

Arbeitsgruppe Sicherheit Kantone (AG SiKa)
Kantonale Expertengruppe Sicherheit (KES)

Sachplan Geologische Tiefenlager (SGT) Etappe 2

**Fachbericht vom 11. Januar 2016
zum 2x2-Vorschlag der Nagra**

Zürich, Januar 2016*

Arbeitsgruppe Sicherheit Kantone (AG SiKa)

Dr. Thomas Flüeler (Vorsitz ab 1.1.2016, Sekretariat)	Kanton Zürich
Dr. Kurt Nyffenegger (Vorsitz bis 31.12.2015)	Kanton Zürich
Regula Rometsch (Sekretariat ab 1.12.2015)	Kanton Zürich
Dr. Valentin Burki	Kanton Solothurn
Oliver Genoni	Kanton Aargau
Dr. Joachim Heierli	Kanton Schaffhausen
Fidel Hendry	Kanton Nidwalden
Erich Müller	Kanton Thurgau
Dr. Alain Schmutz	Kanton Obwalden

Kantonale Expertengruppe Sicherheit (KES)

Dr. Bruno Baltés
Dr. Paul Felber
Prof. Dr. Alan G. Green
Dr. Hans Rudolf Keusen
Prof. Dr. Stefan Schmid
Dr. Otthard Wendt

Unter Beizug von Prof. Dr. Kalman Kovári

Bezug: AWEL, Abteilung Energie, Stampfenbachstr. 12, 8090 Zürich
www.radioaktiveabfaelle.zh.ch (>Ausschuss der Kantone)

Zusammenfassung

Gemäss Pflichtenheft des Konzeptteils Sachplan Geologische Tiefenlager beurteilt die Kantonale Expertengruppe Sicherheit (KES) die von den Entsorgungspflichtigen vorgelegten Antragsdokumente wie auch weitere Grundlagen zuhanden des Ausschusses der Kantone (AdK). Die Arbeitsgruppe Sicherheit Kantone (AG SiKa) setzt sich aus Fachpersonen der betroffenen Kantone zusammen und betreut die KES. Im Auftrag des AdK nimmt die AG SiKa/KES eine Beurteilung des Vorschlags der Nationalen Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (Nagra) zur Einengung der Standortgebiete für weitere Untersuchungen in Etappe 3 vor. In Folge der Nachforderungen des Eidgenössischen Nuklearsicherheitsinspektorats (ENSI) vom November 2015 behält sie sich vor, ihren Fachbericht zu überarbeiten, falls eine allfällige neue Daten- und Erkenntnislage nach der Publikation der Nagra-Nachlieferungen und des ENSI-Gutachtens dies erfordern würde.

Nach Vorgaben des Bundes (BFE 2008, ENSI 2013) stützt sich die Nagra bei der Bewertung der Standortgebiete in Etappe 2 auf zwei Säulen: die provisorischen Sicherheitsanalysen (Dosisberechnungen) und die qualitative Bewertung von im Sachplan festgelegten Kriterien. Für die AG SiKa/KES ist die qualitative Bewertung zu einer umfassenden Beurteilung der Standorte ausschlaggebend. Mittels Dosisberechnungen kommt die Nagra zum Schluss, dass alle Standortgebiete sicherheitstechnisch geeignet und gleichwertig seien – dem kann nicht gefolgt werden. Zur Feststellung der Sicherheit eines Standortgebietes bedarf es eines vollständigen Sicherheitsnachweises. Die provisorischen Sicherheitsanalysen erlauben lediglich die Aussage, dass für alle Wirtgesteine und Standortgebiete keine Erkenntnisse gewonnen wurden, die gegen eine generelle sicherheitstechnische Eignung sprechen, das heisst, dass diese aus Sicht der Dosisberechnungen im Auswahlprozess verbleiben können.

Aufgrund umfangreicher eigener Betrachtungen in den Bereichen Seismik/Tektonik, Geomechanik und Erosion ergibt sich für die AG SiKa/KES das folgende Gesamtbild:

- Die Zurückstellung der Wirtgesteine «Brauner Dogger», Effinger Schichten und Helvetische Mergel ist gerechtfertigt. Geologische Überlegungen führen dazu, dass diese Wirtgesteine aus sicherheitstechnischen Gründen nicht weiterverfolgt werden sollten. Es verbleibt einzig der Opalinuston als mögliches geeignetes Wirtgestein für geologische Tiefenlager.
- Die Zurückstellung der drei Standortgebiete für schwach- und mittelradioaktive Abfälle (SMA) allein ist gerechtfertigt: Wellenberg wegen des ungeeigneten Wirtgesteins, Südranden wegen Erosionsgefährdung und Jura-Südfuss, weil Vorbehalte zur Mächtigkeit des Wirtgesteins bestehen und die wichtigen Rahmengesteine zum Teil fehlen. Die drei Standortgebiete weisen derart markante sicherheitstechnische Schwächen auf, dass sie für ein geologisches Tiefenlager nicht weiterverfolgt werden sollten.
- Der Weiterzug der beiden Standortgebiete Zürich Nordost (ZNO) und Jura Ost (JO) in die Etappe 3 ist nachvollziehbar.
- Die Zurückstellung von Nördlich Lägern (NL) ist nicht gerechtfertigt. Das Argument eines zu geringen Platzangebots wegen Einschränkungen durch Tiefenlage und Tektonik hält einer näheren Überprüfung nicht stand.

Damit ist die AG SiKa/KES mit Ausnahme der Zurückstellung von NL mit dem Ergebnis der Nagra einverstanden. Verschiedene Überlegungen führen dazu, NL in Etappe 3 weiterzuverfolgen. Einerseits sind die Gründe für die Zurückstellung nicht stichhaltig: Sie fassen auf unzutreffenden Modellvorstellungen (Geomechanik) und unsicherer Datenlage (2D-Seismik). Gleichzeitig haben andererseits ZNO und JO grössere Schwächen als von der Nagra angenommen – der Erosion sind sie weit stärker ausgesetzt als NL. Da alle drei Standorte aus heutiger Sicht sicherheitstechnisch die Minimalanforderungen erfüllen, gleichzeitig aber unterschiedliche Schwächen und Stärken aufweisen, sind in Etappe 3 zwingend alle drei weiter zu untersuchen. Denn nur so kann gewährleistet werden, schliesslich den vergleichsweise sichersten Standort zur Auswahl zu haben. Dabei sollten gezielt die heute erkannten Ungewissheiten und möglichen sicherheitstechnischen Schwächen der einzelnen Standortgebiete angegangen werden. Ein solches Vorgehen ist fokussiert und effizient.

Inhalt

Zusammenfassung	3
1 Einleitung: Anforderungen.....	5
1.1 Funktion des kantonalen Fachgremiums und Vorgehensweise.....	5
1.2 Anforderungen an die Beurteilung in Etappe 2	5
2 Ausgangslage, Unterlagen der Nagra, Schwerpunktsetzung	6
3 Beurteilung der Bewertung durch die Nagra	7
3.1 Vorgehen	7
3.2 Dosisberechnungen (Beilage 4)	8
3.3 Qualitative Bewertung	8
3.4 Methodenkritik	9
4 Zurückstellung der Wirtgesteine «Brauner Dogger» und Effinger Schichten als «weitere Wirtgesteine».....	9
5 Zurückstellung der SMA-Standortgebiete Wellenberg, Jura-Südfuss und Südranden.....	10
6 SMA/HAA-Standortgebiete Nördlich Lägern, Zürich Nordost und Jura Ost	11
6.1 Bedeutung von Platzbedarf und Platzangebot	11
6.2 Platzbedarf.....	12
6.3 Einschränkung des Platzangebots durch Tektonik, Erosion und Tiefenlage	12
6.3.1 Tektonik (Beilage 1).....	12
6.3.2 Erosion (Beilage 3)	12
6.3.3 Tiefenlage und bautechnische Machbarkeit (Beilage 2)	14
6.4 Folgerungen für die Realisierbarkeit genügend grosser Lagerperimeter	14
7 Schlussfolgerungen	15
8 Empfehlungen für das weitere Vorgehen	16
Referenzen.....	16
A. Beilagen	16
B. Vorgaben.....	17
C. Beurteilte Dokumente	17
D. Weitere beigezogene Unterlagen	17
Beilagen (Zusammenfassungen)	18
1. Alan G. Green: Seismikprofile, Neotektonik und Erdbebengefährdung: Beurteilung der Empfehlungen der Nagra in Bezug auf Standortgebiete für hochradioaktive Abfälle in Etappe 2	19
2. Kalman Kovári: Die bautechnische Machbarkeit der Lagerstollen. Einfluss der Tiefenlage auf die Langzeitsicherheit. Beurteilung der Untersuchungen der Nagra	21
3. Erich Müller & Stefan Schmid: Zu erwartende Erosionsprozesse in den drei möglichen Standortgebieten für hochradioaktive Abfälle (Jura Ost, Nördlich Lägern und Zürich Nordost).....	23
4. Bruno Baltés: Dosisberechnungen.....	25

1 Einleitung: Anforderungen

1.1 Funktion des kantonalen Fachgremiums und Vorgehensweise

Aufgabe der Arbeitsgruppe Sicherheit Kantone (AG SiKa) und der Kantonalen Experten-Gruppe Sicherheit (KES) im Sachplan Geologische Tiefenlager (SGT) ist, die vorgelegten Dokumente und Untersuchungen der Nationalen Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (Nagra) und die Gutachten und Stellungnahmen hierzu zu prüfen und zuhanden des Ausschusses der Kantone (AdK, mit den Regierungsvertretenden der betroffenen Standortkantone) zu kommentieren (BFE 2008, Pflichtenheft Ziff. 13).

Die AG SiKa/KES besteht aus erfahrenen Fachleuten auf den Gebieten Geologie, Seismik, Hydrologie, Bautechnik, Sicherheitsanalyse und Materialwissenschaften. Sie ist damit in der Lage, die unterbreiteten Ergebnisse auf ihre Plausibilität und fachtechnische Korrektheit zu beurteilen. Die AG SiKa/KES sieht sich als Beauftragte der betroffenen Kantone aber gleichzeitig veranlasst, neben rein naturwissenschaftlich-technischen Fragen auch Prozessaspekte wie Vergleichbarkeit oder Stufengerechtigkeit zu berücksichtigen, dies im Hinblick auf ein transparentes und nachvollziehbares Verfahren. Aussagen zur Prognose der Langzeitsicherheit und zur Bedeutung von Inhomogenitäten und Anisotropie (Schichtung) stellen die Beurteilung der geologischen Verhältnisse vor besondere wissenschaftliche Herausforderungen. Diesen kann mit einem offenen, auch die Ungewissheiten bezüglich Wissensstand und Datenqualität aufzeigenden Arbeitsansatz begegnet werden. Gerade bei einem umstrittenen Thema wie der Lagerung von radioaktiven Abfällen müssen diese Prozessaspekte mitberücksichtigt werden. Die Fachberichte der AG SiKa/KES beinhalten damit sowohl eine wissenschaftliche Fachbetrachtung als auch Überlegungen zur Transparenz und Nachvollziehbarkeit des Verfahrens.

Die AG SiKa/KES hat neben dem Studium der umfangreichen Unterlagen Fachgespräche mit der Nagra und dem Eidgenössischen Nuklearsicherheitsinspektorat (ENSI) geführt. Aufgrund der «Nachforderungen» des ENSI (siehe Kapitel 2) handelt es sich beim vorliegenden Bericht um einen «Zwischenstand».

1.2 Anforderungen an die Beurteilung in Etappe 2

Der Sachplan verlangt, dass die Entsorgungspflichtigen basierend auf einem sicherheitstechnischen Vergleich eine Einengung der Standortgebiete¹ auf mindestens zwei Standortgebiete pro Lagertyp² für die weiteren Untersuchungen in Etappe 3 vornehmen. In Etappe 2 müssen die Standortgebiete anhand qualitativer und quantitativer Sicherheitskriterien bewertet werden: «Ein Standort kann ausscheiden, falls bei dieser Bewertung eindeutige Nachteile gegenüber anderen Standorten festgestellt werden» (BFE 2008, S. 71). Planerisch wird hier von einer «Negativplanung» gesprochen; es werden also in Etappe 2 nicht die «besten» Standortgebiete gesucht, sondern diejenigen ausgeschieden, von denen anzunehmen ist, dass weitere Untersuchungen in Etappe 3 keinen Sicherheitsgewinn und keine Reduktion der massgeblichen Ungewissheiten mehr bringen könnten.

¹ Gemäss Konzeptteil dient Etappe 2 «der Auswahl von mindestens zwei Standorten» (BFE 2008, S. 34), allerdings auf der Basis von geologischen Standortgebieten mit allenfalls verschiedenen möglichen Lagerperimetern untertags. Demzufolge werden beide Begriffe verwendet: Standort und Standortgebiet.

² Zwei Lagertypen: HAA/LMA (hoch- und langlebige mittelradioaktive Abfälle einschliesslich abgebrannter Brennelemente) und SMA (schwachradioaktive und kürzerlebige mittelradioaktive Abfälle).

In Zusammenarbeit mit der AG SiKa/KES präzisierte das ENSI, dass die «Annahmen für die Berechnungen der charakteristischen Dosisintervalle, die Bewertungen und die Bezeichnung eindeutiger Nachteile belastbar sein [müssen], das heisst, Aussagen zur Sicherheit und technischen Machbarkeit müssen auch unter Berücksichtigung der bestehenden Variabilität und Ungewissheiten gültig sein» (ENSI 2013, S. 3). Dabei sind die folgenden sogenannten «entscheidungsrelevanten Merkmale» massgebend: Wirksamkeit, Langzeitstabilität, Explorier- und Charakterisierbarkeit der geologischen Barriere im Standortgebiet sowie bautechnische Machbarkeit unter Berücksichtigung der vorgeschlagenen Standortareale (ebd.). «Standortgebiete können in Etappe 2 ... nur zurückgestellt werden, falls mindestens eine der [folgenden] Fragen belastbar mit ja beantwortet wird:

- Erfüllen Standortgebiete das Dosischutzkriterium nicht?
- Sind Standortgebiete aufgrund der Ergebnisse der Dosis-Berechnungen eindeutig weniger geeignet?
- Sind die Gesamtbewertungen der Standortgebiete schlechter als «geeignet»?
- Können bei Standortgebieten anhand der Kriterien zur Sicherheit und technischen Machbarkeit belastbare eindeutige Nachteile gegenüber anderen Standortgebieten festgestellt werden?» (ebd., S. 6)

Für die AG SiKa/KES war bereits zuvor klar, dass die Einengung in Etappe 2 als wichtigster Prozess des gesamten SGT bezeichnet werden kann (AG SiKa/KES 2011, S. 8ff.). Im Jahr 2010 forderte die AG SiKa/KES ein Vermeiden von verfrühten und unsicheren Bewertungen und Rangierungen von Standortgebieten, welche auf unsicheren und inhomogenen Datengrundlagen basieren (AG SiKa/KES 2010, S. 10).

2 Ausgangslage, Unterlagen der Nagra, Schwerpunktsetzung

Die Nagra legte am 30. Januar 2015 ihren Vorschlag für die Einengung in Etappe 2 vor, den sogenannten 2x2-Vorschlag. Er beinhaltet je ein HAA-Tiefenlager, ein SMA-Tiefenlager und ein Kombilager (HAA/SMA) in den Standortgebieten Jura Ost (JO) und Zürich Nordost (ZNO). Die Nagra dokumentiert den Vorschlag in den Berichten NTB 14-01, NTB 14-02 (Dossiers I bis VIII) und NTB 14-03. Die zusammenfassenden Dokumente basieren auf rund 180 weiteren Berichten der Nagra, die wiederum auf unzähligen Grundlagendokumenten fusen. Die empfohlene Zurückstellung der Standortgebiete Wellenberg (WLB), Jura-Südfuss (JS), Nördlich Lägern (NL) und Südranden (SR) wird durch das Aufzeigen von sogenannten «belastbaren eindeutigen Nachteilen» (gemäss ENSI 2013, S. 6) begründet. Angesichts der Komplexität der Materie und infolge knapper eigener Mittel entschied die AG SiKa/KES, sich bei ihrer Beurteilung auf vier Schwerpunkte zu konzentrieren: Seismik und Tektonik (neuere 2D-Seismik-Daten aus Standortgebieten vorhanden), Geomechanik (Rolle der Tiefenlage), Erosion (minimale Tiefenanforderung) und Dosisberechnungen (wichtige Argumentationsstütze wegen behördlicher Vorgaben).

Anlässlich der Sitzung der AG SiKa/KES vom 23. Februar 2015 stellte die Nagra ihren Vorschlag der AG SiKa/KES vor. Die damals durch die AG SiKa/KES geäusserte Befürchtung, die vorgeschlagenen Zurückstellungen könnten faktisch einen endgültigen Ausschluss bedeuten, wurde von der Nagra indirekt bestätigt. Dies unterstreicht die hohe Tragweite des Ergebnisses der Einengung in Etappe 2. Der Vorschlag der Nagra muss deshalb sachtechnisch sorgfältig überprüft werden. Die AG SiKa/KES hat bereits in Etappe 1 Grundsätze formuliert, wonach Standorte nicht wegen massgebender Ungewissheiten ausscheiden dürfen.

Zudem sollen wirtschaftliche Überlegungen bei der Einengung in Etappe 2 keine Rolle spielen (AG SiKa/KES 2011).

An einer Medienkonferenz des Bundesamts für Energie vom 9. September 2015 teilte das ENSI mit, zu einem von 40 Indikatoren, nämlich «Tiefenlage im Hinblick auf bautechnische Machbarkeit», Nachforderungen an die Nagra zu stellen. Anfang November 2015 legte das ENSI seine konkrete Kritik vor, die von der Nagra eingereichten felsmechanischen Grundlagen, getroffenen Annahmen und gewählten Entwurfsindikatoren seien «gemäss den Prüfergebnissen nicht ausreichend und nicht robust» (ENSI 2015b). Auch für das ENSI sind Auswirkungen der geforderten Nachlieferungen auf das Gesamtsystem möglich: «Wo immer eine Anpassung der Tiefenlage im Hinblick auf die bautechnische Machbarkeit notwendig ist, sind ggf. auch die Bewertungen weiterer sich am Lagerperimeter orientierender Indikatoren anzupassen» (ebd., S. 8). Einen Monat später kündigte die Nagra an, die damit verbundenen Nachlieferungen von Daten «bis Mitte 2016» einzureichen (gemäss BFE 2015).

Da die AG SiKa/KES Anfang 2015 vom ursprünglichen Zeitplan mit einem auf Frühjahr 2016 geplanten ENSI-Gutachten ausging, gab sie auf Ende 2015 vier Expertenberichte zu den erwähnten Aspekten in Auftrag: Seismik und Tektonik, Geomechanik, Erosion und Dosisberechnungen. Diese liegen nun vor (Beilagen 1 bis 4). Die AG SiKa/KES nimmt nachfolgend zusammenfassend zum 2x2-Vorschlag der Nagra Stellung. Sie behält sich vor, aufgrund einer allfälligen neuen Daten- und Erkenntnislage nach der Publikation der Nagra-Nachlieferungen, des ENSI-Gutachtens und der Stellungnahme der Eidgenössischen Kommission für Nukleare Sicherheit (KNS) ihren Fachbericht zuhanden des AdK zu überarbeiten. Der Bericht wurde an der 38. Sitzung der AG SiKa/KES (vom 11. Januar 2016) verabschiedet. Der AdK wird an seiner Sitzung vom 5. Februar 2016 über dessen Veröffentlichung entscheiden.³

3 Beurteilung der Bewertung durch die Nagra

3.1 Vorgehen

Gemäss Vorgaben des Bundes (BFE 2008, ENSI 2013) stützt sich die Nagra bei der Bewertung der Standortgebiete auf zwei Säulen: die provisorischen Sicherheitsanalysen (Dosisberechnungen) und die qualitative Bewertung von im Sachplan festgelegten Kriterien. Bereits in ihrem Fachbericht vom Juli 2010 zur Etappe 1 (AG SiKa/KES, 2010) machte die AG SiKa/KES klar, welchem Pfeiler sie den grösseren Stellenwert beimisst: Gemäss ENSI 2010 (S. 11) vollzieht sich der Sicherheitsvergleich in Etappe 2 in drei Schritten: A) Freisetzungsberechnungen, B) Diskussion von Robustheit/Variationsbereich/Parameterunsicherheit in diesen Berechnungen, C) qualitative Bewertung der Sachplan-Kriterien. Aufgrund des bisherigen Wissensstands ist davon auszugehen, dass die Dosisintervalle voraussichtlich bei allen Standorten unterhalb des Schutzziels von 0.1 Millisievert/Jahr (ENSI 2009) liegen werden.⁴ Dies hat zur Folge, dass der Vergleichsschritt C) ausschlaggebend sein wird für die integrale Bewertung der Standorte (AG SiKa/KES 2010, S. 16).

³ Nachtrag: An seiner 17. Sitzung (vom 5.2.2016) genehmigte der AdK die Veröffentlichung des Fachberichts.

⁴ Bereits in Etappe 1 legte die Nagra Berechnungen vor, nach denen alle sechs Standortgebiete das Schutzziel einhalten (Nagra 2010).

3.2 Dosisberechnungen (Beilage 4)

Die Nagra kommt in ihrer provisorischen Sicherheitsanalyse auf der Grundlage der charakteristischen Dosisintervalle zum Schluss, dass alle Standortgebiete sicherheitstechnisch geeignet sind, weil die errechneten Dosen an allen Standortgebieten kleiner als der vorgegebene Grenzwert sind. Gleichzeitig wird eine sicherheitstechnische Gleichwertigkeit sowohl der SMA- wie auch der HAA-Standortgebiete festgestellt. Auffallend sind jedoch markante Unterschiede der berechneten Dosisintervalle zwischen den Standortgebieten: Standortspezifische geologische Eigenschaften wie Mächtigkeit und Durchlässigkeit der Wirtgesteine, fehlende Rahmengesteine und mögliche Erosionsszenarien schlagen sich erwartungsgemäss deutlich in den Dosiswerten nieder. Dies dokumentiert die Sensitivität der Dosisberechnungen bezüglich der geologischen Gebirgsmodelle, ungewisser Prozesse und Parameter sowie ungewisser Entwicklungen. Mit Hilfe der Dosisberechnungen wird die Wirksamkeit sowohl der modellierten Barrierensysteme als auch ihrer einzelnen Barrieren quantifiziert. Damit lassen sich prioritäre Wirtgesteine für das SMA-Lager, das heisst Wirtgesteine mit den vergleichsweise besten Einschlusseigenschaften, identifizieren. Ein Zurückstellen von Wirtgesteinen im Verfahren alleine auf Basis der Dosisberechnungen ist jedoch nicht zu begründen.

Der Schlussfolgerung der Nagra, alle Standortgebiete seien sicherheitstechnisch geeignet und gleichwertig, kann aus Sicht der AG SiKa/KES nicht gefolgt werden. Das Feststellen der Sicherheit eines Standortgebietes alleine auf der Grundlage von Dosisberechnungen ist nicht möglich. Hierzu bedarf es eines vollständigen Sicherheitsnachweises. Ebenso ist ein sicherheitstechnischer Quervergleich für Standortgebiete auf der Grundlage von Dosisberechnungen methodisch fragwürdig und nicht belastbar. Aus den Dosisberechnungen kann jedoch gefolgert werden, dass – unter der Annahme der Gültigkeit der Prämissen und Festlegungen – keine Erkenntnisse gewonnen wurden, die gegen eine radiologische Sicherheitsaussage (Einhaltung der Dosisgrenzwerte) oder die gegen eine Eignung der Standortgebiete sprechen. Die AG SiKa/KES hat seit Etappe 1 in ihren Stellungnahmen darauf hingewiesen, dass bei der Überprüfung der Eignung eines Standorts die qualitative Bewertung (Schritt (C) in ENSI 2013, S. 5) immer Vorrang haben muss vor Dosisberechnungen (AG SiKa/KES 2010/2011).

Die Dosisberechnungen basieren auf den derzeit eingeschätzten, standortspezifischen geologischen Modellen bezüglich Mächtigkeit, Durchlässigkeit, Langzeitstabilität und anderer Eigenschaften. Nach Vorliegen sicherer geologischer Modelle für die Lagerperimeter müssen die Dosisberechnungen für vollständige Sicherheitsanalysen aktualisiert und verifiziert werden. Dabei sind deutliche Abweichungen zu den heutigen Berechnungen denkbar.

3.3 Qualitative Bewertung

Die qualitative Bewertung verwendet Abschätzungen der einzelnen Kriterien gemäss Sachplan. Es bestehen zum Teil erhebliche Ungewissheiten und damit ein entsprechend grosser Ermessensspielraum. Die qualitativen Bewertungen mit Noten auf eine Dezimalstelle sind somit nicht geeignet, folgenschwere Rangierungen und Entscheide zu treffen. Die qualitative Bewertung kann hingegen vermutete mögliche Schwächen eines Standorts aufzeigen, welchen dann vertieft nachgegangen werden muss. Die Nagra zieht hier gemäss ENSI 33/154 (ENSI 2013) das Attribut der «eindeutigen Nachteile» heran, welche zu einer Zurückstellung eines Standortes führen. Gemäss Definition der Nagra liegt ein eindeutiger Nachteil vor, wenn ein Kriterium gegenüber den besten Standortgebieten um zwei Bewertungsstufen tiefer liegt. Weil sich aber, wie oben gezeigt, hinter dem harmlosen Wort «Zurückstellung» die weit

folgeschwerere Entscheidung eines Ausschlusses verbirgt, müssen die durch die Nagra deklarierten eindeutigen Nachteile der betroffenen Standorte sorgfältig hinterfragt werden. Die Handhabung des Begriffs «eindeutige Nachteile» (schlechter als ...) durch die Nagra erweist sich in dieser Situation als nicht nachvollziehbar und ungeeignet. Hilfreicher wären Identifikationen wie Nichterfüllen von Minimalanforderungen oder die Deklaration von definierten Ausschlusskriterien.

3.4 Methodenkritik

Die Nagra hat mit der Anwendung von «eindeutigen Nachteilen» operiert. Dieses Werkzeug erweist sich, weil es auf Notendifferenzen der qualitativen Bewertung basiert, als unzureichend begründet (bereits zu Etappe 1 äusserte die AG SiKa/KES Vorbehalte zur vorgenommenen Benotung, AG SiKa/KES 2010, S. 15). Auch grundsätzlich sind methodische Einwände angebracht, setzt doch die von der Nagra verwendete, zum Teil selbstentwickelte und nicht nachvollziehbare⁵ Nutzwertanalyse (Multikriterienentscheidungsanalyse) voraus, dass definierte Indikatoren nicht miteinander verknüpft sein dürfen. Von insgesamt 20 sogenannten «entscheidrelevanten Indikatoren» der Nagra sind 6 (oder 30 Prozent) mit der – tatsächlichen oder vermuteten – Tiefenlage eines Lagers verbunden. Infolge dieser Abhängigkeit kann keine Rede davon sein, dass die Indikatoren «sich gegenseitig kompensieren, ... alle gleich wichtig und unabhängig voneinander sind» (Nagra 2015, S. 29). Unabhängigkeit ist eine notwendige Voraussetzung für eine Aggregation – doch genau diese Aggregation wird durch die Nagra mit ihrer Benotung der Indikatoren vorgenommen. Überdies werden verschiedene Aspekte sowohl als Prozesse wie auch als Indikatoren oder Parameter klassifiziert (so in Nagra 2014j, S. 15).⁶ Schliesslich wird suggeriert, dass man allenfalls auf die «zurückgestellten» Standorte zurückkommen könnte. Ausgehend von den «eindeutigen Nachteilen» wäre aus Sicht der AG SiKa/KES eine konsequente Negativplanung zweckmässiger und zielführender; sie lässt sicherheitstechnisch ungenügende, das heisst die Minimalanforderungen nicht erfüllende, Standorte ausscheiden.

4 Zurückstellung der Wirtgesteine «Brauner Dogger» und Effinger Schichten als «weitere Wirtgesteine»

Die zusätzlichen Untersuchungen der Nagra in Etappe 2 führen im Vergleich zu Etappe 1 zu einer deutlich kritischeren Bewertung der Wirtgesteine «Brauner Dogger» (BD) und Effinger Schichten (EFF). Entsprechend schlechter fallen auch die Dosisberechnungen aus, obschon die Grenzwerte knapp eingehalten werden. Da der BD und die EFF in den entsprechenden Standortgebieten gegenüber dem Opalinuston «eindeutige Nachteile» aufweisen, werden sie als «weitere Wirtgesteine» eingestuft und zurückgestellt.

Die AG SiKa/KES ist der Ansicht, dass allein die ungünstigen geologischen Eigenschaften von BD (geringe Mächtigkeit der einschlusswirksamen tonigen Schichten, Auftreten von durchlässigen kalkigen Bänken, komplexe Architektur und schlechte Explorierbarkeit) und EFF (erhöhte Durchlässigkeit, geringe Selbstabdichtung infolge kleiner Tongehalte) nicht nur eine Zurückstellung, sondern einen Ausschluss dieser Wirtgesteine erfordern. Die Zuord-

⁵ Nagra 2014a, Anhänge C und D. Auf konkrete Fragen nach Auswahl und Bewertung ihrer Präferenzen lieferte die Nagra keine die AG SiKa/KES befriedigenden Antworten (25. Sitzung des Technischen Forums Sicherheit, 2. Juni 2015) (ENSI 2015a). Dasselbe gilt für die Begründung des zugrundeliegenden Lagerkonzepts (ebd.).

⁶ Vermischungen finden statt, so heisst ein «Indikator» «Modellvorstellungen zur Langzeitentwicklung (Geodynamik und Neotektonik; weitere Prozesse» (Nagra 2014j, S. A-151).

nung «weiteres Wirtgestein» bedeutet, dass auf das Wirtgestein allenfalls später zurückgegriffen werden könnte, was für die AG SiKa/KES aus Sicherheitsüberlegungen unhaltbar ist.⁷ Es verbleibt einzig der Opalinuston als mögliches geeignetes Wirtgestein für geologische Tiefenlager in der Schweiz.⁸

5 Zurückstellung der SMA-Standortgebiete Wellenberg, Jura-Südfuss und Südranden

Die Identifikation eindeutiger Nachteile durch die Nagra betrifft im Fall dreier Standortgebiete im Wesentlichen folgende Kriterien:

- Wellenberg: ungünstige Explorierbarkeit bei gleichzeitig komplexer, kleinräumig inhomogener Geologie
- Jura-Südfuss: ungenügende Mächtigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs und fragliche Qualität der oberen Rahmengesteine, fehlende untere Rahmengesteine und tektonische Überprägung
- Südranden: zu geringe Tiefenlage unter lokaler Erosionsbasis und Dekompaktion (Auflockerung).

Die AG SiKa/KES ist der Ansicht, dass die Standortgebiete Wellenberg, Jura-Südfuss und Südranden derart markante sicherheitstechnische Schwächen aufweisen, dass diese für ein geologisches Tiefenlager nicht weiterverfolgt werden sollten.

Beim bereits recht gut untersuchten Wellenberg fallen insbesondere das Auftreten von steilen Störzonen und Kalkschuppen, die geringe Fähigkeit zu Selbstabdichtung wegen der kleinen Tongehalte sowie die schlechte Explorierbarkeit negativ ins Gewicht. Dazu kommen grosse Fragezeichen betreffend der Erosion und Neotektonik.

Ähnlich verhält es sich beim Standort Südranden. Die geringe Tiefenlage und die Gefährdung durch Erosion und Dekompaktion, das heisst die fragliche Integrität des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs, sprechen aus Sicht der AG SiKa/KES gegen ein Beibehalten dieses Standortgebiets.

Beim Standort Jura-Südfuss bestehen berechtigte Zweifel, dass der Opalinuston die geforderte Mächtigkeit von 100 Metern aufweist. Zudem fehlen dort teilweise die Rahmengesteine, und wo sie vorhanden sind, weisen sie ein schlechtes Rückhaltevermögen auf. Die Zurückstellung von JS erscheint unter diesen Gesichtspunkten nachvollziehbar und zweckmässig.

⁷ Das einzige Wirtgestein des Standortgebiets Wellenberg, die Mergel-Formationen des Helvetikums, sind durch tektonische Prozesse lokal stark angehäuft, wodurch die standortspezifische Bewertung im Vordergrund steht (siehe Kapitel 5).

⁸ Dieser mögliche Schluss wurde von der AG SiKa/KES bereits in ihrem Fachbericht zu Etappe 1 in Erwägung gezogen (AG SiKa/KES 2010, S. 11).

6 SMA/HAA-Standortgebiete Nördlich Lägern, Zürich Nordost und Jura Ost

6.1 Bedeutung von Platzbedarf und Platzangebot

Für die Einengung in Etappe 2 ist das vorhandene Platzangebot ein entscheidender Faktor. Ein ungenügendes Platzangebot führt dazu, dass ein Standort fallen gelassen werden muss. Die Nagra hat die Standortgebiete nach Etappe 1 bewusst grosszügig ausgeschieden, und zwar in der Voraussicht, dass diese einerseits durch begrenzende Elemente beschnitten werden können. Diese Elemente sind:

- «Zu meidende tektonische Zonen»⁹, das heisst, das Lager muss zu ihnen einen genügenden Sicherheitsabstand aufweisen.
- Erosion, von deren Auswirkungen der einschliesswirksame Gebirgsbereich einen genügenden räumlichen Sicherheitsabstand (vertikal und horizontal) haben muss.
- Maximale Tiefenlage des Lagers, welche den verfügbaren Raum wegen den gegen Süden abfallenden Gesteinsformationen einschränkt.

Andererseits wird der effektive Platzbedarf vor Ort durch die sogenannten «anordnungsbestimmenden geologischen Elemente»¹⁰ (kleinere tektonische Störungen mit Versätzen grösser als 20 Meter, welchen beim Lagerbau ausgewichen werden muss) bestimmt. Im Gegensatz dazu bemisst sich der theoretische Platzbedarf in erster Linie nach der Menge des radioaktiven Abfalls bei einem vollständig homogenen Wirtgestein ohne störende tektonische Elemente. Im Folgenden ist mit «Platzbedarf» jeweils der effektive Platzbedarf gemeint.

Die nachfolgende Skizze illustriert das Zusammenspiel der raumbegrenzenden Elemente.

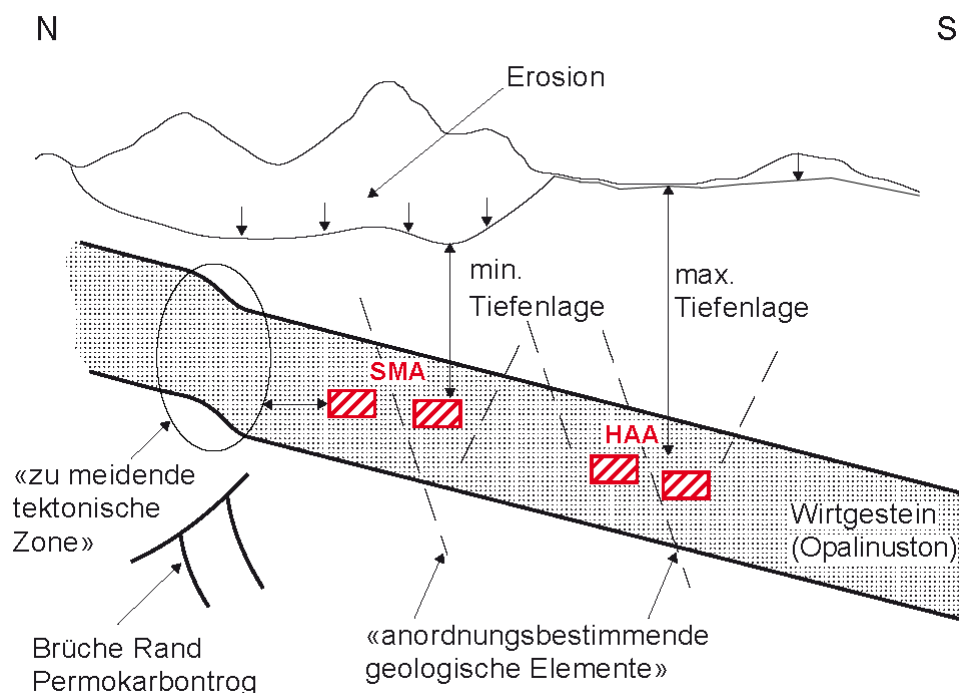


Abbildung 1: Platzbedarf und Platzangebot bestimmende Elemente (schematische Darstellung).

⁹ Eine «zu meidende tektonische Zone» ist eine Flexur und liegt im Einflussbereich reaktivierter Grundgebirgsstörungen (Permokarbondrog) oder von Antiklinalstrukturen im Nahbereich des Faltenjuras (nach Nagra 2014a, S. 24, 48, Nagra 2014c, S. 71ff.). Zusammen mit den regionalen Störungszonen bilden «zu meidende tektonische Zonen» sogenannte «gebietsbegrenzende geologische Elemente» (Nagra 2014a, S. 24, 48) oder auch «regionale tektonische Elemente» (Nagra 2014b, S. 71).

¹⁰ «Anordnungsbestimmende geologische Elemente» sind lokale tektonische Elemente, welche die Konfiguration der Lagerkammern vorgeben (Nagra 2014a, S. 24).

6.2 Platzbedarf

Die Nagra deklariert den Platzbedarf in den einzelnen Standortgebieten wie folgt:

Standortgebiet	SMA	HAA
ZNO	3 km ²	6 km ²
NL	4-5 km ²	8-12 km ²
JO	3-4 km ²	6-9 km ²

Tabelle 1: Von der Nagra postulierter Platzbedarf in den Standortgebieten ZNO, NL und JO (Nagra NAB 14-99).

Der deutlich grössere Platzbedarf bei NL wird durch eine hypothetische erhöhte Frequenz anordnungsbestimmender geologischer Elemente bzw. Störungszonen begründet, die eine grössere Anzahl Lagerfelder erfordert. Die hohe Frequenz der Störungszonen ergibt sich hauptsächlich aus der Anwendung einer ungeeigneten Methode zur Ermittlung der Bruchverteilung. Sie basiert nicht auf einer eigentlichen Interpretation der seismischen Daten. Gemäss Beilage 1 sind in NL nicht mehr «anordnungsbestimmende geologische Elemente» als im benachbarten ZNO erkennbar. Es besteht damit heute kein Grund, bei NL gegenüber ZNO und JO einen doppelt so hohen Platzbedarf zu fordern. Für NL HAA resultiert auf Basis der heute verfügbaren Daten ein realistischer Platzbedarf von 6 km², ähnlich wie bei ZNO. Aus Sicht der AG SiKa/KES ist der deklarierte erhöhte Platzbedarf für NL unzutreffend (siehe unten).

6.3 Einschränkung des Platzangebots durch Tektonik, Erosion und Tiefenlage

6.3.1 Tektonik (Beilage 1)

Beim Standortgebiet NL hat die Interpretation der tektonischen Elemente «zu meidende tektonische Zonen» und «anordnungsbestimmende geologische Elemente» eine stark einschränkende Wirkung auf die Platzierung des Lagerperimeters. Die Interpretation der Tektonik, soweit sie auf der Seismik beruht, kann sich bei NL vorläufig nur auf 2D-Seismik stützen, dies im Gegensatz zu ZNO, wo bereits eine 3D-Seismik vorliegt. Die eingeschränkte Aussagekraft der 2D-Seismik lässt jedoch einen erheblichen Spielraum der Interpretation offen. Insbesondere in NL ist die von der Nagra angegebene Südgrenze der «zu meidenden tektonischen Zone» aufgrund der seismischen Daten nicht ausreichend begründet und auch aus geologisch-tektonischer Sicht nicht plausibel. Gleichzeitig erachtet die AG SiKa/KES das laut Nagra in NL gegenüber ZNO erhöhte Auftreten von «anordnungsbestimmenden geologischen Elementen» als überinterpretiert. Die Nagra postuliert im nordöstlichen Teil von NL wesentlich ungünstigere tektonische Bedingungen als in ZNO. Dieser Schluss ist aber in Anbetracht der qualitativ sehr unterschiedlichen Datenlage nicht haltbar. Erst mit einer ergänzenden 3D-Seismik bei NL können auch hier belastbare Daten gewonnen werden.

Eine weitere für die Optimierung des Lagerperimeters ebenfalls folgenschwere Ungewissheit bei NL (wie auch bei ZNO und JO, wenn auch weniger ausgeprägt) betrifft die Tiefenlage des Opalinustons.

6.3.2 Erosion (Beilage 3)

Die sicherheitstechnisch sehr wichtige Langzeitstabilität der geologischen Barriere wird durch die möglichen Erosionsprozesse zum Teil in Frage gestellt. Die Prognose möglicher Erosionsszenarien ist mit ausserordentlich grossen Unsicherheiten verbunden. Man behilft sich bei der Prognose mit einem Rückgriff in die Vergangenheit aufgrund einer Analyse von

glazialen Vorgängen der letzten 2 Millionen Jahre und prognostiziert diese in die Zukunft (bis zu 1 Million Jahre). Zusätzliche Ungewissheiten bei der Prognose ergeben sich durch die unsichere Entwicklung des Klimas unter dem Einfluss des Menschen und unbekannte neotektonische Bewegungen. Diese Ungewissheiten veranlassen zu einer sehr vorsichtigen Einschätzung der Erosionsprozesse. Die Experten der AG SiKa/KES kommen denn auch zu deutlich pessimistischeren Schlüssen als die Nagra (Tabelle 2).

Die AG SiKa/KES ist der Ansicht, dass Gebiete, in denen Erosionsprozesse die Barriere des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs und damit dessen Integrität beeinträchtigen können, für ein Lager nicht in Frage kommen. Der Prozess Erosion erhält damit eine ausschlusswirksame Bedeutung. Im von der AG SiKa/KES neu definierten «Basisfall neu» mit gegenüber der Nagra-Vorstellung verstärkter Erosion verbleibt trotzdem bei allen drei Standorten noch genügend Platz, um ein Lager zu realisieren, auch wenn bei JO das noch nutzbare Platzangebot sehr stark reduziert ist. Der neu eingeführte «pessimistische Fall neu» mit noch mehr Erosionsgefährdung wird als denkbare, aufgrund der heutigen Kenntnisse nicht auszuschliessendes Szenarium betrachtet. Ein solches würde ein Lager in JO wegen des praktisch auf null geschrumpften Platzangebots verunmöglichen. In Etappe 3 sind vertiefte Untersuchungen erforderlich, um zu zeigen, ob mit einem solchen «pessimistischen Fall neu» weiterhin gerechnet werden muss oder nicht.

Auch bei ZNO ergeben sich durch die Erosion stärkere Einschränkungen des Platzangebots: Das von Erosion verschonte Platzangebot wird gegen Südosten gedrängt, das heisst hin zu grösseren Lagertiefen (siehe unten). Beim Standortgebiet NL hingegen hat die Erosion wegen der grösseren Tiefenlage des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs keine Auswirkungen auf das Platzangebot.

Erosionsszenario	Jura Ost	Nördlich Lägern	Zürich Nordost
<i>Gefährdung durch Dekompaktion</i>	Verbreitet im nördlichen Bereich und bei eingeschnittenen Tälern	Nicht relevant	Nicht relevant
<i>Flächenhafte Erosion (Absenkung der Erosionsbasis)</i>	Verbreitet in grossen Bereichen des Standortgebiets	Nicht relevant	Nicht relevant
<i>Bildung von Durchbruchsrinnen</i>	Keine	Nicht relevant, da Erosion den einschlusswirksamen Gebirgsbereich nicht tangiert	Möglich, betroffen sind die nördlichen Bereiche des Standortgebiets
<i>Glaziale Tiefenerosion</i>	Keine	Nicht relevant, da Erosion den einschlusswirksamen Gebirgsbereich nicht tangiert	Möglich, betroffen sind die nördlichen Bereiche des Standortgebiets
<i>Konsequenzen für Platzangebot</i>	Stärkere Reduktion des Platzangebots. Der Lagerperimeter kann nur im Südosten realisiert werden. Verbleibendes Platzangebot nach Erosionsbetrachtung der AG SiKa/KES: rd. 18 km ²	Keine Reduktion des Platzangebots	Stärkere Reduktion des Platzangebots. Der Lagerperimeter kann nur im Südosten realisiert werden. Verbleibendes Platzangebot nach Erosionsbetrachtung der AG SiKa/KES: rd. 33 km ²

Tabelle 2: Erosionsbedingte Auswirkungen in den Standortgebieten ZNO, NL und JO («Basisfall neu») (gemäss Beilage 3).

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass sich im «Basisfall neu» von Seiten der Erosion kein Ausschluss eines Standortes ergibt. Der «pessimistische Fall neu», welcher aber noch näher abzuklären ist, könnte dazu führen, dass das Standortgebiet JO aufgegeben werden muss. Auch für ZNO ergäben sich stärkere Einschränkungen, weil das erosionsmässig verschonte Gebiet durch zu meidende tektonischen Zonen und die Begrenzung der maximalen Tiefenlage zusätzlich eingeengt wird. Aus heutiger Sicht risikofrei bezüglich Erosion ist nur NL.

6.3.3 Tiefenlage und bautechnische Machbarkeit (Beilage 2)

Die Nagra beschränkt die maximale Tiefenlage des Lagers neu auf 600 Meter für SMA bzw. 700 Meter für HAA. Sie begründet diesen folgenschweren Schritt weniger mit rein bautechnischen Schwierigkeiten als vielmehr mit Sicherheitsaspekten infolge der Auflockerung um die erstellten Lagerstollen. Die sogenannte Auflockerungszone (AUZ, auch plastische Zone genannt) soll auf 5 Meter vertikale Ausdehnung beschränkt werden. Mit umfangreichen Modellrechnungen stellt die Nagra einen Zusammenhang zwischen zu erwartender tiefenabhängiger Konvergenz der Lagerstollen und der AUZ her und begründet so die neue Tiefenbeschränkung. Diese hat insbesondere für NL einschneidende Konsequenzen, weil hier der Opalinuston mit 4 bis 8° gegen Süden bis Südosten in grössere Tiefenlagen abtaucht. Zusammen mit der platzeinschränkenden Wirkung der Tektonik bei einem gleichzeitig aus Sicht der AG SiKa/KES unbegründet grossen Platzbedarf würde sich damit für NL laut Nagra ein zu geringes Platzangebot ergeben: Der Standort wurde deshalb wegen eindeutiger Nachteile des Kriteriums Tiefenlage zur Zurückstellung empfohlen.

Das ENSI liess die Grundlagen der Geomechanik der Nagra durch seine Experten überprüfen. Es kommt in seiner Aktennotiz vom 6.11.2015 wie erwähnt zum Schluss, dass die von der Nagra eingereichten «felsmechanischen Grundlagen, getroffenen Annahmen und gewählten Entwurfsindikatoren nicht ausreichend und nicht robust» sind (ENSI 2015b). In der Folge erachtet das ENSI die von der Nagra gemachten Anforderungen an die maximale Tiefenlage als «nicht nachvollziehbar». Die AG SiKa/KES erkannte bereits sehr früh, dass die Tiefenlage eine der Schlüsselfragen für die Einengung in Etappe 2 darstellt. Sie liess deshalb ihrerseits eine Expertise durch Kalman Kovári erstellen (Beilage 2). Dieser kommt aufgrund seines Studiums der verfügbaren Unterlagen zum Schluss, dass HAA-Stollen auch in Tiefen von 900 Metern grundsätzlich sicher und zuverlässig erstellt werden können. Die für diese Lagertiefen möglicherweise notwendigen grösseren Mengen an Baumaterial (Stahl, Beton) hätten gemäss den Untersuchungen der Nagra keinen Einfluss auf die berechneten Dosen. Das aus der Beschränkung der vertikalen Ausdehnung der plastischen Zone («AUZ») auf 5 Meter abgeleitete Kriterium für die Begrenzung der Lagertiefen ist gemäss Beilage 2 unhaltbar. Der Opalinuston und seine Rahmengesteine – insbesondere in NL – verfügen über ein derart hervorragendes Rückhaltevermögen, dass allfällige lagerbedingte Einflüsse zumindest bis in Tiefen von 900 Metern nicht ins Gewicht fallen können. Weiterführende parametrische Studien, wie vom ENSI verlangt, sind gemäss Beilage 2 nicht erforderlich, da aufgrund der beiden Kriterien «lagerbedingte Einflüsse» und «felsmechanische Eigenschaften und Bedingungen» eine Lagertiefe von 900 Meter prinzipiell nicht ausgeschlossen werden kann.

6.4 Folgerungen für die Realisierbarkeit genügend grosser Lagerperimeter

Die Frage ist zentral, inwieweit bei den Standorten genügend Platz für die Realisierung von Lagerperimetern zur Verfügung steht, die die Sicherheitsanforderungen erfüllen. Sie muss im

Lauf der weiteren Begutachtung beantwortet werden. Für die drei HAA-Standorte ergibt sich gemäss Abklärungen der AG SiKa/KES das folgende Ergebnis:

- ZNO: Eingeschränktes Platzangebot infolge von Erosion. Der Lagerperimeter wird gegen Südosten gedrängt, was eine grössere Tiefenlage erfordert, aber bezüglich Erosion günstig ist.
- NL: Nach Ansicht der AG SiKa/KES hat die Nagra nicht überzeugend dargelegt, dass an diesem Standort das Platzangebot für ein Lager ungenügend ist. Einerseits ist die Tektonik weniger einengend als von der Nagra beschrieben¹¹ (erst eine 3D-Seismik kann hier Klarheit bringen), andererseits können aus Sicht der AG SiKa/KES grössere Lagertiefen als 700 Meter realisiert werden, womit das Platzangebot ausreichen könnte. Der Lagerperimeter ist nicht von Erosion betroffen.
- JO: Die Erosion schränkt das Platzangebot sehr stark ein. Im «Basisfall neu» verbleibt ein sehr kleines Gebiet im Südosten für die Realisierung des Lagerperimeters. Müsste gar mit dem nach den Experten der AG SiKa/KES denkbaren «pessimistischen Fall neu» gerechnet werden (zusätzliche Abklärungen zur Überprüfung notwendig), würde kein von Erosion verschonter Bereich verbleiben.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass im erosionsbezogenen «Basisfall neu» bei allen drei Standorten genügend Platz für ein Lager vorhanden ist. Im heute nicht auszuschliessenden «pessimistischen Fall neu» ergäben sich bei ZNO starke Einschränkungen, JO müsste gar fallengelassen werden.

7 Schlussfolgerungen

Für die AG SiKa/KES hat die Einengung in Etappe 2 eine sehr weitreichende Bedeutung – umso mehr müssen Zurückstellungen sehr sorgfältig geprüft werden. Sie dürfen nicht aufgrund von Ungewissheiten erfolgen. Betrachtet man die von der Nagra vorgenommenen Zurückstellungen unter diesem Gesichtspunkt, ergibt sich folgendes Gesamtbild:

- Die Zurückstellung der Wirtgesteine «Brauner Dogger», Effinger Schichten und Helvetische Mergel ist gerechtfertigt. Geologische Überlegungen führen dazu, dass diese Wirtgesteine aus sicherheitstechnischen Gründen nicht weiterverfolgt werden sollten. Es verbleibt einzig der Opalinuston als mögliches geeignetes Wirtgestein für geologische Tiefenlager in der Schweiz.
- Die Zurückstellung des Standortgebiets für schwach- und mittelradioaktive Abfälle (SMA) Wellenberg ist gerechtfertigt, dies aufgrund des Wirtgesteins Helvetische Mergel und seiner ungünstigen Explorierbarkeit bei gleichzeitig komplexer, kleinräumig inhomogener Geologie.
- Die Zurückstellung des Standortgebiets Jura-Südfuss (SMA) ist gerechtfertigt, weil Vorbehalte betreffend Mächtigkeit des Wirtgesteins bestehen und die wichtigen Rahmengesteine zum Teil fehlen.
- Die Zurückstellung des Standortgebiets Südranden (SMA) ist gerechtfertigt aufgrund der zu geringen Tiefenlage unter der lokalen Erosionsbasis.
- Die Standortgebiete Wellenberg, Südranden und Jura-Südfuss weisen derart markante sicherheitstechnische Schwächen auf, dass diese für ein geologisches Tiefenlager nicht weiterverfolgt werden sollten.
- Der Weiterzug der beiden Standortgebiete ZNO und JO in die Etappe 3 ist nachvollziehbar.

¹¹ Platzbedarf und -angebot sind bei Nagra gekoppelt und wurden in Iterationen ermittelt.

– Die Zurückstellung des Standortgebiets Nördlich Lägern ist nicht gerechtfertigt. Das Argument eines zu geringen Platzangebots wegen Einschränkungen durch Tiefenlage und Tektonik hält einer näheren Überprüfung nicht stand.

Damit ist die AG SiKa/KES mit Ausnahme der Zurückstellung von NL mit dem Ergebnis der Nagra einverstanden. Verschiedene Überlegungen führen dazu, NL in Etappe 3 mitzunehmen und detaillierter zu untersuchen. Einerseits sind die Gründe für die Zurückstellung wie gezeigt nicht stichhaltig. Sie basieren teils auf falschen Annahmen (Geomechanik), teils auf einer unsicheren Datenlage (2D-Seismik). Gleichzeitig haben andererseits die Standorte ZNO und JO grössere Schwächen, indem sie der Erosion ausgesetzt sind, welche NL hingegen verschont. Da alle drei HAA-Standorte aus heutiger Sicht sicherheitstechnisch die Minimalanforderungen erfüllen, gleichzeitig aber unterschiedliche Schwächen und Stärken aufweisen, müssen aus Sicht der AG SiKa/KES in Etappe 3 alle drei weiter bearbeitet werden. Denn nur so kann gewährleistet werden, schliesslich den vergleichsweise sichersten Standort zur Auswahl zu haben.

8 Empfehlungen für das weitere Vorgehen

In Konsequenz der Bewertung des 2x2-Vorschlags der Nagra durch die AG SiKa/KES müssen in allen drei Standortgebieten für HAA, SMA und Kombilager – Jura Ost, Nördlich Lägern und Zürich Nordost – Untersuchungsprogramme der Etappe 3 durchgeführt werden. Dabei sollten gezielt die heute erkannten Ungewissheiten und möglichen sicherheitstechnischen Schwächen der einzelnen Standortgebiete im Sinn einer Negativplanung angegangen werden. Ein solches Vorgehen ist effektiv, effizient und zielführend. Die thematischen Schwerpunkte solcher Untersuchungen sind:

- 3D-Seismik in allen drei Standortgebieten zur Abklärung von Schichtaufbau und lokaler Tektonik
- Vertiefte Untersuchungen zur Neotektonik
- Vertiefte Untersuchungen zur Problematik Erosion (vor allem ZNO und JO)
- Untersuchungen zur standortbezogenen Einbettung der Lagerperimeter in das gesamte hydrologische System einschliesslich Thermalwässer (Standorte NL und JO)
- Konkrete Referenzprojekte nach ingenieurmässigen Kriterien

Referenzen

A. Beilagen

1. Green, A. G. (2016). Seismic images, neotectonism and seismic hazard: Evaluation of Nagra's Stage 2 recommendations for the High-Level Waste (HLW) siting regions [Seismikprofile, Neotektonik und Erdbebengefährdung: Beurteilung der Empfehlungen der Nagra in Bezug auf Standortgebiete für hochradioaktive Abfälle in Etappe 2], 31 pp., 98 figures.
2. Kovári, K. (2016). Die bautechnische Machbarkeit der Lagerstollen. Einfluss der Tiefenlage auf die Langzeitsicherheit. Beurteilung der Untersuchungen der Nagra. 52 S.
3. Müller, E., Schmid, S. (2016). Zu erwartende Erosionsprozesse in den drei möglichen Standortgebieten für hochradioaktive Abfälle (Jura Ost, Nördlich Lägern und Zürich Nordost). 29 S.
4. Baltés, B. (2016). Dosisberechnungen. 53 S.

B. Vorgaben

- AG SiKa/KES (2010). Fachbericht zu Etappe 1. Anhang I zur Stellungnahme des Ausschusses der Kantone zu Etappe 1. Juni 2010. Zürich: AdK.
www.radioaktiveabfaelle.zh.ch (>Ausschuss der Kantone).
- AG SiKa/KES (2011). Fachbericht zu den ergänzenden Untersuchungen im Hinblick auf die Einengung. Mai 2011. www.radioaktiveabfaelle.zh.ch (>Ausschuss der Kantone).
- AG SiKa/KES (4.8.2014). Rückschau der AG SiKa/KES auf die Zwischenhalt-Fachsitzungen in Etappe 2 und weiteres Vorgehen. www.radioaktiveabfaelle.zh.ch (>Ausschuss der Kantone).
- BFE, Bundesamt für Energie (2008). Sachplan geologische Tiefenlager. Konzeptteil. BFE: Bern.
- ENSI, Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat (2009). Spezifische Auslegungsgrundsätze für geologische Tiefenlager und Anforderungen an den Sicherheitsnachweis. Richtlinie für die schweizerischen Kernanlagen. ENSI-G03. Villigen-ENSI: ENSI.
- ENSI (2010). Anforderungen an die provisorischen Sicherheitsanalysen und den sicherheitstechnischen Vergleich. Sachplan geologische Tiefenlager Etappe 2. ENSI 33/075.
- ENSI (2013). Präzisierungen zur sicherheitstechnischen Methodik für die Auswahl von mindestens zwei Standortgebieten ... in Etappe 2 SGT. ENSI 33/154.
- ENSI (22.8.2014). Abschluss der Zwischenhalt-Fachsitzungen und Feststellung des Kenntnisstands zu den 41 ENSI-Forderungen aus ENSI 33/115.

C. Beurteilte Dokumente

- Nagra (2014a). Sicherheitstechnischer Vergleich und Vorschlag der in Etappe 3 weiter zu untersuchenden geologischen Standortgebiete. NTB 14-01. Wettingen: Nagra.
- Nagra (2014b-i). NTB 14-02 (Dossiers I bis VIII). Wettingen: Nagra.
- Nagra (2014j). Charakteristische Dosenintervalle und Unterlagen zur Bewertung der Barriersysteme. NTB 14-03. Wettingen: Nagra.
- Nagra (2015). Standortgebiete für geologische Tiefenlager. Sicherheitstechnischer Vergleich: Vorschläge für Etappe 3. Wettingen: Nagra.
- Weitere beurteilte Unterlagen finden sich jeweils in den Referenzen der vier Expertenberichte (Beilagen 1 bis 4).

D. Weitere beigezogene Unterlagen

- BFE (16.12.2015). Auswahlverfahren für geologische Tiefenlager: Nagra legt Zusatzdokumentation bis Mitte 2016 vor. Medienmitteilung. BFE: Bern.
- ENSI (2015a). Kurzprotokoll vom 1. September 2015 der 25. Sitzung des Technischen Forums Sicherheit – Fachsitzung vom 1. Juni 2015. Anhang 2. ENSI 33/448. <https://www.plattform-tiefenlager.ch> (Zugriff eingeschränkt), Dateiablage TFS.
Frage 5, Auswahl und Bewertung des Wirtgesteins Opalinuston: «Die Nagra ist gebeten, mittels Tischvorlage für die Standortgebiete JO, NL, ZNO und SR und das Wirtgestein Opalinuston detailliert (mit jeweiligen konkreten Werten) ab Schritt 3 aufzuzeigen, wie sie Standortgebiete bzw. optimierte Lagerperimeter eruiert und bewertet hat (entscheidrelevante Indikatoren und Merkmale; qualitativ und quantitativ; eindeutige Nachteile; vierteilige Nutzwertanalyse mit allen Inputdaten [Messwerte oder Expertenurteile], Gewichtungsfaktoren und Nutzwerten; Umgang mit Ungewissheiten).» (keine Tischvorlage vorgelegt)
- Frage 6 zu alternativen Lager- und Barrierenkonzepten, «Was konkret versteht die Nagra unter ‹alternativen Lager- und Barrierenkonzepten›, die sie nach eigener Aussage ihrem eigenen ‹Referenzkonzept› gegenübergestellt hat?
- ENSI (2015b). Nachforderung zum Indikator «Tiefenlage im Hinblick auf bautechnische Machbarkeit» in Etappe 2 SGT. ENSI 33/476. Brugg: ENSI.
- Nagra (2010). Beurteilung der geologischen Unterlagen für die provisorischen Sicherheitsanalysen in SGT Etappe 2. Klärung der Notwendigkeit ergänzender geologischer Untersuchungen. NTB 10-01. Wettingen: Nagra.

Beilagen (Zusammenfassungen)

1. Alan G. Green: Seismic images, neotectonism and seismic hazard: Evaluation of Nagra's Stage 2 recommendations for the High-Level Waste (HLW) siting regions [Seismikprofile, Neotektonik und Erdbebengefährdung: Beurteilung der Empfehlungen der Nagra in Bezug auf Standortgebiete für hochradioaktive Abfälle in Etappe 2¹²]

Die über vier Jahrzehnte laufenden Untersuchungen der Nagra haben dazu geführt, dass das erdwissenschaftliche Verständnis der Nordschweiz bis in eine Tiefe von etwa fünf Kilometern wesentlich verbessert werden konnte. Die Überprüfung zahlreicher Berichte und Seismikdaten der Nagra führt zum Schluss, dass die während Etappe 2 des Sachplans Geologische Tiefenlager von der Nagra angestossenen seismischen Untersuchungen und weitere Studien in hohem Mass zu den folgenden Fortschritten beigetragen haben:

- Das Wissen über die Tiefen der geologischen Markerhorizonte und deren Ungewissheiten ist verbessert worden, besonders in oder nahe von einigen Standortgebieten.
- Die Abgrenzung der *regionalen tektonischen Elemente*¹³ ist genauer geworden. So liegt der nordwestliche Teil des Standortgebiets Nördlich Lägern (NL) gemäss heutigem Wissen über regionalen Störungszonen, die dazu führen, dass der Westteil des Standortgebiets fortan als möglicher Tiefenlagerstandort ausgeschlossen wird.
- Es wurde gezeigt, dass einige *regionale tektonische Elemente* teilweise direkt auf bedeutenden Änderungen tiefer liegender Gesteinsschichten (Markerhorizont Basis Mesozoikum) liegen. Diese Änderungen sind wahrscheinlich Störungszonen oder Faltungen im Grundgebirge, die ihrerseits mit einer postpaläozoischen Reaktivierung permokarbonischer Randbrüche in Verbindung stehen könnten. An zwei oder mehreren Stellen sind Tiefenänderungen des Markerhorizonts auf Verwerfungen entlang diskreter Brüche oder schmaler Bruchzonen zurückzuführen. Unterhalb anderer *regionaler tektonischer Elemente* konnten keine bedeutenden Störungen oder Tiefenänderungen des Markerhorizonts nachgewiesen werden.

Weder innerhalb noch in der Nähe der Standortgebiete Zürich Nordost (ZNO), NL oder Jura Ost (JO) sind nennenswerte neotektonische Aktivitäten auszumachen; diese Standortgebiete liegen alle in einem ausgedehnten Gebiet geringer seismischer Gefährdung. Somit können weder Neotektonik noch Erdbebengefährdung zur Eignungseinstufung der drei Standortgebiete für die Tiefenlagerung hochradioaktiver Abfälle (HAA) herangezogen werden.

Die Nagra schlug vor, das gesamte Standortgebiet NL nicht weiter als möglichen Tiefenlagerstandort zu untersuchen, und zwar einerseits, weil es nicht genügend Platz bietet für den postulierten Platzbedarf von 8 bis 12 km², andererseits weil folgende Schlüsselkriterien erfüllt werden müssten: Erstens dürfte ein solches Lager nicht tiefer als 700 m unter der Erdoberfläche errichtet werden und zweitens dürfte es nicht in eine *tektonisch zu meidende Zone* zu liegen kommen. Die Begründung der Nagra, den nordöstlichen Teil von NL auszuschliessen, ist nicht stichhaltig. Die Begutachtung der Tiefenbeschränkung auf 700 m erfolgt in einem anderen Expertenbericht (Beilage 2). Die Angaben der Nagra bezüglich Platzangebot und Platzbedarf in NL sowie die Abgrenzung einer *tektonisch zu meidenden Zone* im nordöstlichen Teil von NL werden weder durch die Analyse der Seismikdaten noch durch andere Informationen gestützt, wie im Folgenden gezeigt wird:

- Sowohl Unterschiede in den Abschätzungen des Platzangebots in ZNO, NL und JO als auch Unterschiede in der Beurteilung des Platzbedarfs werden auf die vermutete oder angenommene Anzahl und Verteilung *anordnungsbestimmender Störungszonen* zurückge-

¹² Übersetzung TF.

¹³ *Kursiv* gekennzeichnet sind Begriffe, die die Nagra eingeführt hat. Die *anordnungsbestimmenden Störungszonen* sind *kleinere tektonische Störungen* (siehe Fussnote 9 oben).

führt, von der jedes Standortgebiet betroffen sein sollte. Die Abschätzungen des Platzangebots, welche die Nagra für NL vorgenommen hat, basieren auf der ungeeigneten Anwendung einer statistischen Methode, die zudem von einer fehlerhaften Anzahl möglicher *anordnungsbestimmender Störungszonen* ausgeht. Der Fehler in Bezug auf die Anzahl möglicher *anordnungsbestimmender Störungszonen* ist eine Folge von Fehlinterpretationen, Überinterpretationen und Falschdarstellungen seismischer Daten. Im Gegensatz zu den Darstellungen der Nagra existiert eine weiträumige, 20 km² grosse Fläche im nordöstlichen Teil von NL, innerhalb welcher keine potenziellen *anordnungsbestimmenden Störungszonen* glaubwürdig nachgewiesen werden konnten.

- Mindestens eine genügend grosse Fläche ohne *anordnungsbestimmende Störungszone* kann aufgrund der 3D-Seismik in ZNO ausgemacht werden. Deshalb ist laut Nagra der dortige Platzbedarf von rund 6 km² auch der gültige Mindestwert für die anderen Standortgebiete. Unter Verwendung des Basiswerts von rund 6 km² und einer angenommenen unterschiedlichen Anzahl und Verteilung der *anordnungsbestimmenden Störungszonen* kommt die Nagra auf hypothetische Platzbedarfswerte von 8 bis 12 km² für NL und von 6 bis 9 km² für JO. Doch hypothetische Abklärungen des Platzbedarfs sind eine zweifelhafte Grundlage für die Ermittlung des wirklichen Platzbedarfs für ein Tiefenlager in diesen beiden Standortgebieten. Es ist sehr wohl möglich, dass der nordöstliche Teil von NL und ein grosser Teil von JO mehr Raum erfordern als ZNO, doch die Nagra hat dies in Etappe 2 nicht nachweisen können. Ohne Informationen aus 3D-Seismik in den Standortgebieten NL und JO zur Hand zu haben, wäre die Nagra gut beraten gewesen, allen drei HAA-Standortgebieten denselben Platzbedarf von rund 6 km² zuzuweisen.
- Berichten der Nagra zufolge liegen den Kriterien für die Ausweisung einer *zu meidenden tektonischen Zone* im Nordosten von NL eine Flexur der postpaläozoischen Sedimente zugrunde sowie eine darunterliegende reaktivierte Störung im Grundgebirge, die mit einem Permokarbondrog in Verbindung gebracht wird. In verschiedenen Gebieten spielen auch geologische Modellvorstellungen eine Rolle, wenn es darum geht, eine *zu meidende tektonische Zone* zu orten. Die Übersichtskarte der Nagra, welche den Anschein erweckt, die permokarbonischen Strukturen im Untergrund der Nordschweiz genau aufzuzeigen, schliesst interpretierte Störungszonen an der Troggrenze und innerhalb des Trogs für den nordöstlichen Teil von NL mit ein. Diesen interpretierten Störungen liegen kleine Änderungen des Einfallswinkels der postpaläozoischen Einheiten von 3 bis 5° auf 5 bis 7° zugrunde, die sich über eine Entfernung von 500 bis 700 m hinziehen. Die Analyse der massgebenden seismischen Daten zeigt, dass die interpretierten Störungszonen an der Troggrenze und innerhalb des Trogs im nordöstlichen NL entweder nicht zwingend existieren oder gar im Widerspruch zu den Seismikdaten sind. Die Seismik liefert keine Hinweise für reaktivierte Grundgebirgsstörungen und damit zusammenhängende *zu meidende tektonische Zonen*, wie von der Nagra in diesem Teil von NL postuliert. Eine geringe stetige Änderung im Einfallen der postpaläozoischen Einheiten reicht, zusammen mit einer geologischen Modellvorstellung, nicht aus, um überzeugend eine *zu meidende tektonische Zone* im nordöstlichen Teil von NL auszuscheiden.

Die Nagra hat nicht schlüssig nachgewiesen, dass es im nordöstlichen Teil von NL zu wenig Platz hat, um ein HAA-Tiefenlager zu realisieren. Die Abschätzungen des Platzangebots und die Angaben zum Platzbedarf weisen Schwachstellen auf und die Argumentation bezüglich einer *zu meidenden tektonischen Zone* in diesem Teil von NL ist fragwürdig. Eine 3D-reflexionsseismische Untersuchung im Nordosten von NL ist nötig, um die Annahmen, Hypothesen und Modelle der Nagra zu überprüfen. Infolgedessen ist der Vorschlag der Nagra verfrüht, Nördlich Lägern als mögliches Standortgebiet schon in Etappe 2 zurückzustellen.

2. Kalman Kovári: Die bautechnische Machbarkeit der Lagerstollen. Einfluss der Tiefenlage auf die Langzeitsicherheit. Beurteilung der Untersuchungen der Nagra

Die Nagra kommt aufgrund von Plausibilitätsüberlegungen und umfangreicher geomechanischer Untersuchungen zum Schluss, dass die HAA-Lagerstollen im Opalinuston in einer Tiefe von 900 m die Anforderungen an die Langzeitsicherheit wegen nachteiliger baubedingter Effekte nicht erfüllen. Mehrere falsche Prämissen sowie mangelhafte Schlüsse in der Argumentation der Nagra lassen keine solche Behauptung zu, wie unten ausgeführt wird. Zudem zeigen umfangreiche Dosisberechnungen der Nagra selber, dass solche baubedingten Effekte den Radionuklidtransport bis zur Biosphäre kaum beeinflussen. Im vorliegenden Bericht wurden die Plausibilität und die geomechanischen Untersuchungen der Nagra überprüft, die Dosisberechnungen aber als korrekt vorausgesetzt. Im Folgenden werden horizontaler und vertikaler Freisetzungspfad getrennt behandelt.

Beim *horizontalen Freisetzungspfad* steht der Gedanke an eine durch Risse beschädigte und chemisch degradierte Spritzbetonschale zwischen Bentonitverfüllung und Wirtgestein im Vordergrund. Eine Zwischenschicht in solchem Zustand würde eine erhöhte Durchlässigkeit aufweisen und so den Transport von Radionukliden begünstigen. Um einen derartig präferenziellen Freisetzungspfad zu unterbrechen, sind in den Lagerstollen Zwischensiegel aus Bentonit in regelmässigem Abstand vorgesehen. Durch lokalen Verzicht der Spritzbetonschale wird abschnittsweise ein sattes Anliegen der Bentonitverfüllung an das Wirtgestein angestrebt. Die Nagra kommt zum Schluss, dass solche Zwischensiegel in einer Tiefe von 600 – 700 m fachgerecht ausgeführt werden können, nicht jedoch auf 900 m. Der Grund liege darin, dass sich der Opalinuston in grösseren Tiefen nachbrüchig verhalte und stärkere Deformationen aufweise, wodurch eine fachgerechte Erstellung der Zwischensiegel in Frage gestellt wäre. Man kann jedoch leicht zeigen, dass die Zwischensiegel in der von der Nagra vorgeschlagenen Weise selbst bei 600 m nicht fachgerecht ausführbar sind. Somit ist das Argument mit den Zwischensiegeln für das Ausscheiden von HAA-Lagerstollen in einer Tiefe von 900 m grundsätzlich nicht haltbar. Aus den Dosisberechnungen geht zudem eindeutig hervor, dass die Zwischensiegel gar nicht notwendig sind. Sie zeigen auf, dass eine degradierte Spritzbetonschale hoher Durchlässigkeit selbst bei einem hohen hydraulischen Gradienten praktisch keinen Einfluss auf die Menge der transportierten Radionuklide hat. Dies ist auf die sehr geringe Durchlässigkeit des Wirtgesteins zurückzuführen, die einen Zufluss von in der Praxis relevanten Wassermengen zum Spritzbeton gar nicht zulässt.

Ein weiterer Einwand der Nagra bezüglich des horizontalen Freisetzungspfades in grösseren Tiefenlagen bezieht sich auf die Annahme, die Spritzbetonschale würde infolge der von ihr ausgehenden pH-Fahne das Rückhaltevermögen sowohl der Bentonitverfüllung als auch jene des umliegenden Wirtgesteins beeinträchtigen. Gegen eine solche Behauptung sprechen mehrere Gründe: Zum Ersten belegen geochemische Untersuchungen, dass sich die Ausbreitung der pH-Fahne auf die unmittelbare Umgebung der Spritzbetonschale beschränkt. Zum Zweiten könnten die Produkte der chemischen Prozesse das Rückhaltevermögen des betroffenen Materialbereichs sogar erhöhen und zum Dritten geht aus Dosisberechnungen hervor, dass – selbst wenn im Bereich der pH-Fahne die Durchlässigkeit erhöht wäre – dies auf den Nuklidtransport praktisch keinen Einfluss haben würde.

Beim *vertikalen Freisetzungspfad* steht die Forderung der Nagra im Zentrum, wonach sich die plastischen Zonen – in diversen Quellen auch als Auflockerungszone bezeichnet – in der Umgebung der Lagerstollen in vertikaler Richtung nicht mehr als 5 m über die Stollenmitte erstrecken dürfen. Diese Forderung leitet sich vom nicht begründeten Postulat ab, die vertikale Distanz zwischen plastischer Zone und Schichtgrenze des Opalinustons müsse mindestens 35 m betragen. Bei einer angenommenen minimalen Schichtstärke des Opalinustons

von 80 Metern und der Anordnung der Anlage in dessen Mittelebene erhält man in der Tat eine derartige vertikale Begrenzung der plastischen Zone. Aus den felsmechanischen Berechnungen der Nagra geht hervor, dass bei 700 m Tiefe die vertikale Erstreckung der plastischen Zone den Grenzwert von 5 Metern nicht überschreiten würde, während dies bei 900 m Tiefe bei Weitem der Fall wäre. Aufgrund des erwähnten Postulates und rechnerisch ermittelten plastischen Zonen wird deshalb empfohlen, auf Anlagen in einer Tiefe von 900 m zu verzichten. Bei dieser Art von Rückstellungskriterium fällt sofort auf, dass die Bestimmung der Tiefenlage und somit die Bauausführung der Anlage mit einer Genauigkeit von einigen Metern erfolgen müsste. Eine solche Folgerung erscheint angesichts der dem Problem der Lagerung radioaktiver Abfälle generell innewohnenden Unwägbarkeiten paradox.

Gegen die Verknüpfung der postulierten Distanz von 35 m mit der plastischen Zone können vier gänzlich unterschiedliche Argumentationsstränge vorgebracht werden. Zwei beziehen sich auf das Postulat mit der Grenzdistanz und zwei behandeln die Verwendung des Begriffes der plastischen Zone als Urteilkriterium. Ein einziges der Argumente würde genügen, um die obige Empfehlung zurückzuweisen; wir führen sie hier dennoch alle vier auf. Unsere Einwände sind wie folgt: *Erstens* ist der Begriff der plastischen Zone als Urteilkriterium aus physikalischen Gründen nicht verwendbar. Es darf angenommen werden, dass – wie immer auch die baubedingten Eingriffe das stollenumgebende Material verändern (z.B. Erhöhung der Durchlässigkeit) – solche Veränderungen nach 1'000, 10'000 oder 100'000 Jahren kaum mehr vorhanden wären. Man kennt die Prozesse, welche schon nach viel kürzerer Zeit zu einer Selbstabdichtung des Opalinuston führen, womit die ursprüngliche Dichtheit zurückgewonnen wird. Die Ergebnisse von Feldmessungen im Opalinuston des Felslabors Mont Terri weisen darauf hin, dass zumindest unter den dort herrschenden geostatischen Spannungen die Einbusse der Durchlässigkeit in der Umgebung der Stollen äusserst gering ist und eine messbare Zunahme der Durchlässigkeit – wenn überhaupt – nur in unmittelbarer Nähe des Ausbruchs stattfindet. Überdies wäre die Ermittlung der plastischen Zone, falls ein solch theoretisches Gebilde als Kriterium zugelassen wäre, mit erheblichen Schwierigkeiten verbunden, treten doch in den entsprechenden Berechnungsmodellen bis zu 20 geschätzte Modellparameter auf. *Zweitens* zeigen die Dosisberechnungen, dass die plastische Zone – wie auch immer sie ausgebildet sei – auf die Dosen praktisch keinen Einfluss hat. Für die plastische Zone wurden Durchlässigkeitskoeffizienten von bis zu 10^{-8} m/s (anstatt 10^{-13} m/s für Opalinuston) angenommen. *Drittens* ergeben dieselben Dosisberechnungen, dass ein kürzerer Freisetzungspfad als 35 m (bis auf etwa 25 m) praktisch keinen Einfluss auf die Dosen hat. *Viertens* wurden bei diesen Überlegungen nur das Wirtgestein, nicht aber die einschlusswirksamen Rahmengesteine in Betracht gezogen. Direkt unter dem Opalinuston liegt der Tonige Lias mit einer Schichtmächtigkeit von über 20 m mit ähnlich geringer Durchlässigkeit wie das Wirtgestein. Man kann deshalb die Lagertiefe um einen Abstand von bis 10 Meter tiefer als die Mittelebene des Opalinustons legen. Dadurch wären plastische Zonen mit einer vertikalen Erstreckung von bis zu 15 m statt 5 m möglich.

Fazit: Die Überprüfung des vorgelegten umfangreichen Materials der Nagra ergibt eindeutig, dass deren Argumentation nicht haltbar ist, Lagertiefen von bis zu 900 m auszuschliessen, wodurch die damit begründete Zurückstellung des Standortgebiets Nördlich Lägern unzulässig ist. Es bedarf keinerlei weiterer empirischer oder theoretischer Untersuchungen irgendwelcher Art, um nachzuweisen, dass Nördlich Lägern unter dem Gesichtspunkt "*Bautechnische Machbarkeit*" beibehalten werden kann. Anstelle die Eignung eines Lagers in grösseren Tiefen weiter zu diskutieren und weitere unverbindliche parametrische Studien durchzuführen, wird empfohlen, ein konkretes Referenzprojekt mit grösserer Bearbeitungstiefe für Lagertiefen von 700 Metern und 900 Metern nach vermehrt ingenieurmässigen Kriterien zu erarbeiten.

3. Erich Müller & Stefan Schmid: Zu erwartende Erosionsprozesse in den drei möglichen Standortgebieten für hochradioaktive Abfälle (Jura Ost, Nördlich Lägern und Zürich Nordost)

Der Isolationszeitraum für hochradioaktive Abfälle von einer Million Jahre macht es nötig, dass Erosionsprozesse im Zusammenhang mit Tiefenlagern analysiert werden. Zu berücksichtigende Erosionsszenarien umfassen alle Arten von Erosionsprozessen: flächenhafter Abtrag der Erdoberfläche, der zu einer Auflockerung (Dekompaktion) des Wirtgesteins und seiner Rahmengesteine und letztlich zu seiner Freilegung führen kann; fluviatile Eintiefungen und glaziale Übertiefungen; Schaffung neuer Durchbruchsrinnen (zum Beispiel infolge einer Flussumlenkung bei einer Vergletscherung) sowie deren glaziale und fluviatile Übertiefung.

Zielsetzung des vorliegenden Expertenberichts ist die Beurteilung der Frage, inwieweit die zu erwartenden Erosionsprozesse das Wirtgestein Opalinuston in seinen abschirmenden Eigenschaften negativ beeinflussen oder dieses gar freilegen könnten. Der Bericht fokussiert auf die drei möglichen Standortgebiete für hochradioaktive Abfälle (HAA) Jura Ost (JO), Nördlich Lägern (NL) und Zürich Nordost (ZNO). Einerseits geht es um die Überprüfung der Bereiche innerhalb jedes Standortgebiets ohne ausreichenden Schutz des Opalinustons gegen künftige Erosion (mit Folgen für das Platzangebot), andererseits wird aufgrund einer eigenen neuen Einschätzung der Unsicherheiten in der Erosionsgeschichte ein Vergleich der drei Standortgebiete bezüglich belastbarer Vor- und Nachteile vorgenommen.

Eingangs machen wir auf drei grundsätzliche Probleme aufmerksam: 1. Eine gesonderte Betrachtung der Indikatoren (wie sie die Nagra vornimmt) lässt ausser Acht, dass diese voneinander abhängig sind und sich in ihren Auswirkungen und deren Bewertung überlagern können (zum Beispiel Absenkung der Erosionsbasis und glaziale Übertiefung). 2. Grundlage der Projektion von Erosionsszenarien über einen Zeitraum von einer Million Jahre ist die sorgfältige Analyse der jüngsten geologischen Vergangenheit, also etwa der letzten zwei Millionen Jahre. Diese Analyse ist aber äusserst schwierig. Folglich ist auch in der nächsten Million Jahre eine unetliche Landschaftsentwicklung anzunehmen. Den Vor- und Nachteilen der einzelnen Standorte bezüglich zu erwartender Erosionsprozesse ist bereits heute grösste Aufmerksamkeit zu schenken, denn es ist kaum zu erwarten, dass sich die diesbezüglichen Kenntnisse im Verlauf des Sachplanverfahrens wesentlich verbessern. 3. Im Bericht verzichten wir auf die von der Nagra verwendeten wertenden Prädikate «sehr günstig», «günstig», «bedingt günstig» oder gar auf die entsprechenden Zahlenwerte von 0 bis 5 für die entscheiderelevanten Kriterien, da wir diese Wertskalen nicht als sinnvoll erachten.

Flächenhafter Abtrag: Mit dem Indikator der Nagra «Erosion im Betrachtungszeitraum» werden grossräumige Unterschiede zwischen den Standortgebieten betreffend Erosion betrachtet: lineare Eintiefung und flächenhafter Abtrag der Erdoberfläche. Wir teilen die Schlussfolgerung der Nagra, dass infolge der grossräumigen Kippbewegung des Alpenvorlandes einerseits der Standort Wellenberg entscheidende Nachteile aufweist und dass sich andererseits die drei potenziellen Standortgebiete in der Nordschweiz bezüglich Eignung vorerst nicht voneinander unterscheiden. Wir wissen allerdings nicht, wie weit nördlich der Alpen der Nullpunkt dieser Kippachse mit Null vertikaler Hebungsrate relativ zum Geoid liegt; wir wissen also nicht, wie stark sich der Nagra-Referenzpunkt Laufenburg hebt.

Dekompaktion: Damit das Wirtgestein Opalinuston während der massgebenden Zeit seine Dichtigkeit bzw. Undurchlässigkeit beibehält, darf es durch Dekompaktionserscheinungen nicht aufgelockert werden. Deshalb muss laut Nagra für ein HAA-Lager die Oberfläche des Opalinustons tiefer als ca. 400 m unter dem heutigen Terrain liegen. In ZNO und NL liegt der Opalinuston weitestgehend tiefer als 400 m unter heutigem Terrain. Im zentraleren Bereich

von JO findet sich der Opalinuston zwar ebenfalls oft tiefer als 400 m unter Terrain, doch die randlichen Gebiete sowie die Bereiche entlang der Taleinschnitte weisen zu geringe Schutzabstände auf. Sie sind demzufolge zur Anlage eines Tiefenlagers nicht geeignet.

Bildung neuer Rinnen: In Anbetracht der grossen Unsicherheiten bezüglich der vergangenen und prognostizierten Absenkung der lokalen Erosionsbasis ist nicht nachvollziehbar, wie die Nagra insbesondere JO bezüglich des Kriteriums «Absenkung der lokalen Erosionsbasis in Hinblick auf die Bildung neuer Rinnen» bewertet. Es ist für alle drei Standortgebiete davon auszugehen, dass im massgebenden Zeitraum mindestens eine Durchbruchsrinne entstehen kann. Da die zu erwartende Häufigkeit von künftigen Vergletscherungen vom Raum ZNO über NL bis ins Gebiet JO abnimmt, nimmt auch die Wahrscheinlichkeit für die Bildung neuer Durchbruchsrinnen in gleicher Richtung ab. Doch darf einerseits die Eintiefung einer Durchbruchsrinne unter die abgesenkte lokale Erosionsbasis im Fall JO nicht ausgeschlossen werden, andererseits erscheint uns die Einstufung der Nagra von ZNO viel zu optimistisch. Am Standort NL ist die Situation zweifellos deshalb am günstigsten, weil die Lagerebene dort wesentlich tiefer liegt.

Für ZNO ist eine bis 300 m unter die heutige lokale Erosionsfläche reichende Rinne durchaus plausibel. Daher sollte für ZNO gelten, dass die Oberfläche des Wirtgesteins mindestens 300 m unterhalb der in 1 Million Jahre abgesenkten Erosionsbasis anstehen muss. Die im Bericht gezeigten Konsequenzen würden das Platzangebot im Standortgebiet ZNO drastisch einschränken. Mit grösseren Einschränkungen des Platzangebots ist auch im Standortgebiet JO zu rechnen. In NL kann infolge der tiefen Lage unter der heutigen Erosionsbasis eine das Tiefenlager gefährdende glaziale Tiefenerosion ausgeschlossen werden.

Beim entscheiderelevanten Indikator «Modellvorstellungen zur Langzeitentwicklung (Geodynamik und Neotektonik; weitere Prozesse)» ist es besonders schwierig, die Bewertungen der Nagra bezüglich Vor- und Nachteile der drei Standortgebiete nachzuvollziehen, da es unter anderem unklar bleibt, inwiefern auch Aspekte der Geodynamik und Neotektonik in die unterschiedlichen Bewertungen einfließen.

Aufgrund der Tatsache, dass das gesamte Standortgebiet NL praktisch keine Probleme bezüglich der Erosionsprozesse aufwirft, wird der von der Nagra postulierte Eignungsunterschied zu JO und ZNO stark vermindert. Beide lassen anhand der vorliegenden Beurteilung der künftigen Erosionsprozesse wesentlich grössere Nachteile gegenüber NL erkennen. So ist deshalb aus Sicht der Erosionsproblematik mindestens kein belastbarer, also nachvollziehbarer eindeutiger Nachteil von NL gegenüber den beiden andern Standortgebieten festzustellen. Dieses Standortgebiet ist als einziges aus Sicht der Erosion nach heutigem Wissen bedenkenlos.

Insgesamt betrachtet bestehen zurzeit noch viele grundsätzliche und wesentliche offene Fragen, die es in Etappe 3 soweit wie möglich zu klären gilt (Zeitpunkt, ab dem die Höheren Deckenschotter eingeschnitten werden konnten; Festsetzen der anzuwendenden Tiefenlage der abgesenkten Erosionsbasis in einer Million Jahre; Verkleinern der Schwankungsbereiche der Höhenlagen der Oberfläche des Wirtgesteins Opalinuston; Klären der Frage, inwieweit in JO glaziale Tiefenerosion überhaupt möglich ist; Bestimmen der maximal zu berücksichtigenden Tiefe für eine glaziale Tiefenerosion in ZNO). Solange diese Fragen offen bleiben, ist aufgrund der Erosionsbetrachtung eine Einengung von drei auf zwei HAA-Standorte verfrüht und daher abzulehnen.

4. Bruno Baltes: Dosisberechnungen

Dosisberechnungen in der sogenannten provisorischen Sicherheitsanalyse in Etappe 2 dienen dazu, die Sicherheit der in Etappe 1 festgelegten Standortgebiete zu beurteilen und mithilfe charakteristischer Dosisintervalle deren sicherheitstechnische Eignung und Gleichwertigkeit zu prüfen. Im vorliegenden Bericht werden die Elemente und die Zusammenschau der Ergebnisse der Dosisberechnungen auf die Aspekte Korrektheit, Schlüssigkeit, Vollständigkeit und Nachvollziehbarkeit geprüft und bewertet.

Die Nagra konzentriert die Dosisberechnungen auf das Einschussvermögen und die Barrierenwirksamkeit des einschusswirksamen Gebirgsbereichs (EG), das heißt auf das Wirtsgestein und – sofern vorhanden – die Rahmengesteine. Die Abstraktion der Standortgebiete in Modellkonzepten ist dem Kenntnisstand und den verbliebenen Ungewissheiten in Etappe 2 geschuldet. Den Ungewissheiten wird durch Konzeptualisierung, Annahmen und Prämissen, geeignete Wahl der Prozesse und Parameter sowie eine Vielzahl von Rechenfällen Rechnung getragen. Diese Vorgehensweise ist im Hinblick auf eine Bewertung der Barrierenwirksamkeiten und der Robustheit insbesondere der geologischen Barrierensysteme des EG etappengerecht. Bei der Interpretation der Analyseergebnisse (Dosiswerte) müssen jedoch diese Einschränkungen beachtet werden.

Die Dosisberechnungen erlauben eine quantitative Bewertung der Wirksamkeit sowohl der modellierten Barrierensysteme als auch ihrer einzelnen Barrieren. Hieraus lassen sich «prioritäre Wirtsgesteine» für das SMA-Lager, das heißt Wirtsgesteine mit den vergleichsweise besten Einschusseigenschaften, identifizieren. Ein Zurückstellen von Wirtsgesteinen im Verfahren alleine auf Basis der Dosisberechnungen ist nicht zu begründen.

Die Schlussfolgerung der Nagra – unter Anwendung der Vorgaben des ENSI –, dass alle Standortgebiete (HAA, SMA¹⁴) aufgrund der Unterschreitung von vorgegebenen Dosisgrenzwerten sicherheitstechnisch sowohl geeignet wie auch gleichwertig sind, ist nicht haltbar. Eine sicherheitstechnische Eignung von Standortgebieten kann nur durch einen vollständigen Sicherheitsnachweis vor Ort festgestellt werden. Das Feststellen der Sicherheit eines Standortgebiets alleine auf der Grundlage von Dosisberechnungen ist nicht möglich.

Ein sicherheitstechnischer Quervergleich für Standortgebiete auf der Grundlage von Dosisberechnungen ist methodisch fragwürdig und nicht belastbar. Um einen sicherheitstechnischen Quervergleich durchzuführen, muss eine Basis der Vergleichbarkeit von Standortgebieten durch Festlegungen und Konzeptualisierungen der Standortgebiete geschaffen werden, das heißt gleichartig aufgebaute und gleichartig wirkende Systeme, die gleichartigen Entwicklungen unterstehen. Dies ist für die zu vergleichenden Standortgebiete nicht gegeben.

Der Anspruch an die Bewertung der Sicherheit, die sicherheitstechnische Eignung und sicherheitstechnische Gleichwertigkeit der Standortgebiete ist zu relativieren. Hervorzuheben ist, dass die in den Dosisberechnungen ermittelten Dosen sowie die vorgegebenen Dosisgrenzwerte als Indikatoren zur Bewertung der Einschussfähigkeit des EG zu werten sind. Darüber hinaus sollte die nach ENSI-Vorgaben festgestellte sicherheitstechnische Eignung im Sinne eines Verbleibs im Auswahlprozess gewertet werden.

¹⁴ HAA (hoch- und langlebige mittelradioaktive Abfälle einschließlich abgebrannter Brennelemente), SMA (schwach- und kürzerlebige mittelradioaktive Abfälle).

Das Konzept der charakteristischen Dosisintervalle ist aufgrund des begrenzten Kenntnisstands in den einzelnen Standortgebieten in Etappe 2, der Ungewissheiten sowie der Konzeptualisierungen mit ihren Annahmen und Festlegungen nicht abschließend in der Lage, die Einhaltung der radiologischen Grenzwerte an einem Standortgebiet festzustellen. Dies bleibt der Etappe 3 vorbehalten. Aus den Dosisberechnungen kann jedoch gefolgert werden, dass – unter der Annahme der Gültigkeit der Prämissen und Festlegungen – keine Erkenntnisse gewonnen wurden, die gegen eine radiologische Sicherheitsaussage (Einhaltung der Dosisgrenzwerte) oder die gegen eine Eignung sprechen.

Die Übertragung der Erkenntnisse aus den Dosisberechnungen auf die Standortgebiete kann nur erfolgen, wenn die einzelnen standortspezifischen Modellkonzepte hinsichtlich ihrer Eigenschaften (zum Beispiel Mächtigkeit, laterale Ausdehnung, hydraulische Durchlässigkeit, Diffusivität, Integrität, Langzeitstabilität) als auch ihrer potenziellen Entwicklungen als repräsentativ für die jeweiligen Standortgebiete anzusehen sind. Das bedeutet, dass die Prämissen und Festlegungen gültig sein müssen, zum Beispiel dass in jedem Standortgebiet ein ausreichend großer Wirtsgesteinskörper vorliegt, der die Anforderungen an einen einschlusswirksamen Gebirgsbereich mit seinen eben genannten charakteristischen Eigenschaften erfüllt.