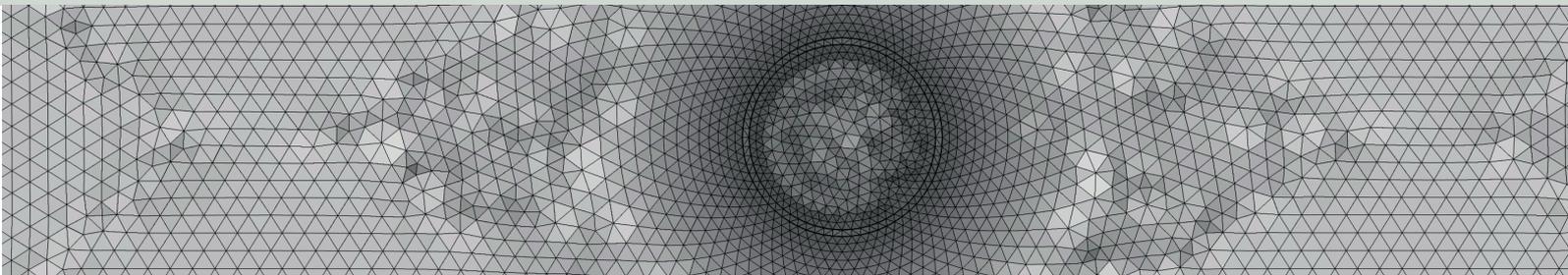




Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Swiss Confederation

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



Nutzungskonflikte

Expertenbericht

im Rahmen der Beurteilung des Vorschlags von mindestens zwei geologischen Standortgebieten pro Lagertyp, Etappe 2, Sachplan geologische Tiefenlager

**V. Lützenkirchen
F. Matousek
B. Rick**

Dr. von Moos AG

September 2015

Disclaimer:

Die im Bericht dokumentierten Ansichten und Schlussfolgerungen sind diejenigen der Autoren und stimmen nicht notwendigerweise mit denen des ENSI überein.

**Auftraggeber: Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat
5200 Brugg**

Sachplan geologische Tiefenlager (SGT) Etappe 2

Nutzungskonflikte

Expertenbericht zuhanden des

Eidgenössischen Nuklearsicherheitsinspektorat ENSI



Dr. von Moos AG

Geotechnisches Büro
Bachofnerstrasse 5, CH - 8037 Zürich

Beratende Geologen und Ingenieure

www.geovm.ch info@geovm.ch
Telefon +41 44 363 31 55 Fax +41 44 363 97 44

Filialen

Mäderstrasse 8, CH - 5401 Baden
Dorfstrasse 40, CH - 8214 Gächlingen

Telefon +41 56 222 09 45 Fax +41 56 221 50 45
Telefon +41 52 681 43 27 Fax +41 52 681 43 25

Bericht Nr. 8600-35

4. September 2015

Inhalt	Seite
Zusammenfassung	3
1. Einleitung	5
2. Verwendete Unterlagen	5
3. Vorgehen der Nagra	7
4. Vorgehen im Rahmen der Überprüfung	8
5. Darstellung und Beurteilung der Nutzungskonflikte	9
5.1 Identifikation von Nutzungskonflikten	9
5.2 Natürliche Rohstoffe	9
5.2.1 Kohlenwasserstoffe, Kohle	9
5.2.2 Salz	11
5.2.3 Steine und Erden	13
5.2.4 Erze	14
5.3 Mineral- und Thermalwassernutzungen	15
5.4 Geothermie	20
5.5 Weitere energiebezogene Nutzungen des Untergrundes aus Sicht der Nagra	23
5.5.1 Erdgasspeicherung	23
5.5.2 CO ₂ -Speicherung	23
5.6 Von der Nagra nicht berücksichtigte relevante Nutzungen	24
6. Beantwortung der Leitfragen	25
6.1 Leitfrage 1	25
6.2 Leitfrage 2	25
7. Weitere Bemerkungen	26

Zusammenfassung

Mit dem vom Bundesrat im Jahr 2008 genehmigten Konzept "Sachplan geologische Tiefenlager" (SGT; Bundesamt für Energie 2008) wurde das Standortwahlverfahren für die Tiefenlager festgelegt und dessen Umsetzung in Angriff genommen. Gemäss diesem Sachplanverfahren erfolgt die Auswahl von Standorten für geologische Tiefenlager in drei Etappen. Ende 2008 hat die Nagra für Etappe 1 sechs Standortgebiete für das geologische Tiefenlager für die schwach- und mittelaktiven Abfälle (SMA) und drei für das geologische Tiefenlager für die hochaktiven Abfälle (HAA) vorgeschlagen. In Etappe 2 ist basierend auf einem sicherheitstechnischen Vergleich eine Einengung auf mindestens zwei geologische Standortgebiete pro Lagertyp für die weiteren Untersuchungen in Etappe 3 vorzunehmen.

Die Nagra hat mit dem NTB 14-02, Geologische Grundlagen (Dossier VII: Nutzungskonflikte) die Grundlage zum Vergleich dieser Standortgebiete bezüglich möglicher Nutzungskonflikte vorgelegt. Anfangs 2015 hat die Nagra für Etappe 2 zwei geologische Standortgebiete vorgeschlagen, in welchen jeweils sowohl das SMA- als auch das HAA-Lager angeordnet werden können. Auch eine Kombination beider Lagertypen, ein sogenanntes Kombi-Lager, ist jeweils möglich. Es handelt sich dabei um die Standortgebiete Jura Ost und Zürich Nordost.

Das Eidgenössische Nuklearsicherheitsinspektorat ENSI hat die Experten der Dr. von Moos AG beauftragt, dieses Dossier VII anhand von Leitfragen des ENSI zu prüfen.

Als Nutzungskonflikte betrachtet werden Konstellationen, bei denen die heutige oder zukünftige Nutzung von Ressourcen durch ein Tiefenlager inkl. Zugangsbauwerke verunmöglicht oder beeinträchtigt wird, oder wenn eine erhebliche Wahrscheinlichkeit des unbeabsichtigten menschlichen Eindringens in das Tiefenlager besteht (NTB 14-02-VII, S.1). Zudem können Nutzungskonflikte entstehen, wenn mit indirekten Beeinträchtigungen der Barrierewirkung zu rechnen ist (Subsidenz des Untergrundes, induzierte Seismizität). Beurteilt werden die nutzungswürdigen Rohstoffe (Ressourcen) und die sich daraus allfällig ergebenden Nutzungskonflikte (Kriterium 2.4 'Nutzungskonflikte' gemäss HSK 33/001). Insbesondere wird beurteilt, ob im oder unterhalb des Wirtgesteins bzw. des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches Ressourcen vorkommen. Das Bundesamt für Energie beurteilt die Sicherheit des Tiefenlagers als günstig, wenn keine Rohstoffe, deren Nutzung die Barrierewirkung des Wirtgesteins signifikant beeinträchtigen würde, im besonderen Masse innerhalb des Standortgebietes vorkommen.

Die Nagra diskutiert in NTB 14-02 Dossier VII folgende Nutzungskonflikte:

- Rohstoffvorkommen innerhalb, unterhalb und oberhalb des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs (Kohlenwasserstoffe/Kohle, Salz, Steine und Erden, Erze)
- Mineral- und Thermalwasservorkommen und deren Nutzungen
- Hydrothermale und petrothermale Ressourcen für die geothermische Nutzung
- Weitere energiebezogene Nutzungen des Untergrundes (Erdgasspeicherung, CO₂-Speicherung)

Die Experten kommen nach Prüfung des NTB 14-02 Dossier VII und weiterer Grundlagenberichte der Nagra sowie relevanter Fachliteratur zum Ergebnis, dass die Nutzungskonflikte umfassend dargestellt und behandelt wurden. Die potenziellen Nutzungskonflikte sind nach Ansicht der Experten ausreichend konservativ und genügend standortspezifisch beurteilt worden. In Gebieten, wo die Kenntnisse über die im tiefen Untergrund vorhandenen Ressourcen und ihre Abbauwürdigkeit nur schlecht bekannt und einschätzbar sind, wurden aus heutiger Sicht eher konservative Annahmen gemacht.

Eine Nutzung der Salzlager käme lediglich im nördlichsten und westlichsten Bereich des *Standortgebiets Jura Ost* ausserhalb des Lagerperimeters infrage. Ob dort eine wirtschaftlich nutzbare Mächtigkeit vorhanden ist, ist aber noch nicht bekannt. In diesem Standortgebiet wird zwar ein Potenzial für Erdgas in dichten Sandsteinen angenommen, in der Bohrung Riniken an dessen Ostrand wurde jedoch kein Gas nachgewiesen. Im *Standortgebiet Zürich Nordost* besteht nur in Randbereichen ein spekulatives Potenzial für fossile Rohstoffe unterhalb der Wirtgesteine, weil im Lagerperimeter das Grundgebirge grösstenteils aus Kristallingesteinen besteht.

Ein wesentlicher, jedoch standortunabhängiger Punkt bei der Erschliessung von Kohlenwasserstofflagerstätten und hydrothermalen bzw. petrothermalen Geothermie sind die Auswirkungen des „hydraulic fracturing“ auf die Integrität der Barriereigenschaften. Dies erfordert die quantitative Abschätzung der Reichweiten der entsprechenden Auswirkungen und die Festlegung eines Schutzbereiches im Rahmen der Etappe 3 SGT. Die Experten empfehlen, die möglichen Auswirkungen einer potentiellen Nutzung fossiler Energieträger und von Salzlaugung (induzierte Seismizität und Subsidenzen) sowie geothermaler Nutzungen (Seismizität, Rissausbreitung) in Etappe 3 genauer abzuschätzen. Des Weiteren sollen mögliche Änderungen von Grundwasserzirkulationen im Muschelkalk unter dem Lagerperimeter als Folge von möglichen neuen Nutzungen sowie deren möglichen Auswirkungen auf hypogene Verkarstung des tieferen Untergrundes vertieft betrachtet werden.

Je nach Nutzung und damit verbundener Tätigkeiten können sich die jeweiligen Einwirkungsbereiche unterscheiden. Die Experten empfehlen daher, die Schutzbereiche / Konfliktzonen immissionsabhängig auszuscheiden.

Im definitiven Standortgebiet (Rahmenbewilligungsverfahren) empfehlen die Experten

- a) die Erschliessung und Nutzung von Kohlenwasserstoff- sowie Salzlagerstätten,
 - b) die Erschliessung und Nutzung von Mineral- und Thermalwasservorkommen,
 - c) die hydrothermale und petrothermale Nutzung
- unter dem Lagerperimeter (inklusive eines standortspezifisch zu definierenden lateralen Schutzbereichs) auszuschliessen.

Die oberflächennahe Nutzung von Sand und Kies in den quartären Ablagerungen oberhalb des Grundwasserspiegels erachten die Experten übereinstimmend mit der Nagra als nicht relevant für das Tiefenlager, sofern eine hydrologische und geotechnische Beeinflussung der Zugangsbauwerke ausgeschlossen werden kann.

1. Einleitung

Mit dem vom Bundesrat im Jahr 2008 genehmigten Konzept "Sachplan geologische Tiefenlager" (SGT; Bundesamt für Energie, 2008) wurde das Standortwahlverfahren für die Tiefenlager festgelegt und dessen Umsetzung in Angriff genommen. Gemäss diesem Sachplanverfahren erfolgt die Auswahl von Standorten für geologische Tiefenlager in drei Etappen.

Ende 2008 hat die Nagra für Etappe 1 sechs geologische Standortgebiete für das geologische Tiefenlager für die schwach- und mittelaktiven Abfälle (SMA) und drei für das geologische Tiefenlager für die hochaktiven Abfälle (HAA) vorgeschlagen. In Etappe 2 ist basierend auf einem sicherheitstechnischen Vergleich eine Einengung auf mindestens zwei geologische Standortgebiete pro Lagertyp für die weiteren Untersuchungen in Etappe 3 vorzunehmen. Dabei hat die Sicherheit des geologischen Tiefenlagers oberste Priorität.

Anfangs 2015 hat die Nagra für Etappe 2 zwei geologische Standortgebiete vorgeschlagen, in welchen jeweils sowohl das SMA- als auch das HAA-Lager angeordnet werden können. Auch eine Kombination beider Lagertypen, ein sogenanntes Kombi-Lager, ist jeweils möglich. Es handelt sich dabei um die Standortgebiete Jura Ost und Zürich Nordost.

Das Eidgenössische Nuklearsicherheitsinspektorat ENSI überprüft die von der Nagra eingereichten Unterlagen (Erläuterungen des Auswahlverfahrens) und die Vorschläge für die in Etappe 3 weiter zu untersuchenden Standortgebiete. Im Auftrag des ENSI wurde durch die Experten der Dr. von Moos AG der Themenbereich Nutzungskonflikte gemäss den Leitfragen des ENSI überprüft. Im vorliegenden Bericht werden die Ergebnisse der Prüfung zusammengefasst.

Im Rahmen der Prüfung wurde nur das Grundlegendokument "NTB 14-02-VII: Geologische Grundlagen, Dossier VII: Nutzungskonflikte" der Nagra beurteilt. Die Umsetzung in die standortspezifische Gesamtbewertung für das Kriterium "Nutzungskonflikte" findet sich im NTB 14-01 und ist nicht Thema dieser Beurteilung.

2. Verwendete Unterlagen

Folgende Berichte der Nagra stellen die Grundlage der Detailprüfung bezüglich der Nutzungskonflikte dar:

- [1] NTB 14-01: Sicherheitstechnischer Bericht zu SGT Etappe 2: Sicherheitstechnischer Vergleich und Vorschlag der in Etappe 3 weiter zu untersuchenden geologischen Standortgebiete, Dezember 2014, Nagra Technischer Bericht
- [2] NTB 14-02-VII: Geologische Grundlagen: Dossier VII: Nutzungskonflikte, Nagra Technischer Bericht

Ausserdem im Sinne einer Plausibilitätskontrolle berücksichtigt, aber nicht im Detail überprüft, wurden folgende Berichte:

- [3] NAB 13-23: Regional Hydrogeological Model of Northern Switzerland. - Nagra Arbeitsbericht, C. Gmünder, F. Malaguerra, S. Nusch, D. Traber, August 2014.
- [4] NAB 13-63: Hydrochemie und Isotopenhydrogeologie von Tiefengrundwässern in der Nordschweiz und im angrenzenden Süddeutschland. - Nagra Arbeitsbericht, H.N. Waber, M. Heidinger, G. Lorenz und D. Traber, November 2014.
- [5] NAB 14-18: Temperatur- und Wärmeflusskarten für definierte Horizonte im Untergrund der Nordostschweiz. - Nagra Arbeitsbericht, D. Ollinger, V. Badoux und J. Becker, November 2014.
- [6] NAB 14-50: Bautechnische Risikoanalyse zur Realisierung der Zugangsbauwerke, Nagra Arbeitsbericht Dezember 2014.
- [7] NAB 14-70: Potenzial der Kohlenwasserstoff-Ressourcen in der Nordschweiz. - Nagra Arbeitsbericht, W. Leu, Dezember 2014
- [8] NTB 14-02-V: Geologische Grundlagen: Dossier V: Hydrogeologische Verhältnisse, Nagra Technischer Bericht

Bereits vor Einreichung des Einengungsvorschlags durch die Nagra der Etappe 2 fanden zwischen dem ENSI und den Experten Besprechungen betreffend Barrierenintegrität statt. Auf der Basis eines Fragenkatalogs des ENSI erstellten die Experten im Herbst 2014 zum Themenkreis Auswirkungen von *hydraulic fracturing* ein internes Dokument:

- [9] Beeinflussung der Barrierenintegrität durch „hydraulic fracturing“ - Grundlagen für eine Grobbeurteilung. – Interner Bericht Dr. von Moos AG 30.09.2014, Nr. 8600.35a

Des Weiteren flossen Erkenntnisse eines weiteren Expertenberichts in den vorliegenden Bericht ein:

- [10] SISKa (2015): Grundlagen zur Beurteilung von Tiefenlagerprojekten im Hinblick auf Karstphänomene, Expertenbericht ENSI 33/472, Schweizerisches Institut für Speläologie und Karstforschung, La Chaux-de-Fonds.

3. Vorgehen der Nagra

Gemäss den Vorgaben im Sachplan geologische Tiefenlager (SGT) hat die Nagra ein mehrstufiges Optimierungs- und Auswahlverfahren durchgeführt (vgl. [1], Zusammenfassung). Innerhalb der Standortgebiete und basierend auf neu erarbeiteten bzw. dem neuen Kenntnisstand angepassten Grundlagedaten wurden sogenannte Lagerperimeter abgegrenzt, welche die räumlichen Kriterien im Wirtgestein erfüllen. Diese Lagerperimeter wurden anschliessend anhand sicherheitstechnischer Aspekte und charakteristischer Dosisintervalle miteinander verglichen. Der vorliegende Bericht konzentriert sich auf das sicherheitstechnische Kriterium 2.4 "Nutzungskonflikte" des SGT (vgl. Tabelle 1).

Im hier beurteilten Dossier VII „Nutzungskonflikte“ [2] zeigt die Nagra auf, ob innerhalb, oberhalb oder unterhalb des Wirtgesteins aus heutiger Sicht oder in absehbarer Zeit wirtschaftlich nutzungswürdige Rohstoffe, Mineral- und Thermalwasservorkommen, geothermische Ressourcen, Rohstoffe für die Bauindustrie, Erze etc. in besonderem Masse vorkommen und inwiefern sich daraus Nutzungskonflikte ergeben könnten.

Tabelle 1: *Beschreibung und Anwendung der Kriterien zu Sicherheit und technischer Machbarkeit, Kriterium 2.4 Nutzungskonflikte. Aus Bundesamt für Energie (2008). Einige Indikatoren wurden in [2] präzisiert ¹⁾.*

<i>Kriteriengruppe</i>	2 Langzeitstabilität
<i>Kriterium</i>	2.4 Nutzungskonflikte
<i>Zu beurteilende Aspekte</i>	Beurteilt werden die nutzungswürdigen Rohstoffe und die sich daraus allfällig ergebenden Nutzungskonflikte. Insbesondere wird beurteilt, ob im oder unterhalb des Wirtgesteins bzw. des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches aus heutiger Sicht wirtschaftlich nutzungswürdige Rohstoffe (z.B. Salz, Kohlenwasserstoffe, Geothermie, Mineralquellen und Thermen) im besonderen Masse vorkommen. Beurteilt wird ferner, ob die Erschliessung und Nutzung der Rohstoffe die Barrierenwirkung des Wirtgesteins beeinträchtigen (Schichtverletzung) oder das Lager direkt treffen könnte.
<i>Relevanz für die Sicherheit</i>	Günstig ist, wenn keine Rohstoffe, deren Nutzung die Barrierenwirkung des Wirtgesteins signifikant beeinträchtigen würde, in besonderem Masse innerhalb des Standortgebietes vorkommen.

¹⁾ Gegenüber den oben dargestellten Indikatoren des Bundesamts für Energie (2008) hat die Nagra gemäss [2] folgende Ergänzungen und Präzisionen vorgenommen: Mineral- und Thermalwassernutzungen (statt Mineralquellen und Thermen), Ergänzung des Indikators 'Geothermie' durch 'weitere energiebezogene Nutzungen: Hydrothermale und petrothermale Geothermie, Erdgasspeicherung, CO₂-Speicherung.

Als Nutzungskonflikte betrachtet werden Konstellationen, bei denen die Nutzung von Ressourcen durch ein Tiefenlager inkl. Zugangsbauwerke verunmöglicht oder beeinträchtigt wird oder wenn eine erhebliche Wahrscheinlichkeit des unbeabsichtigten menschlichen Eindringens in das Tiefenlager besteht ([2], S. 1). Zudem entstehen

Nutzungskonflikte, wenn die Erschliessung und Nutzung von Ressourcen die Barrierewirkung des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs beeinträchtigen könnten, sei es durch direktes Eindringen (z. B. Sondierbohrungen) in diesen Gebirgsbereich oder in das Lager selbst. Ebenso können aufgrund induzierter Bewegungen indirekte Beeinträchtigungen der Barrierewirkung auftreten ([2]; Subsidenz des Untergrundes, induzierte Seismizität).

Folgende Indikatoren für das Kriterium '2.4 Nutzungskonflikte' werden von der Nagra zur qualitativen Bewertung der geologischen Standortgebiete herangezogen ([1], Anhang C-29ff.):

- 33 Rohstoffvorkommen innerhalb des Wirtgesteins
- 34 Rohstoffvorkommen unterhalb des Wirtgesteins
- 35 Rohstoffvorkommen oberhalb des Wirtgesteins
- 36 Mineral- und Thermalwasserressourcen
- 37 Geothermie und weitere energiebezogene Ressourcen im Untergrund.

Sie gehören gemäss [1], Anhang A-12 nicht zu den entscheidungsrelevanten Indikatoren ("weitere zugehörige Indikatoren").

Die Bewertung der verschiedenen Lagerperimeter bezüglich der Nutzungskonflikte findet sich in [1], Kapitel 4.4 ff.

4. Vorgehen im Rahmen der Überprüfung

Der NTB 14-02-VII ist das zentrale Dokument unserer Überprüfung. Ergänzend dazu wurden zur Plausibilitätskontrolle weitere Nagra-Dokumente konsultiert (vgl. Kap. 2.1); ggfs. wurde im Text genannte Literatur beigezogen. Es wurden keine eigenen Untersuchungen durchgeführt, jedoch über die zitierte Literatur hinausgehende Recherchen. Dies betrifft insbesondere die Arbeiten zu [9].

Die Bewertung der verschiedenen Lagerperimeter ([1], Kapitel 4.4 ff.) ist nicht Gegenstand der vorliegenden Überprüfung, es werden nur die dafür notwendigen Grundlagen gemäss [2] geprüft.

Im Vordergrund der Überprüfung durch die Experten steht die Frage der Vorkommen von Ressourcen hinsichtlich Menge (Potential eines Rohstoffs) und Erschliessbarkeit sowie der damit verbundenen potentiellen Einwirkungen auf den einschlusswirksamen Gebirgsbereich. Die wirtschaftliche Würdigung muss demgegenüber zweitrangig behandelt werden, weil sie nur aus aktueller Sicht möglich ist (Prognosehorizont wenige Jahre bis Jahrzehnte), technische Risiken wie die Einwirkung auf das Tiefenlager aber auf viel längere Zeiträume bereits heute beurteilt werden müssen.

5. Darstellung und Beurteilung der Nutzungskonflikte

Die verschiedenen von der Nagra identifizierten Nutzungskonflikte werden in den folgenden Abschnitten zusammenfassend dargestellt, jeweils gefolgt von der Stellungnahme der Experten.

5.1 Identifikation von Nutzungskonflikten

Bei der Evaluation der Standortgebiete und der innerhalb dieser Gebiete realisierbaren Lagerperimeter wurden von der Nagra sowohl heute schon bestehende Nutzungen wie auch zukünftige Nutzungspotenziale identifiziert, welche in irgendeiner Weise in Wechselwirkung mit einem Tiefenlager stehen könnten.

Gemäss [2], Abschnitt 1.3, S. 2 ist für die Beurteilung der Nutzungskonflikte aus Sicht der Nagra der Lagerperimeter massgebend, nicht das gesamte Standortgebiet.

5.2 Natürliche Rohstoffe

5.2.1 Kohlenwasserstoffe, Kohle

Darstellung der Nagra

In den Wirtgesteinen der Standortgebiete werden keine heute oder zukünftig nutzbaren Gasvorkommen erwartet, da der Gehalt an organischem Material niedrig und die Maturität sehr gering ist. Auch in den übrigen mesozoischen sowie in den tertiären Einheiten ist gemäss [7] kein Potential für nutzbare Kohlenwasserstoffe vorhanden. Im Permokarbon hingegen besteht nach Ansicht der Nagra grundsätzlich ein Potenzial für Kohlevorkommen und damit zusammenhängende Gas-Nutzungen sowie für konventionelle und unkonventionelle Erdöl- und Erdgaslagerstätten (vgl. Abb 1).

Für die einzelnen Standortgebiete wird im NTB 14-02-VII [2] das Potenzial im Permokarbon für nutzbare Kohlenwasserstoffe und die vermutete Rohstoffmenge basierend auf [7] hergeleitet:

Im *Standortgebiet Zürich Nordost* besteht nur in Randbereichen ein spekulatives Potenzial für fossile Rohstoffe unterhalb der Wirtgesteine, weil im Lagerperimeter das Grundgebirge grösstenteils aus Kristallingesteinen besteht.

Im *Standortgebiet Südranden* werden Permokarbontröge vermutet, es liegen jedoch keine durch Bohrungen gesicherten Erkenntnisse vor, sodass ein spekulatives Potenzial für Kohleflözgas und Erdgas angenommen wird. Auch im *Standortgebiet Jura-Südfuss* besteht lediglich ein spekulatives Potenzial für Erdgas und Kohleflözgas.

Im *Standortgebiet Jura Ost* wird zwar ein Potenzial für Erdgas in dichten Sandsteinen des Permokarbon angenommen, in der Bohrung Riniken an dessen Ostrand wurde jedoch kein Gas nachgewiesen.

Im Standortgebiet Nördlich Lägern werden Potenziale für verschiedene (un-) konventionelle Gaslagerstätten sowie für Kohlebergbau vermutet.

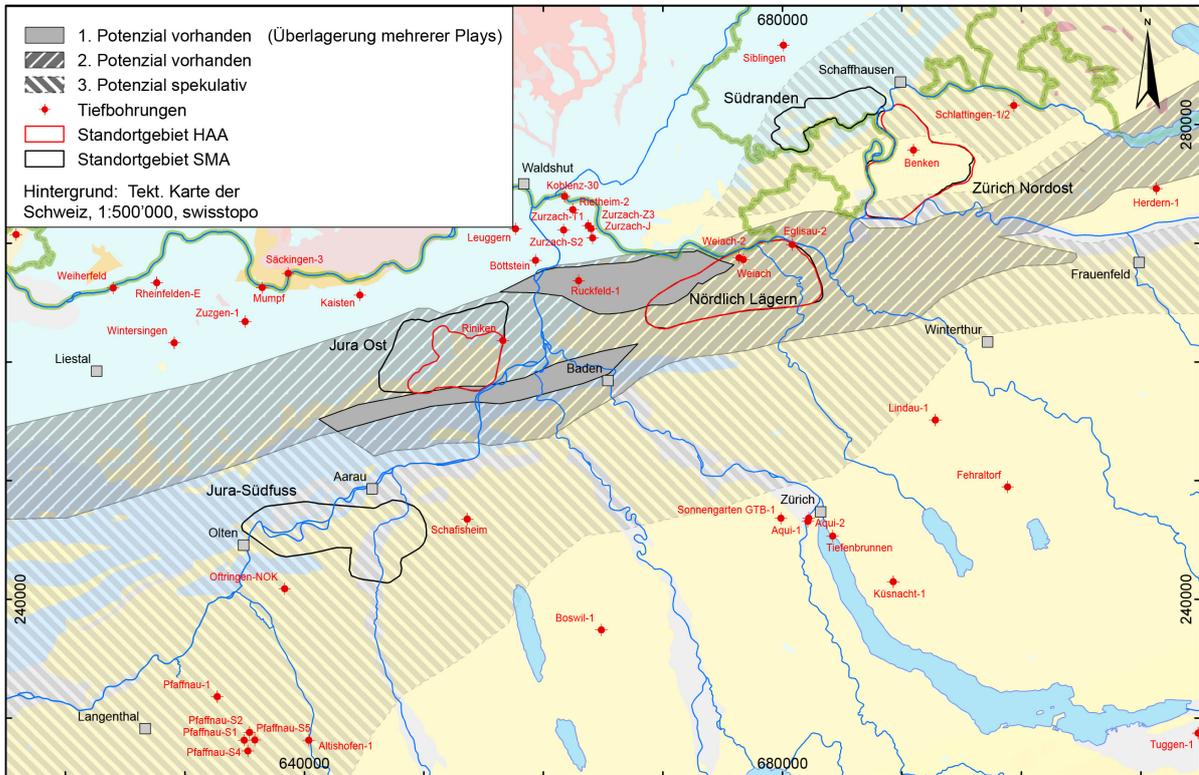


Abb. 1: Gesamtbeurteilung des Potenzials der verschiedenen paläozoischen Lagerstättentypen (sogenannte "Plays") aus [7], verkleinert.

Im Standortgebiet Wellenberg ist das Kohlenwasserstoffpotenzial aufgrund der wenigen Daten unklar und einzig in der Sondierbohrung SB1 nachgewiesen. Wegen der starken Tektonisierung ist die Ausdehnung von möglichen Gasvorkommen in den Sandsteinen des Nordhelvetischen Flysch jedoch räumlich beschränkt. Eine Erschliessung würde vermutlich vom Talboden aus erfolgen, so dass ein im zentralen Teil des Standortgebietes platziertes Tiefenlager von entsprechenden Bohrungen nicht tangiert würde. Nutzungskonflikte sind daher kaum vorhanden.

Stellungnahme der Experten (Kohlenwasserstoffe, Kohle)

Das Nutzungspotenzial für Kohlenwasserstoffe ist eingehend untersucht worden. Die Abklärungen und Darstellungen erscheinen den Experten plausibel und stufengerecht. Die resultierenden Nutzungskonflikte werden klar dargestellt, Unsicherheiten resp. die Unkenntnis der tieferen geologischen Verhältnisse in einigen Standortgebieten werden benannt.

Die Nutzung unkonventioneller Kohlenwasserstofflagerstätten (u.a. Schiefergas, -öl,

tight gas, teilweise auch bei anderen Lagerstättentypen) erfordert den Einsatz von 'Fracking'. Mit diesem ist das Risiko induzierter Seismizität und unkontrollierter Rissausbreitung verbunden ([9], siehe auch Hirschberg et al. 2015). Dies erfordert deshalb die quantitative Abschätzung der Reichweiten der entsprechenden Auswirkungen und die Festlegung eines Schutzbereiches im Rahmen der Etappe 3 SGT.

Nicht explizit erwähnt werden durch die Nagra mögliche mittelfristige Auswirkungen der Nutzungen, insbesondere mögliche Subsidenzen infolge der Gasentnahme oder Seismizität bei Gasentnahme oder Fluid-Verpressungen. Zwar erscheint es aufgrund der im Vergleich zu anderen grossen Erdgas- / Erdölfeldern kleinen Rohstoffmengen wenig wahrscheinlich, dass es zu bedeutenden Subsidenzen kommt, eine Risikoabschätzung erfolgte bisher aber nicht. Die Korrelation zwischen Subsidenz aufgrund von Fluid-Entnahme und Seismizität ist jedoch oft unklar (z.B. Suckale 2009).

Im definitiven Standortgebiet (Rahmenbewilligungsverfahren) empfehlen die Experten die Erschliessung und Nutzung von Kohlenwasserstofflagerstätten unter dem Lagerperimeter (inkl. eines lateralen Schutzbereiches) auszuschliessen.

5.2.2 Salz

Darstellung der Nagra

Nutzungskonflikte können entstehen, wenn eine Ausbeutung von Salzlager durch ein Tiefenlager verhindert würde oder die Exploration oder Förderung von Salzlager die Integrität eines Tiefenlagers beeinträchtigte. Ausgelaugte oder bergmännisch abgebaute Salzlager verursachen Subsidenzen, im Laufe dieser Prozesse könnten sich auch in angrenzenden geologischen Einheiten neue Brüche bilden und somit die hydraulische Durchlässigkeit im einschlusswirksamen Gebirgsbereich verändern. Gemäss der Einschätzung der Nagra sind wegen des Selbstabdichtungsvermögens der tonigen Wirtgesteine nur sehr grosse Subsidenzen von mehreren Metern kritisch (vgl. [2], Abschnitt 2.2.1).

Die Steinsalzvorkommen sind in der Nordschweiz an die Anhydritgruppe des Mittleren Muschelkalks gebunden. Typisch sind starke laterale Schwankungen der Steinsalzmächtigkeit aufgrund von natürlicher Subrosion; synsedimentäre und später angelegte Brüche erschweren zusätzlich eine genaue Prognose von Mächtigkeit und Tiefenlage.

Eine Nutzung der Salzlager käme lediglich im nördlichsten und westlichsten Bereich des *Standortgebiets Jura Ost* ausserhalb des Lagerperimeters infrage (vgl. [2], Abschnitt 2.2.2.3, S. 20). Ob dort eine wirtschaftlich nutzbare Mächtigkeit vorhanden ist, ist nicht bekannt. Ansonsten liegen die Salzlager entweder zu tief oder ihre Mächtigkeit ist wahrscheinlich zu gering, sodass aus heutiger Sicht eine wirtschaftliche Nutzung nicht infrage käme.

Stellungnahme der Experten (Salz)

Die Verbreitung der Salzlager in der Nordschweiz wird durch die Nagra in [2] eingehend und plausibel dargestellt. Auch bei diesem Rohstoff werden resultierende Nutzungskonflikte, Unsicherheiten und Grenzen der Kenntnisse des geologischen Untergrundes benannt.

Eine gewisse Inkonsequenz bei der Beurteilung der Auswirkungen sehen wir zwischen folgenden Feststellungen der Nagra:

- A) Die beim Auslaugungsverfahren oder bergmännischem Abbau unterhalb eines Tiefenlagers zu erwartenden Subsidenzen sollen gemäss Nagra [2] nur bei Beträgen von mehreren Metern kritisch sein, da das tonige Wirtgestein günstige geomechanische Eigenschaften besitze und Neubildungen von Brüchen ansonsten unkritisch seien.
- B) Beim Abbau von Steinen (siehe folgender Abschnitt) hingegen wird bei grossflächigem und tiefgreifendem Abbau aufgrund der Dekompaktion bereits ein negativer Einfluss auf den einschlusswirksamen Gebirgsbereich durch Erhöhung der hydraulischen Durchlässigkeit für denkbar gehalten.

Die Experten erachten es für schwierig, den jeweiligen Einfluss dieser Prozesse zu quantifizieren; jedenfalls wird vermutet, dass a priori nicht sicher entschieden werden kann, welcher kritischer ist.

Bisher war die Nutzung von Salzlager in der Schweiz nicht mit Seismizität verbunden. In anderen Gebieten, beispielsweise im Werra-Kalialz-Revier (D) - mit allerdings deutlich grösseren Salzmächtigkeiten und bergmännischem Abbau - sind durch den Salzabbau verursachte Beben ("Bergschläge") mit einer Magnitude von $M_L > 5$ (M_L : Richterskala) registriert worden (Leydecker, Grünthal, & Ahorner 1998, Knoll 1989). Meist dürfte es zu einer Überbeanspruchung der stehengelassenen Kalialz-Pfeiler und in der Folge grossflächigem Zusammenbruch des Hohlraums gekommen sein (Minkeley 1998). Die unmittelbaren Auslöser der Beben waren dabei zumindest teilweise zusätzliche menschliche Tätigkeiten wie Sprengungen; vermutet wurden auch untertägige Fluidverpressungen (Südthüringer Zeitung 2008). Die heutige Abbaumethode in der Nordschweiz (Salzlaugung) unterscheidet sich allerdings deutlich von jener der genannten Fälle. Das bruchhafte Versagen untertägiger, mit Sole gefüllter Hohlräume ist wenig wahrscheinlich und dürfte weit geringere Auswirkungen haben als die genannten "Bergschläge".

Eine Nutzung der Salzlager in >400 m Tiefe mittels Salzlaugung wird von der Nagra in [2] als kaum wirtschaftlich erachtet. Dabei sollte die Mächtigkeit des Salzlagers mindestens 30 m betragen (Schweizer Salinen, 2014). In Lupsingen BL wurde allerdings 2011/2012 eine Probebohrung von >600 m Länge auf der Suche nach Salzlager im Wissen abgeteuft, dass eine allfällige Salzförderung unter heutigen Bedingungen unwirtschaftlich ist (Basler Zeitung 2012). Dies stützt zwar die entsprechende

Einschätzung der Nagra, zeigt aber auch, dass die Nutzung tiefer Salzlager in der Zukunft als durchaus denkbar erachtet wird. Bohrungen im Bereich der Standortgebiete Jura Ost, Nördlich Lägern und Zürich Nordost lassen jedoch den Schluss zu, dass in den entsprechenden grösseren Tiefen keine oder nur sehr geringmächtige Salzlager vorhanden sind (Fig. 2.2-1 in [2]).

Im definitiven Standortgebiet (Rahmenbewilligungsverfahren) empfehlen die Experten, die Erschliessung und Nutzung von Salzlagerstätten unter dem Lagerperimeter (inkl. eines lateralen Schutzbereiches) auszuschliessen.

5.2.3 Steine und Erden

Darstellung der Nagra

Unter dem Begriff 'Steine und Erden' werden verschiedene nicht-metallische, mineralische Rohstoffe zusammengefasst.

Bei der grossflächigen oberflächlichen Nutzung von Steinen wird ein negativer Einfluss auf ein Tiefenlager angenommen, falls die abgebaute Gesteinsschicht sehr mächtig ist (>100 m). Zum einen könnte dadurch die Mindestanforderung an die Gesteinsüberdeckung unterschritten werden, zum anderen könnte eine Dekompaktion des Gebirges eine Erhöhung der hydraulischen Durchlässigkeit im Bereich des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs aufgrund der Zunahme von Klüftöffnungen bewirken. Die Nagra geht davon aus, dass eine grossflächige Nutzung von Gesteinen nur im oberflächlichen Abbau erfolgt [2].

Kiesvorkommen dürfen nur oberhalb des Grundwasserspiegels abgebaut werden, daher handelt es sich höchstens um wenige Dekameter, was für ein Tiefenlager nicht relevant ist. Zudem sind die langfristigen Erosionsprozesse von grösserer Bedeutung als lokale Kiesnutzungen.

Die *Standortgebiete Südranden* und *Jura Ost* haben die geringste Lagertiefe, ein potentieller Abbau mineralischer Rohstoffe darf hier nicht zu einer Unterschreitung der minimalen Gesteinsüberdeckung führen. Die Mächtigkeit der potenziell als Rohstoffvorkommen zu nutzenden Effinger Schichten im Standortgebiet Südranden wird mit maximal wenigen Dekametern als zu gering für negative Auswirkungen auf das Tiefenlager erachtet. Im Standortgebiet Jura Ost wurde das Projekt Kalk-/Mergelabbau Homberg mit möglicherweise kritischen Dimensionen aus verschiedenen Gründen von der Industrie nicht weiter verfolgt. Inzwischen wurden entsprechende Schutzzonen für geologische Tiefenlager ausgeschieden ([2], Abschnitt 2.3.3). Andere Abbauvorhaben im Bereich des Standortgebiets Jura Ost bestehen zurzeit nicht.

Im *Standortgebiet Wellenberg* erscheint ein grossflächiger Abbau von Kalken und Mergeln aus wirtschaftlichen Gründen und wegen der Überdeckung durch die Rutschmassen von Altzellen unwahrscheinlich.

Stellungnahme der Experten (Steine und Erden)

Die Darstellung der Vorkommen von nutzbaren Steinen und Erden im Bereich der Standortgebiete sowie der aus der möglichen Nutzung von Steinen und Erden resultierenden Nutzungskonflikte ist vollständig und plausibel.

Zurzeit bestehen keine absehbaren Nutzungskonflikte, da das Projekt Homberg zwischen Effingen und Oberbözing westlich von Schinznach Dorf im September 2014 ersatzlos aus dem kantonalen Richtplan gestrichen wurde (Regierungsrat des Kantons Aargau 2014).

Der Einfluss einer Dekompaktion des Gebirges (s.o.) muss im konkreten Fall beurteilt werden.

Unseres Wissens sind nur 2 Fälle dokumentiert, bei denen der oberflächliche Abbau von Gesteinen in Zusammenhang gebracht werden kann mit seismischen Ereignissen (Klose 2013). In einen Fall mit Magnitude $m_b=4.6$ (m_b : Raumwellenmagnitude) scheint das Ereignis vor allem mit dem Wiederanstieg des vorher abgesenkten Grundwassers zu stehen (Seeber et al. 1998). Im anderen Fall war die Grundwasserspiegeländerung anscheinend nicht ursächlich, das Ereignis war mit $m_b=3.3$ aber auch deutlich schwächer (Pomeroy 1976). Ein ähnliches Ereignis im Umfeld der Standortgebiete dürfte entsprechend sehr unwahrscheinlich sein und zudem im Ausmass höchstens gering.

Die oberflächennahe Nutzung von Sand und Kies in den quartären Ablagerungen oberhalb des Grundwasserspiegels erachten die Experten übereinstimmend mit der Nagra als nicht relevant für das Tiefenlager, sofern eine hydrologische und geotechnische Beeinflussung der Zugangsbauwerke ausgeschlossen werden kann.

5.2.4 Erze

Darstellung der Nagra

Eisenerze wurden lokal im Dogger sowie in eozänen Bolustonvorkommen am Top der verkarsteten Malmkalke ausgebeutet [2]. Ein wirtschaftlicher Abbau ist aus heutiger Sicht unwahrscheinlich. Vererzungen wurden lokal im Grundgebirge des Schwarzwalds genutzt. Im Bereich der Standortgebiete der Nordschweiz liegt das Grundgebirge für eine Exploration resp. wirtschaftliche Nutzung zu tief. Im Standortgebiet Wellenberg sind keine Erzvorkommen bekannt. Die Nagra identifiziert daher keine Nutzungskonflikte bezüglich Erzabbau.

Stellungnahme der Experten (Erze)

Die Erzvorkommen in der Nordschweiz sind vollständig dargestellt. Darauf bezogene mögliche Nutzungskonflikte werden in [2] nicht weiter diskutiert.

Die Vorkommen in den Bolustonen sind offensichtlich zu klein für Auswirkungen auf ein Tiefenlager. Wahrscheinlicher wäre aus Sicht der Experten eine Wiederaufnahme der Eisenerzförderung am Westrand des Standortgebiets Jura Ost (Bergwerk Herznach). Nach grober Schätzung dürften ca. 4/5 des als abbauwürdig eingeschätzten Vorrats an Eisenerzen (ca. 7×10^6 t Erz) in den Eisenoolithen des Doggers noch vorhanden sein (Diebold et al. 2006). Der oberflächennahe Abbau des von Herznach ausserhalb des Standortgebietes Jura Ost gegen Westen, d.h. vom Standortgebiet weg Richtung Wölflinswil mächtiger werdenden Eisenerz-Flözes würde ein Tiefenlager aber nicht direkt tangieren (Richtung Standortgebiet keilt das Herznacher Flöz nach Diebold et al. 2006 aus).

Die Nagra erwähnt die gangförmigen Vererzungen im Schwarzwald, welche lokal abgebaut wurden. Solche Erzvorkommen sind für den kristallinen Untergrund der Nordschweiz in ähnlicher Form zu erwarten ([2], Abschnitt 2.4, S.21). Angesichts der schlechten Kenntnisse und der grossen Tiefenlage allfälliger Erzvorkommen im kristallinen Grundgebirge der Nordschweiz erscheint den Experten aus heutiger Sicht eine Exploration bzw. ein Abbau sehr unwahrscheinlich. Ein entsprechender Nutzungskonflikt ist weitgehend ausgeschlossen.

5.3 Mineral- und Thermalwassernutzungen bzw. -ressourcen

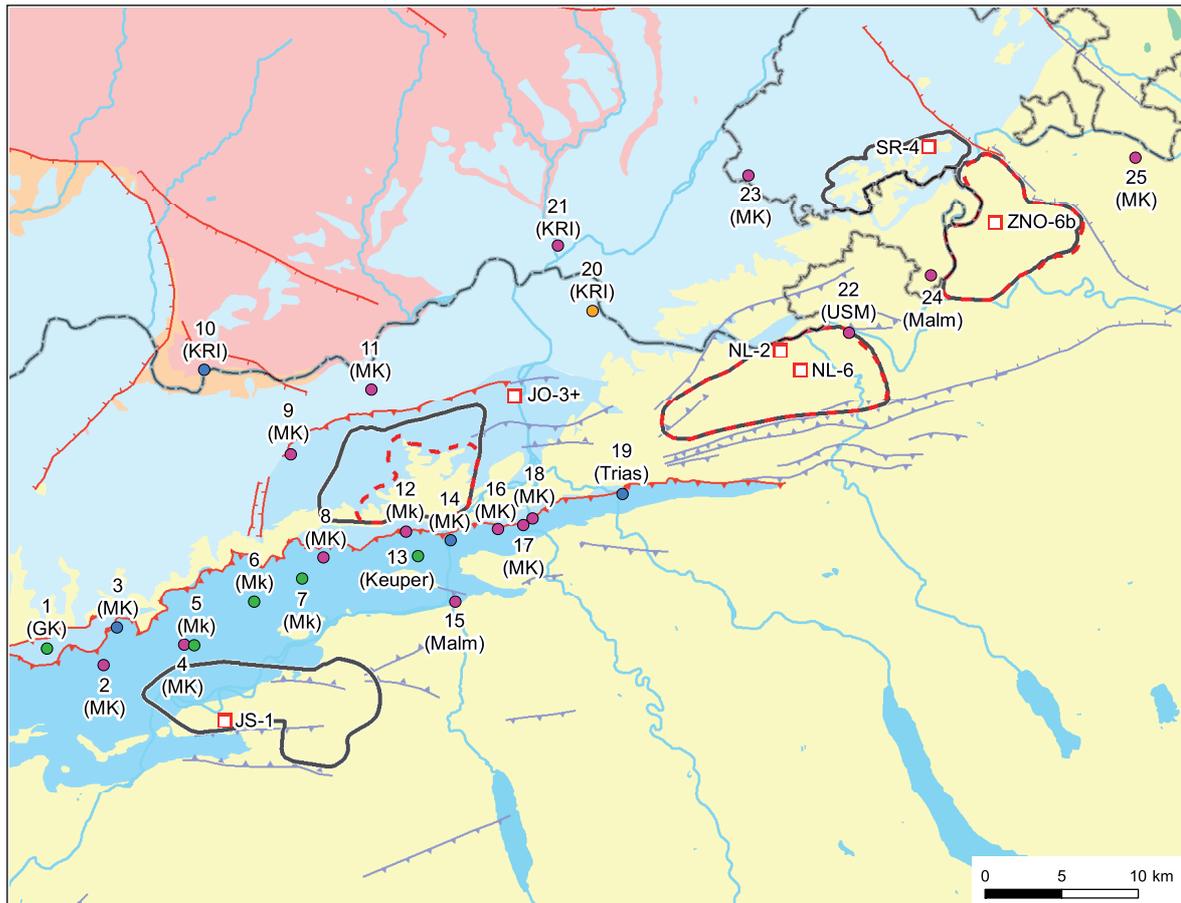
Darstellung der Nagra

Die Nagra verfügt über einen laufend aktualisierten Datensatz zu Mineral- und Thermalwassernutzungen. In diesem finden sich Informationen zu natürlichen Quellen und Bohrungen, welche für balneologische Zwecke, Mineralwasserabfüllung, Geothermie, Trink- und/oder Brauchwasser genutzt werden. Diese Wässer unterscheiden sich hydrochemisch von den Wässern, welche für die allgemeine Trinkwasserversorgung genutzt werden und meist aus oberflächennahen Grundwasservorkommen stammen.

Die Standortgebiete wurden in [2] hinsichtlich ihrer hydrogeologischen und räumlichen Beziehung zu verschiedenen Nutzungen von Mineral- und Thermalwasser charakterisiert. Wichtige Grundlagen sind dabei die Kenntnis der Geologie, der regionalen Fliesswege und der Hydrochemie. Die Nagra beurteilt potentielle Nutzungskonflikte in erster Linie hinsichtlich der Möglichkeit, ob der Aquifer durch Zugangsbauwerke in relevanter Distanz zur Fassung tangiert wird.

Im Umfeld des *Standortgebiets Südranden* existiert in Lottstetten-Nack (D, Nr. 24 in Abb. 2, siehe auch für folgende Ortsangaben) ein Brunnen, aus dem thermales Malm-Kalk-Wasser mit einer Schüttung von 0.3 bis 0.4 l/s (gemäss Messungen in den 1980er Jahren) und einer Temperatur von 22 °C frei ausfliesst. Zu maximalen Förderaten bei Pumpbetrieb finden sich keine Angaben. Das Wasser infiltriert wahrscheinlich im Gebiet mit Malm-Kalk-Aufschlüssen im Norden und Nordwesten, also auch

im Bereich des Standortgebiets Südranden. Ein kleinerer Anteil des Wassers könnte aus der Molasse stammen. Das Wasser weist gemäss Pearson et al. (1991) ein hohes ^{14}C -Modellalter von $>11'000$ Jahren auf; eine qualitative Beeinflussung durch den Zugangstunnel wird von der Nagra als unwahrscheinlich angesehen. Auch eine quantitative Beeinflussung wird als wenig wahrscheinlich erachtet.

**Standortareale**

- HAA / SMA

Geologisches Standortgebiet

- HAA
- SMA

**Strukturen aus
Oberflächengeologie**

- Hauptabschiebungen
- Hauptüberschiebungen

**Strukturen aus
Seismikinterpretation**

- Hauptabschiebungen
- Überschiebungen

**Mineral- und
Thermalwassernutzung**

- Mineral- und Tafelwasser
- Mineralwasser und Terme
- Therme-Heilbad
- Brauchwasser/Nutzung unbest.

Abb. 2: Mineral- und Thermalwassernutzungen in der Nordschweiz ([2], Fig. 3.2-1).

1 Eptingen; 2 Alter Hauensteintunnel; 3 Bad Ramsach; 4 Bad Lostorf; 5 Lostorf Mineralwasser; 6 Erlinsbach – Lorenzenbad; 7 Küttigen – Fischbachquelle; 8 Densbüren; 9 Frick – Salzbohrung; 10 Bad Säkingen; 11 Sulz (Salzkanal) ; 12 Bözbergtunnel; 13 Schinznach–Dorf; 14 Schinznach – Bad; 15 Wildegg (Iodquelle) ; 16 Hausen – Habsburg; 17 Mülligen; 18 Birmenstorf; 19 Baden; 20 Bad Zurzach; 21 Waldshut – Tiengen; 22 Eglisau; 23 Trasadingen; 24 Lottstetten – Nack; 25 Schlattigen. KRI: Kristallin, MK: Muschelkalk, GK: Gipskeuper, USM: Untere Süsswassermolasse.

In Trasadingen ca. 4.5 km westlich des Standortgebietes Südranden (Nr. 23 in Abb. 2) wurde in einer Bohrung mineralisiertes Wasser im Muschelkalk-Aquifer erschlossen. Eine hydraulische Verbindung mit dem Malm-Kalk-Aquifer wird ausgeschlossen, somit auch eine Beeinflussung durch Zugangsbauwerke.

Im *Standortgebiet Zürich Nordost* und seiner Umgebung existieren wie im Standortgebiet Südranden keine bedeutenden Mineral- oder Thermalwassernutzungen. Die erwähnte Bohrung Lottstetten-Nack befindet sich ca. 1 km westlich des Standortgebietes und ca. 5 km westlich des Standortareals. Aufgrund der Notwendigkeit einer effektiven Reduktion der Zuflüsse in die Zugangsbauwerke geht die Nagra davon aus, dass eine Beeinflussung des Thermalwasserbrunnens Lottstetten-Nack wenig wahrscheinlich ist. Weitere Nutzungen bestehen in den aktuell nicht mehr genutzten Mineralquellen von Eglisau (Nr. 22), wo aufgrund der Distanz zum Standortgebiet eine quantitative und qualitative Beeinflussung ausgeschlossen wird. In den 5 km nordöstlich des Standortgebietes gelegenen Bohrungen Schlattingen (Nr. 25, hydrothermale Nutzung durch eine Dublette) wird der Muschelkalk-Aquifer genutzt, welcher von den Zugangsbauwerken nicht durchfahren wird.

In der Umgebung des *Standortgebiets Nördlich Lägern* befinden sich die bedeutenden Thermalkurorte Baden und Bad Zurzach. In Baden ca. 4 km südwestlich des Standortgebiets tritt vorwiegend aus dem Muschelkalk stammendes thermales Wasser natürlich aus. Das Quellwasser strömt wahrscheinlich aus Südosten zu und enthält auch aus dem Grundgebirge stammende Komponenten. In Bad Zurzach 7 km nordwestlich des Standortgebiets wurde mittels Tiefbohrungen (469 m) Thermalwasser im kristallinen Grundgebirge erschlossen; auch im Muschelkalk/Buntsandstein wurde schon Thermalwasser erbohrt. 18 km nordwestlich des Standortgebiets besteht in Waldshut-Tiengen (Nr. 21) eine weitere Thermalwasserbohrung, mit der ebenfalls kristallines Wasser erschlossen wurde. Aufgrund der Tatsache, dass die Zugangsbauwerke keinen der relevanten Aquifere durchhörtern, wird eine Gefährdung der genannten Thermalwassernutzungen durch die Nagra ausgeschlossen. Die aktuell nicht mehr genutzten Mineralquellen von Eglisau liegen am Rand des Standortgebiets.

In der Umgebung des *Standortgebiets Jura-Ost* befinden sich die Thermalquellen Baden (10 km östlich) und die Thermalwasserbohrungen Zurzach (10 km nordöstlich). Die Thermalwasserfassungen im Muschelkalk-Aquifer von Bad Schinznach liegen weniger als 2 km südöstlich dieses Standortgebiets. Es bestehen Gemeinsamkeiten mit den Wässern von Baden und Bad Lostorf. Aufgrund hydrochemischer Indizien (Literatur in [2], Abschnitt 3.3.4) und der generellen regionalen Fließrichtungen ([3], [8]) erscheint gemäss Nagra ein Zustrom aus südlicher Richtung am plausibelsten. Im Rahmen der Untersuchungen für den Bözberg-Autobahntunnel und den geplanten neuen Bözberg-Bahntunnel war der Thermenschutz ein wichtiges Thema. In Bad Säkingen 10 km nordwestlich des Standortgebiets wird Thermalwasser aus dem

Kristallin gefördert. Zudem wird der Muschelkalk-Aquifer in einigen Bohrungen und Quellen in der Umgebung des Standortgebiets genutzt. Die Zugangsbauwerke ausgehend vom Standortareal JO-3+ durchfahren mit Ausnahme des randlichen Bereichs des Hauptrogenstein-Aquifers nur gering durchlässige Einheiten und keine der Aquifere, aus denen die Mineral- und Thermalwässer gefördert werden. Die Jura-Hauptüberschiebung wird nicht gequert, sodass eine Gefährdung der genannten Nutzungen durch die Nagra ausgeschlossen wird.

In der Umgebung des *Standortgebiets Jura-Südfuss* bestehen verschiedene genutzte Mineralwasserquellen, u.a. die Thermalbäder Bad Schinznach und Bad Ramsach sowie das aktuell nicht mehr genutzte Thermalwasser Bad Lostorf. In diesen wird Wasser aus dem Muschelkalk oder aus dem Keuper (Bad Ramsach, Eptingen) genutzt. Da sich die Nutzhorizonte unterhalb des Opalinustons befinden und diese von den Zugangsbauwerken nicht durchfahren werden, wird in [2] eine Beeinflussung durch diese ausgeschlossen.

Im *Standortgebiet Wellenberg* bestehen keine Mineral- oder Thermalwassernutzungen.

Stellungnahme der Experten (Mineral- und Thermalwasserressourcen)

Die Nagra hat eine detaillierte und sorgfältige Erfassung der Quellen und Thermal- resp. Mineralwassernutzungen durchgeführt. Die Experten erachten die von der Nagra in [2] dokumentierten aktuellen Nutzungen als vollständig. Weitere, nicht aufgeführte Nutzungen sind uns nicht bekannt.

Es besteht allenfalls die Möglichkeit, dass verborgene Austritte thermaler Wässer nicht bekannt sind; analog dem bekannten Austritt von Thermalwasser direkt in die Limmat bei Baden oder aus dem Fels in Lockergesteine, wie dies z. B. in Bad Schinznach der Fall ist. Solche heute unbekannt, an sich nutzbaren Thermalwasseraustritte sind zwar denkbar, aber es ist wenig wahrscheinlich, dass diese grosse Bedeutung aufweisen würden. Entsprechend wurden sie bei den Betrachtungen der Nagra nicht berücksichtigt.

Die Betrachtung der Umweltauswirkungen von Zugangsbauwerken und Tiefenlager, insbesondere auf bestehende Mineral- und Thermalwassernutzungen wird Gegenstand der Umweltsverträglichkeitsprüfung im Rahmen der Etappe 3 SGT sein. Deshalb werden solche Nutzungskonflikte in der vorliegenden Expertise nicht behandelt. Aufgrund der bekannten Verteilung der Nutzungen von Tiefenwässern erachten die Experten die Wahrscheinlichkeit als klein, dass zukünftig in Aquiferen über dem einschliesswirksamen Gebirgsbereich innerhalb der Standortgebiete wesentliche Explorationstätigkeiten erfolgen, die zu Nutzungskonflikten führen.

Die charakteristische Hydrochemie zeigt eine deutliche Trennung von Muschelkalk- resp. Malm-Kalk-Wässern im regionalen Massstab [4]. Dieser Befund basiert jedoch auf der heutigen regionalen Verteilung der hydraulischen Potenziale. Falls diese in der Zukunft im Malm-Kalk z.B. durch grosse Zuflüsse in Zugangsbauwerke stark verändert würden, wäre es denkbar, dass mittelfristig auch andere Festgesteins-Aquifere wie der Obere Muschelkalk (und evtl. auch Hauptrogenstein oder Oberer Mittel-Keuper [4]) von dieser Änderung betroffen sein könnten, falls diese Schichten nicht oder nur unvollständig durch Aquitarde vom Malm-Kalk getrennt werden. Mögliche Folgen davon wären potenziell nachteilige Änderungen der Grundwasserflussrichtungen auch in diesen tieferen Aquiferen, der Hydrochemie und letztlich auch der Ergiebigkeit der Nutzungen.

Rechnerische Nachweise der Auswirkungen grosser Zuflüsse in Zugangsbauwerken auf die Mineral- und Thermalwassernutzungen wurden bisher nicht vorgelegt. Die Experten gehen davon aus, dass dies im Rahmen der umweltbezogenen Beurteilung des Projekts stufengerecht in der Etappe 3 erfolgen wird.

Während die Anmerkungen der Nagra hinsichtlich Nutzungskonflikten (Mineral- und Thermalwassernutzungen) primär auf die Beeinflussung bestehender Nutzungen durch das geologische Tiefenlager (inkl. der Zugangsbauwerke) ausgerichtet sind, ist in Etappe 2 SGT im Wesentlichen die Nutzungsänderung hinsichtlich ihrer Auswirkungen auf das Tiefenlager zu untersuchen. Eine allfällige zukünftige Erschliessung und Nutzung neuer Wasservorkommen im Malm oder anderer über dem einschlusswirksamen Gebirgsbereich liegenden Aquifere dürfte nicht zu einem Konflikt führen, weil die Barrierewirkung nicht beeinträchtigt wird.

Kritischer sind Erschliessung und Nutzung von Aquiferen unterhalb des Lagerperimeters zu beurteilen: Diverse Indizien (Expertenbericht SSKA [10]) weisen darauf hin, dass der Muschelkalk in der Nordschweiz regional hohe Durchlässigkeiten aufweist. Insbesondere in Bereichen über den Permokarbondrog-Rändern ist die Möglichkeit einer hypogenen Verkarstung nicht auszuschliessen. Die hydrochemischen Charakteristika (u.a. CO_2 , H_2S) der bekannten Thermalwasservorkommen von Baden und Schinznach passen gut mit einer potentiellen hypogenen Verkarstung zusammen ([10]). Hypogene Hohlräume weisen im Gegensatz zu epigenen Karströhren (z.B. im Malm-Aquifer) oft sehr unterschiedliche Grössen auf (Klimchouk 2009).

Es muss bei einer (zukünftigen) Nutzung von tiefen Muschelkalkwässern davon ausgegangen werden, dass die Verweilzeiten im Muschelkalk relativ kurz sind. Wie die Verstärkung der Verkarstung über die Zeit verläuft, ist noch wenig untersucht. Jedenfalls ist hinsichtlich Nutzungskonflikten auch die Frage zu klären, ob durch verstärkte Exploration und Nutzung des Muschelkalk-Aquifers die Verkarstung im Aquifer unter dem einschlusswirksamen Gebirgsbereich theoretisch intensiviert wird und durch kollabierende, erdfallähnlich nach oben propagierende Hohlräume (französisch: fontis) dieser Gebirgsbereich tangiert werden könnte. Diesem Konflikt kann vermutlich

mit einem entsprechenden Sicherheitsabstand der Nutzung vom Lagerperimeter begegnet werden. Die erforderliche Grösse dieses Schutzbereiches ist in der Etappe 3 herzuleiten.

Im definitiven Standortgebiet (Rahmenbewilligungsverfahren) empfehlen die Experten die Erschliessung und Nutzung von Mineral- und Thermalwasservorkommen unter dem Lagerperimeter (inkl. eines lateralen Schutzbereiches) auszuschliessen.

5.4 Geothermie

Darstellung der Nagra

Bei geothermischen Nutzungen könnte es zu Nutzungskonflikten kommen, wenn vorhandene Ressourcen wegen eines Tiefenlagers nicht genutzt werden könnten oder die Integrität der geologischen Barrieren durch menschliche Aktivitäten (Exploration, Erschliessung, Nutzung) beeinträchtigt würde. In [2] sind die Schritte zur Abschätzung des Potenzials für geothermische Nutzungen in der Nordschweiz zusammenfassend dargestellt. Wesentliche Grundlage war dabei ein numerisches konduktives Temperaturmodell [5]. Es wurden Temperaturfelder für die verschiedenen potenziellen Nutzhorizonte errechnet und Produktivitätskarten erstellt, welche die mittlere geothermische Leistung bei einer Dubletten-Nutzung der einzelnen nutzbaren Aquifere zeigt. Berücksichtigt wurde dabei auch die Zunahme der Bohrkosten mit der Tiefe, indem für die einzelnen Aquifere ein Quotient aus geschätzter geothermischer Leistung und der minimal erforderlichen Bohrtiefe gebildet wird. Regionale Störzonen und jene an den Rändern der Permokarbontrögen sowie das Top des Kristallins wurden als relativ durchlässig angenommen.

Bisher bestehen in der Nordschweiz keine **hydrothermalen Anlagen** zur Stromerzeugung. Sedimentäre Aquifere des Mesozoikums kommen aufgrund ihrer geringen Tiefenlage und Temperatur für eine solche Nutzung nicht infrage. Ein theoretisches Potenzial wird in den Randstörungen der Permokarbontröge vermutet. Im kristallinen Grundgebirge sind bisher keine geeigneten Bereiche für hydrothermale Nutzungen bekannt, ihre Existenz ist unwahrscheinlich. Neben der Stromerzeugung kommt auch die Wärmeproduktion infrage, dies insbesondere im unteren Aaretal im Bereich einer regionalen Wärmeanomalie (Schärli & Rybach, 2002), da ein Fernwärmenetz vorhanden ist.

Es bestehen keine Nutzungskonflikte bezüglich bestehender resp. aktuell geplanter hydrothermalen Anlagen. Deutliche positive Wärmeanomalien als bevorzugte Standorte zukünftiger hydrothermalen Anlagen sind zwischen den *Standortgebieten Nördlich Lägern* und *Jura Ost* nachgewiesen. Beim *Standortgebiet Jura Südfuss* ist unklar, ob die in der Bohrung Oftringen wenige km südöstlich gemessene positive Wärmeanomalie auch im Standortgebiet selbst vorhanden ist.

Die Lagerperimeter liegen nicht direkt über Trograndstörungen des Permokarbons (bekannte Randstörungen und postpaläozoisch reaktivierte Randstörungen wurden als 'zu meidende tektonische Zonen' eingestuft), die Standortgebiete Zürich Nordost, Nördlich Lägern und Jura Ost werden aber durch solche Zonen begrenzt. Falls Trograndstörungen des Permokarbons zukünftig hydrothermal genutzt werden sollten, müsste gemäss Nagra ein Sicherheitsabstand eingehalten werden und weitere geeignete Massnahmen ergriffen werden, damit eine Beeinträchtigung des Tiefenlagers durch induzierte Bewegungen oder Seismizität ausgeschlossen werden kann.

Hydrothermale Nutzungen im *Standortgebiet Wellenberg* sind gemäss einer Potenzialstudie (Dr. Roland Wyss GmbH 2014) wenig wahrscheinlich.

Bei **petrothermalen Systemen** zur Stromerzeugung wird die notwendige Durchlässigkeit mittels Fracking („hydraulic fracturing“) in Kristallingesteinen des Grundgebirges erzeugt. Es sind zurzeit keine Projekte in der Umgebung der Standortgebiete geplant und es bestehen somit keine Nutzungskonflikte. Bezüglich der möglichen Standorte zukünftiger Projekte bestehen vermutlich genügend Ausweichmöglichkeiten, da die petrothermale Geothermie weniger an bestimmte und nur lokal vorhandene Elemente im Untergrund gebunden ist als die hydrothermale.

Stellungnahme der Experten (Geothermie)

Die Darstellung der (hydro-) geologischen Grundlagen und der potenziellen Nutzungskonflikte in [2] erscheint den Experten vollständig. Die vorgestellten numerischen Temperatur-Modelle (Ollinger & Baujard 2012, Ollinger & Badoux 2014) wurden dabei nicht im Detail überprüft.

In den Standortgebieten bestehen keine Nutzungskonflikte zwischen einem Tiefenlager und bestehenden oder konkret geplanten hydrothermalen Anlagen. Gebiete mit nachgewiesenen positiven Wärmeflussanomalien sind sicher bevorzugte Standorte für zukünftige hydrothermale Anlagen, umgekehrt sind die Gebiete ausserhalb davon keine Ausschlussgebiete, da Kriterien wie z.B. günstige hydraulische Eigenschaften des Untergrundes, die Nähe zu einem Fernwärmenetz oder sonstigen Abnehmern die Nachteile einer grösseren Bohrtiefe wieder ausgleichen könnten. Nach heutiger Einschätzung (Hirschberg et al. 2015) ist die geothermische Stromerzeugung das Hauptziel; mit hydrothermalen Anlagen könnte dieses in der Nordschweiz aufgrund der notwendigen Temperaturen nur durch Nutzung von permeablen Strukturen in den Permokarbontrögen (Randstörungen) oder im Kristallin erreicht werden.

Das Potenzial für hydrothermale Nutzung besteht im Permokarbon bisher nur spekulativ und ist bisher nirgends nachgewiesen. Entsprechend dem Konzept des Sachplans werden die Lagerperimeter ausserhalb von bekannten oder vermuteten Trograndstörungen und konzeptionell zu meidenden tektonischen Zonen platziert. Dies ist

als Vorsichtsmassnahme geeignet. Gemäss Angaben der Nagra ([2], Abschnitt 4.4.1, S. 38) ist bei den *Standortgebieten Südranden* und *Jura-Südfuss* die Kenntnis der Geologie des Grundgebirges mit grossen Ungewissheiten behaftet. Ein gezieltes Meiden von Trograndstörungen oder anderen tektonischen Zonen erscheint bei derzeitigem Kenntnisstand daher nicht möglich.

Eine Gefährdung der Integrität des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs durch induzierte Seismizität und unkontrollierte Rissausbreitung aufgrund von geothermischen Nutzungen (hydro- und petrothermal) des Untergrundes ist denkbar [9]. Die zu erwartenden Magnituden und die Reichweite neuer oder reaktivierter permeabler Risse im Bereich von Entnahme- resp. Reinjektionsbohrungen geothermaler Anlagen sind bisher noch nicht abgeklärt worden.

Gemäss Kernenergiegesetz ist ein Schutzbereich für geologische Tiefenlager auszuweisen; dieser kann für die Rahmenbewilligung auch vorläufig sein. Für dessen Festlegung müssen Kriterien definiert werden. Im Zuge der weiteren Arbeiten (Etappe 3 SGT) müssen daher die Auswirkungen möglicher seismischer Ereignisse inkl. ihrer Reichweiten abgeschätzt werden.

Insgesamt dürften in der Nordschweiz aber ausreichende Ausweichmöglichkeiten für eine gewisse Anzahl solcher hydrothermalen Nutzungen zur Stromerzeugung bestehen. Ob beispielsweise die Gebiete zwischen den *Standortgebieten Jura Ost* und *Nördlich Lägern* mit vergleichsweise günstiger normierter geothermischer Produktivität genutzt werden können, hängt vom festzulegenden Sicherheitsabstand ab.

Bezüglich geplanter petrothermalen Nutzungen sind keine Nutzungskonflikte innerhalb der Standortgebiete bekannt. Zurzeit befinden sich schweizweit zwei Petrothermal-Projekte in Etzwilen ca. 10 km östlich des Standortgebietes Zürich Nordost (Geo-Energie Suisse, 2015a), resp. in Haute-Sorne ca. 50 km westlich Jura-Südfuss (Geo-Energie Suisse, 2015b), in der Entwicklung. Diese Projekte weisen Pilotcharakter auf, zu den tatsächlichen (seismischen) Auswirkungen existieren bisher nur Abschätzungen. Es ist zu erwarten, dass seismische Aktivität vor allem bei der Erstellung sowie in den ersten Betriebsjahren der petrothermalen Anlagen auftritt (Kaiser-Effekt; Baisch et al. 2009, Albaric et al. 2014). Entsprechende Erfahrungen mit der petrothermalen Geothermie (geplante Erschliessung per "Multi-Riss-Konzept", Geo-Energie Suisse, 2015a & b) in der Schweiz können wahrscheinlich innerhalb von Etappe 3 SGT einfließen.

Im definitiven Standortgebiet (Rahmenbewilligungsverfahren) empfehlen die Experten, die hydrothermale und petrothermale Nutzung unter dem Lagerperimeter (inklusive eines standortspezifisch zu definierenden lateralen Schutzbereichs) auszuschliessen.

5.5 Weitere energiebezogene Nutzungen des Untergrundes aus Sicht der Nagra

5.5.1 Erdgasspeicherung

Darstellung der Nagra

Erdgasspeicher im Untergrund dienen dem tages- oder jahreszeitlichen Ausgleich von Verbrauchsspitzen. In der Nordschweiz kämen nur Porenspeicher infrage (Leu 2003). Zwar konnten Sandsteine in geeigneter Tiefe nachgewiesen werden, Fragen zur Ausdehnung resp. dichter Begrenzung dieser Einheiten bleiben offen [2]. Zurzeit ist kein geeigneter potenzieller Erdgasspeicher in der Umgebung der Standortgebiete bekannt, somit werden keine Nutzungskonflikte gesehen. Bisher konnten in der Nordschweiz keine konventionellen Erdgas- und Erdöllagerstätten nachgewiesen werden; dies wird von der Nagra als Indiz angesehen, dass der Untergrund wahrscheinlich kaum Speicherpotenzial für Erdgas aufweist [2].

Stellungnahme der Experten (Erdgasspeicherung)

Die energiebezogene Nutzung des Untergrundes zur Erdgasspeicherung ist stufengerecht ausreichend detailliert behandelt und die Nutzungskonflikte sind nachvollziehbar dargestellt. Die Experten teilen die Einschätzung der Nagra, dass zurzeit und in Zukunft keine relevanten Nutzungskonflikte bezüglich Erdgasspeicherung durch ein Tiefenlager bestehen resp. entstehen werden.

5.5.2 CO₂-Speicherung

Darstellung der Nagra

Bei der CO₂-Sequestrierung (CO₂-Abscheidung und -Speicherung: CCS-Verfahren) wird verflüssigtes CO₂ vorzugsweise in Aquifere mit stagnierenden, meist salinen Wässern unterhalb einer Tiefe von 800 m verpresst. Nach Chevalier et al. (2010) ist das CO₂-Speicherpotenzial in einem Gebiet zwischen Fribourg, Biel, Olten, Baden und Luzern am grössten, dabei ist der Muschelkalk für das Speicherpotenzial massgeblich. Das Alpengebiet sowie der Jura ca. 5 km nördlich einer Linie von Olten-Baden-Niederwenigen sowie der grösste, nördliche Teil des Kantons Schaffhausen sind demnach nicht geeignet.

Nutzungskonflikte können durch Eindringen in ein Tiefenlager mit Bohrungen entstehen sowie durch gekoppelte hydromechanische Einflüsse auf das Wirtgestein im Zusammenhang mit den erhöhten Drücken in den zur Verpressung genutzten Aquiferen. Eine direkte Beeinflussung des Tiefenlagers durch injiziertes CO₂ wird von Diamond et al. (2010) ausgeschlossen. Der Nutzungskonflikt wird als vernachlässigbar angesehen.

Stellungnahme der Experten (CO₂-Speicherung)

Die Nutzung des Untergrundes zur CO₂-Speicherung ist stufengerecht ausreichend detailliert behandelt und die Nutzungskonflikte sind nachvollziehbar dargestellt. Die Experten teilen die Einschätzung der Nagra, dass zurzeit und in Zukunft keine relevanten Nutzungskonflikte bezüglich CO₂-Speicherung durch ein Tiefenlager bestehen resp. entstehen werden. Es stehen im Zweifelsfall ausreichende, besser geeignete Gebiete zur Verfügung.

5.6 Von der Nagra nicht berücksichtigte relevante Nutzungen

Die in [2] aufgeführte Liste der Nutzungen erscheint den Experten nach heutiger Einschätzung vollständig. Theoretisch denkbar wäre allenfalls noch die Errichtung eines Pumpspeicherkraftwerkes ähnlich wie in Atdorf im Hotzenwald geplant (Südschwarzwald, D; Schluchseewerk AG, 2015). Es ist dabei nicht auszuschliessen, dass damit vor allem in der anfänglichen Betriebszeit eine gewisse Seismizität verbunden sein könnte. Die topografischen Voraussetzungen für ein solches Projekt sind in der Nordschweiz nicht besonders günstig; dazu wären in der Schweiz viele Regionen wesentlich besser geeignet. Entsprechend ist uns über solche Pläne in den Standortgebieten nichts bekannt. Diese potenzielle Nutzung wird als sehr unwahrscheinlich angesehen und nicht weiter betrachtet.

Alle Darstellungen der geologischen Grundlagen erfolgen durch die Nagra grenzüberschreitend, d.h. auch Nutzungen im grenznahen Südbaden (D) wurden in die Analyse mit einbezogen. Bei weiteren Überlegungen zu zukünftigen Nutzungen (vor allem bei der Geothermie in Bezug auf die Standortgebiete Nördlich Lägern, Zürich Nordost und Südranden) müssten auch Auswirkungen allfälliger Projekte in Südbaden untersucht werden.

6. Beantwortung der Leitfragen

6.1 Leitfrage 1

Sind die im NTB 14-02, Dossier VII zusammengefassten Nutzungskonflikte umfassend zusammengestellt?

Die im geprüften Dossier VII aufgeführten Nutzungskonflikte sind von der Nagra umfassend dargestellt und behandelt worden.

Wir beurteilen das Dossier als vollständig, empfehlen aber in Etappe 3 SGT folgende Punkte vertieft zu betrachten:

- Mögliche Subsidenzen und induzierte Seismizität bei Nutzung fossiler Energien (Gasentnahmen und Fluidverpressungen) und bei Salzauslaugung.
- Abschätzungen der möglichen Auswirkungen geothermaler Nutzungen hinsichtlich induzierter und getriggelter Seismizität sowie unkontrollierter Rissausbreitung.
- Mögliche Änderungen von Fliesssystemen im Muschelkalk unter dem Lagerperimeter als Folge von neuen Nutzungen und mögliche Auswirkungen auf hypogene Verkarstung.

6.2 Leitfrage 2

Sind die potenziellen Nutzungskonflikte ausreichend konservativ und genügend standortspezifisch beurteilt?

Die Nagra hat die potenziellen Nutzungskonflikte ausreichend konservativ und genügend standortspezifisch beurteilt. In Gebieten, wo die Kenntnisse über die im tiefen Untergrund vorhandenen Ressourcen und ihre Abbauwürdigkeit nur schlecht bekannt und einschätzbar sind, wurden aus heutiger Sicht eher konservative Annahmen gemacht.

Die grössten verbleibenden Unsicherheiten bestehen unseres Erachtens in der Quantifizierung der Auswirkungen einer deutlichen Grundwasserspiegelabsenkung im Malm-Kalk durch unkontrollierbare Zuflüsse in ein Zugangsbauwerk. In [2] und [6] finden sich diesbezüglich keine rechnerischen Nachweise.

Ein wesentlicher, jedoch standortunabhängiger Punkt bei der Erschliessung von Kohlenwasserstofflagerstätten und hydrothermalen bzw. petrothermalen Geothermie sind die Auswirkungen des „hydraulic fracturing“ auf die Integrität der Barriereigenschaften. Wir empfehlen deshalb, diesen Aspekt in Etappe 3 SGT vertieft zu behandeln.

7. Weitere Bemerkungen

Einige Bewertungen potenzieller Nutzungen nehmen Bezug auf heutige wirtschaftliche Verhältnisse. Mitbetrachtet werden sollten nach unserer Einschätzung aber auch jene unter Krisenbedingungen. Dabei erscheinen (nach heutigen Massstäben) unkontrollierte Nutzungen von Erzen am wahrscheinlichsten; die Nutzung tiefliegender und nur mit hohem technologischem Aufwand erschliessbarer Kohlenwasserstoffe im Permokarbon dürfte in einer solchen Situation nicht infrage kommen. Angesichts der Tatsache, dass auch die grösste der vorhandenen Erz-Lagerstätten (Herznach; Diebold et al. 2006) relativ klein und oberflächennah ist, dürfte deren Nutzung aber kaum zu einer Gefährdung eines nahe gelegenen Tiefenlagers führen.

In NTB 14-02-VII findet sich auf Seite 14 folgende Aussage: "Für die Beurteilung der Nutzungskonflikte ist jeweils nur ein kleines Teilgebiet – der sogenannte Lagerperimeter – und nicht das ganze Standortgebiet massgebend; dies kann vor allem bei sehr grossen Standortgebieten ausschlaggebend sein". Nach Ansicht der Experten ist diese Beschränkung nicht bei allen Nutzungen angebracht. Je nach Eingriff bei der Erschliessung und Nutzung des Rohstoffs ist ein Einwirkungsbereich, der beispielsweise zu Spannungsumlagerungen (induzierte Seismizität) oder Durchlässigkeitsveränderungen führen kann, unterschiedlich. Es sind deshalb emissionsabhängige Schutzbereiche auszuscheiden. Im Übrigen resultiert in Bezug auf die Mineral- und Thermalwassernutzungen die Hauptgefährdung für diese bestehenden Nutzungen aus den Zugangsbauwerken, deren kritische Bereiche aber oft Kilometer vom Lagerperimeter entfernt liegen.

Mit dem Ausschluss einer zukünftigen Rohstoffnutzung im definitiven Standortgebiet würde der Volkswirtschaft zwar ein potenzieller Verlust entstehen. Aus heutiger Sicht hält sich dieser aber in allen Gebieten in engen Grenzen, da nutzbare Kohlenwasserstoffe nicht nachgewiesen oder kaum vorhanden sind und bei allen anderen potenziellen Nutzungen ausreichende Ausweichmöglichkeiten bestehen.

Das generelle Problem, dass die Barrierenintegrität nicht durch versehentliches Anbohren tangiert werden darf, wird in der vorliegenden Expertise nicht behandelt. Die Frage einer dauerhaften Markierung des Tiefenlagers muss übergeordnet geregelt werden.

Expertenbericht zuhanden des ENSI

bearbeitet von
Volker Lützenkirchen
Federico Matousek
Beat Rick

8600-35

LV/MF/Ri/UJ

Zusätzlich verwendete Literatur

- Albaric J., Oye V., Langet N., Hasting M., Lecomte I., Iranpour K., et al. (2014): Monitoring of induced seismicity during the first geothermal reservoir stimulation at Paralana, Australia. *Geothermics*, 52, S. 120-131.
- Baisch S., Vörös R., Weidler R., & Wyborn D. (2009): Investigation of Fault Mechanisms during Geothermal Reservoir Stimulation Experiments in the Cooper Basin, Australia. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 99(1), S. 148-158.
- Basler Zeitung (2012): Auf der Suche nach dem weissen Gold: Rheinsalinen bohren nach Salz - wollen es aber nicht abbauen. 04.07.2012, abgerufen am 17.08.2015 unter: https://www.genios.de/document?id=BAZ__2012070416328720784
- Bundesamt für Energie (2008): Sachplan geologisches Tiefenlager, Konzeptteil.
- Chevalier G., Diamond L.W., Leu W. (2010): Potential for deep geological sequestration of CO₂ in Switzerland: a first appraisal. *Swiss J Geosci* 103:427–455
- Diamond L.W., Leu W., Chevalier G. (2010): Studie zur Abschätzung des Potenzials für CO₂-Sequestrierung in der Schweiz. Bundesamt für Energie BFE, Institut für Geologie, Universität Bern.
- Diebold P., Bitterli-Brunner P. & Naef H. (2006): Blatt 1069/1049 Frick - Laufenburg. - Geol. Atlas Schweiz 1:25'000, Erläuterungen.
- Dr. Roland Wyss GmbH (2014): Erdgas und Tiefengeothermie für die Kantone Nid- und Obwalden. Landwirtschafts- und Umweltdirektion des Kantons Nidwalden, Stans.
- Geo-Energie Suisse (2015a): Geothermieprojekt Etwilen (TG). Abgerufen am 21.08.2015 unter: <http://www.geo-energie.ch/de/projekte/etzwilen.php>
- Geo-Energie Suisse (2015b): Tiefengeothermie-Pilotprojekt in Haute-Sorne (JU). Abgerufen am 21.08.2015 unter: <http://www.geo-energie.ch/de/projekte/hautesorne.php>
- Hirschberg S., Wiemer S. und Burgherr P. (2015): Energy from the Earth. Deep Geothermal as a Resource for the Future? TA-SWISS Study, vdf Hochschulverlag AG, 524 Seiten.
- Klimchouk A. (2009): Morphogenesis of hypogenic caves. *Geomorphology*, 106(1-2), S. 100-117.
- Klose C. D. (2013). Mechanical and statistical evidence of the causality of human-made mass shifts on the Earth's upper crust and the occurrence of earthquakes. *Journal of Seismology*, 17(1), S. 109-135.
- Knoll P. (1989): The Fluid-induced Tectonic Rockburst of March 13, 1989. In: Potash Mining Area 'WERRA' in GDR (first results). Presented at the ISRM International Symposium, International Society for Rock Mechanics.
- Leu W. (2003): Erdgasspeicher Thurgauer Seerücken - Geologie und Nutzung der Erkundungsbohrungen. *Mitt. Thurg. Naturf. Ges.*, 59, S. 149-158.

- Leydecker G., Grünthal G. & Ahorner L. (1998): Der Gebirgsschlag vom 13. März 1989 bei Völkershäusern in Thüringen im Kalibergbaugebiet des Werratal. Geologisches Jahrbuch der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Reihe E, Band 55, S. 5-24, Hannover.
- Minkeley W. (1998): Zum Herdmechanismus von grossen seismischen Ereignissen im Kalibergbau. Geologisches Jahrbuch der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Reihe E, Band 55, S. 69-84, Hannover.
- Ollinger D. & Baujard C. (2012): Prognose der Untergrundtemperaturen für das Versorgungsgebiet der AXPO AG. Unpubl. Axpo Interner Bericht.
- Ollinger D. & Badoux V. (2014): Temperaturkarten für definierte Horizonte im Untergrund der Nordostschweiz. Nagra Arbeitsbericht NAB 14-18.
- Pearson F. J., Balderer W., Loosli H. H., Lehmann B. E., Matter A., Peters T., et al. (1991). Applied Isotope Hydrogeology: A Case Study in Northern Switzerland. Elsevier.
- Pomeroy P. W., Simpson D. W. & Sbar M. L. (1976). Earthquakes triggered by surface quarrying-the wappingers falls, New York sequence of June, 1974. Bulletin of the Seismological Society of America, 66(3).
- Regierungsrat des Kantons Aargau (2014): Hard, Grund, Homberg und Bäumer ersatzlos gestrichen: Regierungsrat streicht Untersuchungsgebiete für den Materialabbau aus dem Richtplan. Medienmitteilung der Staatskanzlei am 26.09.2014, https://www.ag.ch/de/weiteres/aktuelles/medienportal/medienmitteilung/medienmitteilungen/mediendetails_38008.jsp; Abruf am 18.08.2015.
- Schärli U., & Rybach L. (2002): Erstellung einer aktuellen Karte der Temperaturgradienten und des Wärmeflusses der Nordschweiz. Nagra Interner Bericht.
- Schluchseewerk AG (2015): Das Projekt Atdorf. <http://www.schluchseewerk.de/index.php/projekt-atdorf>, abgerufen am 25.08.2015.
- Schweizer Salinen (2014): Salzgewinnung. <http://www.salz.ch/de/salzwissen/salzgewinnung>; Abruf am 17.08.2015.
- Seeber L., Armbruster J. G., Kim W.-Y., Barstow N. & Scharnberger C. (1998): The 1994 Cacoosing Valley earthquakes near Reading, Pennsylvania: A shallow rupture triggered by quarry unloading. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 103(B10).
- Suckale J. (2009): Chapter 2 - Induced Seismicity in Hydrocarbon Fields. In: Renata Dmowska (ed.) Advances in Geophysics. Elsevier, pp 55–106.
- Südthüringer Zeitung (2008): Gebirgsschlag Völkershäusern. Das Beben wird zum Politikum, 14.03.2008, <http://web.archive.org/web/20090614054624/http://www.stz-online.de/nachrichten/thueringen/seite3thueringenstz/art2448,770679>.

ENSI 33/454

ENSI, CH-5200 Brugg, Industriestrasse 19, Telefon +41 56 460 84 00, E-Mail Info@ensi.ch, www.ensi.ch