann (swisstopo)
19	ENSI 33/530	Nachforderung des ENSI zum Indikator Tiefenlage im Hinblick auf bautechnische Machbarkeit	M. Ramoni, M. Sommer, P. Jost, S. Janele (Basler & Hofmann AG)
20	ENSI 33/531	Beurteilung der nachgereichten geologischen und felsmechanischen Unterlagen zur maximalen Tiefenlage	F. Amann, S. Löw (ETH Zürich, Ingenieurgeologie; mit einzelnen Beiträgen von Dr. von Moos AG)

Impressum:

Herausgeber
Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat
Industriestrasse 19
CH-5200 Brugg

Telefon +41 56 460 84 00
info@ensi.ch

www.ensi.ch

ENSI-AN-33/540

Quelle Topographische Karten:
Bundesamt für Landestopografie swisstopo

ENSI 33/540

ENSI, CH-5200 Brugg, Industriestrasse 19, Telefon +41 (0)56 460 84 00, e-mail: info@ensi.ch, www.ensi.ch