

Technischer Bericht 14-02

SGT Etappe 2: Vorschlag weiter zu untersuchender
geologischer Standortgebiete mit zugehörigen
Standortarealen für die Oberflächenanlage

Geologische Grundlagen

Dossier I

Einleitung und Zusammenfassung

Dezember 2014

Nationale Genossenschaft
für die Lagerung
radioaktiver Abfälle

Hardstrasse 73
CH-5430 Wettingen
Telefon 056-437 11 11

www.nagra.ch

Technischer Bericht 14-02

SGT Etappe 2: Vorschlag weiter zu untersuchender
geologischer Standortgebiete mit zugehörigen
Standortarealen für die Oberflächenanlage

Geologische Grundlagen

Dossier I

Einleitung und Zusammenfassung

Dezember 2014

Nationale Genossenschaft
für die Lagerung
radioaktiver Abfälle

Hardstrasse 73
CH-5430 Wettingen
Telefon 056-437 11 11

www.nagra.ch

Der vorliegende Bericht besteht aus einer Folge von acht eigenständigen, nach geowissenschaftlichen Disziplinen gegliederten Dossiers. Der Bericht wurde von einem Projektteam erarbeitet mit unten aufgeführten Hauptautoren. Weitere Personen, die Textbeiträge geliefert oder redaktionell mitgearbeitet haben sind bei den einzelnen Dossiers aufgeführt:

Dossier I – Einleitung und Zusammenfassung

Andreas Gautschi, Piet Zuidema

Dossier II – Sedimentologische und tektonische Verhältnisse

Herfried Madritsch, Gaudenz Deplazes,

Dossier III – Geologische Langzeitentwicklung

Michael Schnellmann, Herfried Madritsch

Dossier IV – Geomechanische Unterlagen

Paul Marschall, Silvio Giger

Dossier V – Hydrogeologische Verhältnisse

Daniel Traber, Nick Waber*, Andreas Gautschi, Paul Marschall, Jens Becker,

Dossier VI – Barriereneigenschaften der Wirt- und Rahmengesteine

Andreas Gautschi, Martin Mazurek*, Gaudenz Deplazes, Daniel Traber, Paul Marschall, Thomas Gimmi*, Urs Mäder*

Dossier VII – Nutzungskonflikte

Andreas Gautschi, Werner Leu**, Jens Becker, Daniel Traber

Dossier VIII – Charakterisierbarkeit und Explorierbarkeit

Tim Vietor, Marian Hertrich, Gaudenz Deplazes

* Institut für Geologie der Universität Bern

** Geoform Ltd.

Der Bericht und dazu verwendete Referenzberichte (Nagra Arbeitsberichte, NAB) haben von zahlreichen Fachdiskussionen und Reviews durch eine Vielzahl von internen und externen Personen profitiert; diesen Personen sei an dieser Stelle für ihre Arbeit gedankt, ebenso Petra Blaser für die wissenschaftliche Redaktion des gesamten Berichts und Bruno Kunz für die Erstellung der zahlreichen Figuren und Beilagen.

Für die Erstellung der in diesem Bericht verwendeten Karten wurden, soweit nicht anders vermerkt, die folgenden digitalen Datensätze der swisstopo verwendet: GG25, DHM25, DTM-AV, swissALTI3D, Vector 25, Vector200, GeoKarte 1:500'000, Geologischer Atlas 1:25'000, GeoCover.

ISSN 1015-2636

Korrigierte PDF-Version, Januar 2015

“Copyright © 2014 by Nagra, Wettingen (Schweiz) / Alle Rechte vorbehalten.

Das Werk einschliesslich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung ausserhalb der engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne Zustimmung der Nagra unzulässig und strafbar. Das gilt insbesondere für Übersetzungen, Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen und Programmen, für Mikroverfilmungen, Vervielfältigungen usw.”

Inhaltsverzeichnis

| | |
|--|----|
| Inhaltsverzeichnis..... | I |
| 1 Einleitung | 1 |
| 1.1 Einleitung und Zielsetzung des Berichts | 1 |
| 1.2 Aufbau und Inhalt des Berichts | 2 |
| 1.3 Unvermeidbare, durch den Projektablauf bedingte Inkonsistenzen | 3 |
| Literaturverzeichnis | 5 |
| Zusammenfassungen | 7 |
| Dossier II: Sedimentologische und tektonische Verhältnisse | 7 |
| Dossier III: Geologische Langzeitentwicklung..... | 10 |
| Dossier IV: Geomechanische Unterlagen | 13 |
| Dossier V: Hydrogeologische Verhältnisse | 14 |
| Dossier VI: Barriereneigenschaften der Wirt- und Rahmengesteine | 16 |
| Dossier VII: Nutzungskonflikte | 19 |
| Dossier VIII: Charakterisierbarkeit und Explorierbarkeit..... | 22 |
| Résumés | 25 |
| Dossier II: Conditions sédimentologiques et tectoniques | 25 |
| Dossier III: Evolution géologique à long terme | 28 |
| Dossier IV: Documentation sur le comportement mécanique des roches..... | 31 |
| Dossier V: Conditions hydrogéologiques..... | 33 |
| Dossier VI: Propriétés de confinement des roches d'accueil et des roches encaissantes..... | 35 |
| Dossier VII: Conflits d'exploitation..... | 38 |
| Dossier VIII: Caractérisation et exploration | 41 |
| Abstracts | 45 |
| Dossier II: Sedimentological and tectonic conditions..... | 45 |
| Dossier III: Long-term geological evolution..... | 48 |
| Dossier IV: Geomechanical data..... | 50 |
| Dossier V: Hydrogeological conditions | 52 |
| Dossier VI: Barrier properties of the host rocks and confining units..... | 53 |
| Dossier VII: Conflicts of use..... | 56 |
| Dossier VIII: Ease of characterisation and explorability | 59 |

1 Einleitung

1.1 Einleitung und Zielsetzung des Berichts

Die Vorgaben für das Verfahren und die Kriterien für die Auswahl von Standorten für geologische Tiefenlager für alle Abfallkategorien in der Schweiz sind im Konzeptteil des Sachplans geologische Tiefenlager (Abkürzung SGT, BFE 2008) definiert. Das Verfahren sieht vor, in drei Etappen zur Wahl von Standorten für die Realisierung der benötigten geologischen Tiefenlager für die schwach- und mittelaktiven Abfälle (SMA) und die hochaktiven Abfälle (HAA)¹ zu kommen.

Im November 2008 hat die Nagra im Auftrag der Entsorgungspflichtigen für Etappe 1 sechs geologische Standortgebiete für das geologische Tiefenlager für SMA und drei geologische Standortgebiete für das geologische Tiefenlager für HAA vorgeschlagen (Nagra 2008a, b). Diese Vorschläge wurden aufgrund der Kriterien zur Sicherheit und technischen Machbarkeit sowie weiterer Vorgaben gemäss SGT erarbeitet. Für die geologischen Standortgebiete, die sowohl für das HAA-Lager wie auch für das SMA-Lager vorgeschlagen wurden, wurde festgehalten, dass dort beide Lagertypen angeordnet werden könnten unter Nutzung möglicher Synergien (z.B. gemeinsame Oberflächenanlage, evtl. teilweise gemeinsame untertägige Lagerteile, Erschliessung etc.); für eine solche Anlage wird der Begriff "Kombilager" verwendet. Mit dem Entscheid des Bundesrats vom 30. November 2011 wurden die von der Nagra vorgeschlagenen geologischen Standortgebiete in den Sachplan geologische Tiefenlager aufgenommen (BFE 2011).

Im SGT wurde festgelegt, dass im Standortwahlverfahren die Langzeitsicherheit des geologischen Tiefenlagers oberste Priorität hat. Dies gilt uneingeschränkt auch für die Erarbeitung der Vorschläge zur Einengung der Anzahl der geologischen Standortgebiete in Etappe 2. Ein geologisches Standortgebiet kann deshalb in Etappe 2 nur dann zurückgestellt werden, wenn es eindeutige sicherheitstechnische Nachteile im Vergleich mit den übrigen Standortgebieten aufweist. Der Sicherheit nachgeordnet sind Aspekte der Raumplanung, Ökologie, Wirtschaft und Gesellschaft. Im Hinblick auf die Einengung auf mindestens zwei geologische Standortgebiete pro Lagertyp sind gemäss SGT und Vorgaben des Eidgenössischen Nuklearsicherheitsinspektorats (ENSI) für jedes Standortgebiet eine provisorische Sicherheitsanalyse sowie ein sicherheitstechnischer Vergleich durchzuführen (ENSI 2013a). Basierend auf diesen Arbeiten ist eine vergleichende Gesamtbewertung vorzunehmen, anhand welcher die Nagra mindestens je zwei geologische Standortgebiete pro Lagertyp für die weitere Bearbeitung in Etappe 3 vorzuschlagen hat. Gemäss SGT sind dann für Etappe 3 diese vorgeschlagenen Standortgebiete vertieft zu untersuchen und die standortspezifischen geologischen Kenntnisse bei Bedarf mittels erdwissenschaftlicher Untersuchungen (Seismik, Bohrungen) auf einen Stand zu bringen, der für die beiden Lagertypen eine gut begründete Standortwahl zulässt. Basierend darauf werden die Rahmenbewilligungsgesuche erarbeitet und bei den Bundesbehörden zur Prüfung eingereicht.

¹ Für den Begriff "geologisches Tiefenlager" wird häufig der Kurzbegriff "Lager" verwendet, insbesondere die Begriffe "SMA-Lager" und "HAA-Lager".

Im Lager für die hochaktiven Abfälle werden die abgebrannten Brennelemente (kurz: BE), die verglasten hochaktiven Abfälle aus der Wiederaufarbeitung (kurz: HAA) und die langlebigen mittelaktiven Abfälle (kurz: LMA) eingelagert. Dabei werden alle SMA- und ATA-Abfälle (ATA: Alphatoxische Abfälle), die zusammen mit den BE/HAA ins HAA-Lager eingebracht werden, als LMA bezeichnet.

Im Rahmen der Vorbereitung für Etappe 2 war es gemäss SGT Aufgabe der Nagra, ausgehend von den diesbezüglichen Vorgaben des ENSI zu beurteilen, ob der geologische Kenntnisstand in den verschiedenen geologischen Standortgebieten ausreicht, um belastbare Aussagen für den sicherheitstechnischen Vergleich machen zu können. Zur diesbezüglichen Beurteilung der Nagra (Nagra 2010) wurde vom ENSI Stellung genommen. In ihrem Gutachten hat das ENSI als Ergänzung zur Beurteilung der Nagra 41 Forderungen für zusätzliche Untersuchungen in Etappe 2 formuliert (ENSI 2011). Auch die Eidgenössische Kommission für Nukleare Sicherheit (KNS), die Kommission für Nukleare Entsorgung (KNE) und die Arbeitsgruppe Sicherheit der Kantone/Kantonale Expertengruppe Sicherheit (AG SiKa/KES) hatten Empfehlungen und Hinweise zu Untersuchungen in Etappe 2 gegeben (KNS 2011, KNE 2011). In der Folge hat die Nagra einem Wunsch der KNS und der Kantone entsprochen und im Winter 2011/12 weitere 2D-seismische Messungen durchgeführt.

In sog. *Zwischenhalt-Fachsitzungen* wurden die zuständigen Behörden und Gremien über die vorhandenen Unterlagen und die Ergebnisse der geforderten Untersuchungen im Hinblick auf die in Etappe 2 anstehenden Entscheide informiert. Als Fazit der Fachsitzungen hat das ENSI Ende August 2014 (ENSI 2014) festgehalten, dass die Nagra die Themen der 41 ENSI-Forderungen aus dem Jahr 2011 vollständig und detailliert behandelt hat. Zusammen mit den weiteren Untersuchungen ist damit der geologische Kenntnisstand ausreichend, um darauf basierend die provisorischen Sicherheitsanalysen und den sicherheitstechnischen Vergleich in Etappe 2 durchzuführen und dann die Unterlagen einzureichen. Weiter hat das ENSI die Ende August begonnene *Grobprüfung* (gemäss ENSI 2013b) der sicherheitstechnischen Unterlagen für Etappe 2 anfangs Dezember 2014 abgeschlossen.

Der vorliegende Bericht liefert die geowissenschaftlichen Grundlagen für die im SGT und vom ENSI (2010) geforderten, in Nagra (2014b) dokumentierten Dosisrechnungen und stellt gleichzeitig auch eine massgebliche Grundlage für die Bewertung, den sicherheitstechnischen Vergleich und den schrittweisen Prozess der Einengung dar, welcher in Nagra (2014a) aufgezeigt ist.

1.2 Aufbau und Inhalt des Berichts

Der Bericht besteht aus einer Folge von eigenständigen, nach geowissenschaftlichen Disziplinen gegliederten Dossiers.

Das einleitende Dossier I beschreibt die Zielsetzung, den Aufbau und den Inhalt des Berichts und enthält die Zusammenfassungen aller folgenden Dossiers in deutscher, französischer und englischer Sprache.

Die Dossiers II bis VIII beginnen jeweils mit einer Einleitung, in welcher die Kriterien und Indikatoren des SGT aufgelistet sind, zu welchen das Dossier geowissenschaftliche Grundlagen für die Beurteilung und Bewertung bereitstellt. Die Bewertung der einzelnen Indikatoren selbst erfolgt im Rahmen des Berichts zum sicherheitstechnischen Vergleich (Nagra 2014a), in welchem auch die Schlussfolgerungen aus dem Einengungsprozess gezogen werden. In jedem Dossier sind am Schluss die massgebenden Referenzberichte und die verwendete Fachliteratur aufgelistet.

Die Reihenfolge der Dossiers beginnt mit dem sedimentologischen und tektonischen Aufbau (Dossier II) und der geologischen Langzeitentwicklung der Standortgebiete und ihrem regionalen Umfeld (Dossier III). In Dossier IV sind die Grundlagen für das Verständnis der geomechanischen Eigenschaften der Wirtgesteine dargelegt. Die standortspezifische, geotechnische Charakterisierung der über dem Wirtgestein liegenden Gesteinsabfolge, welche mit Zugangsbauwerken (Rampe, Schächte) von der Oberfläche bis zum Tiefenlager durchfahren werden muss, ist in separaten Arbeitsberichten der Nagra dokumentiert (Nagra 2014c und dort zitierte Berichte). In Dossier V sind die regionalen und lokalen hydrogeologischen Verhältnisse in der Nordschweiz und im Gebiet Wellenberg beschrieben; dort sind auch die Ergebnisse der durchgeführten hydrogeologischen Modellrechnungen sowie eine Beschreibung der hydrochemischen und isopenhydrogeologischen Verhältnisse zu finden. Dossier VI enthält eine qualitative und quantitative Charakterisierung der Wirt- und Rahmgesteine, welche zusammen den einschlusswirksamen Gebirgsbereich darstellen. In diesem Dossier ist auch die Herleitung der konzeptuellen Modelle für die Modellierung des Radionuklidtransports beschrieben. Damit ist das Dossier eine wichtige Grundlage, sowohl für die Dosisrechnungen (Nagra 2014b) wie auch für den sicherheitstechnischen Vergleich (Nagra 2014a). In Dossier VII ist das breite Spektrum von potenziellen Nutzungskonflikten bei der Realisierung eines geologischen Tiefenlagers dargelegt, welches vom Abbau natürlicher Rohstoffe (Kohlenwasserstoffe, Kohle, Salz, Steine und Erden, Erze), bis zu weiteren energiebezogenen Nutzungen (Geothermie, CO₂-Speicherung) reicht. Zudem werden für jedes Standortgebiet die potenziellen Nutzungskonflikte im Hinblick auf Mineral- und Thermalwassernutzungen evaluiert. Dossier VIII behandelt die Charakterisierbarkeit und Explorierbarkeit der Wirtgesteine im Allgemeinen und der standortspezifischen Situation im Speziellen.

1.3 Unvermeidbare, durch den Projektablauf bedingte Inkonsistenzen

Aufgrund des mehrjährigen Projektablaufs und der langen Dauer einzelner Arbeitsschritte sind nicht alle Teilprojekte auf den genau gleichen Grundlagen aufgebaut. So mussten beispielsweise die hydrogeologischen Modelle der Nordschweiz auf der Basis des Geologischen Modells 2008 entwickelt werden. Dafür wurde in einem ersten Schritt ausgehend von den in Nagra (2008b) dokumentierten Isohypsenkarten, Isopachenkarten und Störungsverläufen ein regionales geologisches 3D-Modell erarbeitet und darauf basierend die Netze des hydrogeologischen Modells berechnet. Die Erstellung der hydrogeologischen Modelle ist so aufwändig, dass später keine Anpassungen mehr an den neusten geologischen Modellen gemacht werden konnte, welche in Dossier II dokumentiert sind.

In der Berichterstattung wurde aus Transparenzgründen darauf geachtet, dass die verwendeten Versionen von Modellen immer angegeben und die entsprechenden Grundlagenberichte zitiert sind. Im Fall von Abweichungen von älteren und neueren Modellen werden auch mögliche Konsequenzen bezüglich der Schlussfolgerungen diskutiert. Generell wurde festgestellt, dass derartige Abweichungen immer sehr gering sind und keinen Einfluss auf die projektbezogenen Schlussfolgerungen haben.

Literaturverzeichnis

- BFE (2008): Sachplan geologische Tiefenlager. Konzeptteil. Bundesamt für Energie BFE, Bern.
- BFE (2011): Sachplan geologische Tiefenlager: Ergebnisbericht zu Etappe 1: Festlegungen und Objektblätter (30. November 2011). Bundesamt für Energie BFE, Abteilung Recht und Sicherheit. Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK, Bern.
- ENSI (2010a): Anforderungen an die provisorischen Sicherheitsanalysen und den sicherheitstechnischen Vergleich. Sachplan geologische Tiefenlager, Etappe 2. ENSI 33/075 (April 2010). Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat ENSI, Brugg, Schweiz.
- ENSI (2010b): Sicherheitstechnisches Gutachten zum Vorschlag geologischer Standortgebiete. Sachplan geologische Tiefenlager, Etappe 1. ENSI 33/070 (Januar 2010). Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat ENSI, Brugg, Schweiz.
- ENSI (2011): Stellungnahme zu NTB 10-01 "Beurteilung der geologischen Unterlagen für die provisorischen Sicherheitsanalysen in SGT Etappe 2". ENSI 33/115 (März 2011). Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat ENSI, Brugg, Schweiz.
- ENSI (2013a): Präzisierungen zur sicherheitstechnischen Methodik für die Auswahl von mindestens zwei Standortgebieten je für HAA und SMA in Etappe 2 SGT. ENSI 33/154 (Januar 2013). Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat ENSI, Brugg, Schweiz.
- ENSI (2013b): Ablauf der Überprüfung des geologischen Kenntnisstands vor Einreichen der sicherheitstechnischen Unterlagen für Etappe 2 SGT. ENSI 33/155 (Januar 2013). Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat ENSI, Brugg, Schweiz.
- ENSI (2014): Abschluss der Zwischenhalt-Fachsitzungen und Feststellung des Kenntnisstands zu den 41 ENSI-Forderungen aus ENSI 33/115. Brief des ENSI vom 22. August 2014 an das BFE. Zum Beschluss siehe Medienmitteilung vom 28.08.2014: <http://www.bfe.admin.ch/energie/00588/00589/00644/index.html?lang=de&msg-id=54232>
- KNE (2011): Sachplan geologische Tiefenlager (SGT): Stellungnahme der KNE zur Klärung der Notwendigkeit ergänzender Untersuchungen für die provisorischen Sicherheitsanalysen in Etappe 2 SGT. Kommission Nukleare Entsorgung KNE, Schweiz.
- KNS (2011): Sachplan geologische Tiefenlager Etappe 2: Stellungnahme zur Notwendigkeit ergänzender geologischer Untersuchungen in Etappe 2. KNS 23/247. Eidgenössische Kommission für Nukleare Sicherheit, KNS, Brugg.
- Nagra (2008a): Vorschlag geologischer Standortgebiete für das SMA- und das HAA-Lager. Darlegung der Anforderungen, des Vorgehens und der Ergebnisse (Hauptbericht). Nagra Tech. Ber. NTB 08-03.
- Nagra (2008b): Vorschlag geologischer Standortgebiete für das SMA- und das HAA-Lager. Geologische Grundlagen. Nagra Tech. Ber. NTB 08-04.
- Nagra (2010): Beurteilung der geologischen Unterlagen für die provisorischen Sicherheitsanalysen in SGT Etappe 2. Klärung der Notwendigkeit ergänzender geologischer Untersuchungen. Nagra Tech. Ber. NTB 10-01.

Nagra (2014a): SGT Etappe 2: Vorschlag weiter zu untersuchender geologischer Standortgebiete mit zugehörigen Standortarealen für die Oberflächenanlage. Sicherheitstechnischer Bericht zu SGT Etappe 2. Sicherheitstechnischer Vergleich und Vorschlag der in Etappe 3 weiter zu untersuchenden geologischen Standortgebiete. Nagra Tech. Ber. NTB 14-01.

Nagra (2014b): SGT Etappe 2: Vorschlag weiter zu untersuchender geologischer Standortgebiete mit zugehörigen Standortarealen für die Oberflächenanlage. Charakteristische Dosisintervalle und Unterlagen zur Bewertung der Barrierensysteme. Nagra Tech. Ber. NTB 14-03.

Nagra (2014c): Bautechnische Risikoanalyse zur Realisierung der Zugangsbauwerke. Nagra Arbeitsber. NAB 14-50.

Zusammenfassungen

Dossier II: Sedimentologische und tektonische Verhältnisse

Dossier II ist den sedimentologischen und tektonischen Verhältnissen in den geologischen Standortgebieten und deren Umfeld gewidmet. Es beinhaltet die Beschreibung und Illustration der stratigraphischen und sedimentologischen Charakteristika der Wirt- und Rahmengesteine sowie der strukturgeologischen und tektonischen Situation in den geologischen Standortgebieten. Ausserdem werden in diesem Dossier Tiefen- und Mächtigkeitkarten für die Wirtgesteine in den geologischen Standortgebieten präsentiert.

Die Informationen über die sedimentologischen und tektonischen Verhältnisse in den geologischen Standortgebieten fliessen in mehrerer Hinsicht in den sicherheitstechnischen Vergleich ein. Die stratigraphischen und sedimentologischen Merkmale der Wirt- und Rahmengesteine sind für deren Beurteilung hinsichtlich Mächtigkeit, Barriereneigenschaften, Charakterisierbarkeit und zum Teil auch Explorierbarkeit massgebend. Letztere werden auf Basis der hier beschriebenen Grundlagen in den Dossiers VI und VIII diskutiert. Aus den strukturgeologischen und tektonischen Verhältnissen im Bereich der Standortgebiete werden regionale tektonischen Elemente definiert, die bei der Abgrenzung von geologischen Standortgebieten und darin gelegenen Lagerperimeter von grosser Bedeutung sind, und Auswirkungen auf das Platzangebot für das Lager untertag haben. Darüber hinaus fliessen strukturgeologische und tektonische Charakteristika, insbesondere das tektonische Regime in den Standortgebieten, in die Beurteilung verschiedener Aspekte der geologischer Langzeitentwicklung und der geomechanischen Eigenschaften mit ein. Diese Aspekte werden in den Dossiers III bzw. IV diskutiert. Die Tiefenlage der Wirtgesteine in den Standortgebieten bildet eine wesentliche Grundlage für die Abgrenzung der im Rahmen des sicherheitstechnischen Vergleichs zu bewertenden Lagerperimeter. Hinsichtlich der optimalen Tiefenlage werden dabei Aspekte zur Langzeitentwicklung und Geomechanik bzw. Bautechnik berücksichtigt, die in den Dossiers III und IV (und dort zitierten Berichten) eingehender diskutiert werden.

Die Datengrundlage zur Charakterisierung der sedimentologischen und tektonischen Verhältnisse in den geologischen Standortgebieten wurde im Rahmen des Sachplans geologische Tiefenlager (SGT) Etappe 2 wesentlich verbessert. Zum einen wurde die Bohrdatenbasis wesentlich vergrössert. Erwähnenswert sind hier insbesondere zahlreiche neu hinzugekommene, zwar zumeist nur untiefe aber geophysikalisch geloggte Bohrungen Dritter, die wichtige Informationen zur besseren stratigraphisch-sedimentologischen Charakterisierung der Wirt- und Rahmengesteine liefern. Der regionale 2D-Seismikdatensatz in der Nordschweiz stellt einen weiteren wesentlichen Informationseckpfeiler dar. Der bereits in SGT Etappe 1 zur Verfügung stehende Datensatz wurde im Rahmen der SGT Etappe 2 vollständig reprozessiert und so hinsichtlich seiner Interpretierbarkeit verbessert. Darüber hinaus wurde dieser Datensatz im Zuge der 2D-Seismikkampagne 2011/12 durch 20 neue Seismikprofile von hoher Abbildungsqualität verdichtet. Mit der so hergestellten, vergleichbaren Datendichte in allen geologischen Standortgebieten in der Nordschweiz konnte insbesondere eine Verifikation und Präzisierung von regionalen tektonischen Elemente erfolgen, sowie die Grundlage für eine lokale Überarbeitung der Schichtmodelle in den Standortgebieten gelegt werden.

Die Wirtgesteine in der Nordschweiz sind der Opalinuston, die Tongesteinsabfolge 'Brauner Dogger' und die Effinger Schichten. Diese bilden mit ihren Rahmengesteinen im Liegenden und Hangenden den potenziell einschlusswirksamen Gebirgsbereich, welcher im Folgenden vom stratigraphisch Liegenden zum Hangenden kurz charakterisiert wird.

Die unteren Rahmengesteine des Wirtgesteins Opalinustons bestehen v.a. aus tonig-mergeligen und sulfatreichen Sedimenten des Keupers und Lias (Staffelegg-Formation). Innerhalb dieser Sedimente treten kalkige, dolomitische und sandige, mehrere Meter mächtige Einheiten auf, welche in Aufschlüssen verwitterungsresistentere 'harte Bänke' bilden können (Arietenkalk, Gansinger Dolomit, Stuben- und Schilfsandstein-Formation). Im Standortgebiet Jura-Südfuss tritt ausserdem direkt unterhalb des Opalinustons eine bis über 10 mächtige Abfolge aus sandigen Kalksteinen und kalkigen Sandsteinen auf.

Der Opalinuston besteht v.a. aus teilweise stark sandigen Tonsteinen und bildet im Vergleich zu anderen mesozoischen Formationen der Nordschweiz ein homogenes, mächtiges Schichtpaket. Im Standortgebiet Jura-Südfuss gibt es konkrete Hinweise, dass der Opalinuston im Vergleich zu den anderen Standortgebieten etwas geringmächtiger ist.

In den Standortgebieten Südranden, Zürich Nordost und Nördlich Lägern wird der Opalinuston von der Tongesteinsabfolge 'Brauner Dogger' überlagert. Letztere ist ein potenzielles Wirtgestein in den Standortgebieten Zürich Nordost und Nördlich Lägern. Diese Abfolge ist hauptsächlich tonig ausgebildet, sie enthält aber einzelne oder in Abfolgen auftretende 'harte Bänke'. Diese können aus mikritischen, sandigen oder biodetritischen Kalksteinen und Eisenoolithen bestehen, welche hier unter dem Begriff Sandkalkabfolgen zusammengefasst werden. Einige dieser tonärmeren Abfolgen sind lateral nur unzureichend korrelierbar. Das tonreichste, homogenste Gesteinspaket innerhalb des 'Braunen Doggers' findet sich im oberen Teil der Abfolge und besteht aus den Parkinsoni-Württembergica-Schichten und der Variansmergel-Formation. Im Standortgebiet Nördlich Lägern gibt es Hinweise, dass im westlichen und östlichen Teil des Gebiets neben der in der Bohrung Weiach erbohrten Tongesteinsabfolge mächtigere, tonärmere Gesteinskörper auftreten könnten. In den Standortgebieten Jura Ost und Jura-Südfuss ist die Tongesteinsabfolge des 'Brauner Dogger' nicht ausgebildet und über dem Opalinuston stellen die Passwang-Formation und die mergeligen Unteren Acuminata-Schichten seine oberen Rahmengesteine dar. Die Passwang-Formation besteht aus mehreren Abfolgen von Tonsteinen, sandigen und/oder bioklastischen Mergeln, Kalken und Eisenoolithen. Sie weist deutliche laterale und vertikale Faziesvariationen auf und ist im Vergleich zum 'Braunen Dogger' generell weniger tonig ausgebildet.

Die Effinger Schichten folgen in den Standortgebieten Südranden, Zürich Nordost und Nördlich Lägern über dem 'Braunen Dogger' und zählen hier zu den Rahmengesteinen. Im Standortgebiet Jura-Südfuss stellen die Effinger Schichten ein potenzielles Wirtgestein dar. Die Effinger Schichten lassen sich in Kalkmergel- und bis > 10 m mächtige Kalkbankabfolgen unterteilen. Die Korrelation dieser Abfolgen zwischen Bohrungen ist teilweise gut möglich.

Das Wirtgestein im Standortgebiet Wellenberg (Palfris-Formation, Vitznau-Mergel und tertiäre Mergel-Formationen) besteht zu grossen Teilen aus Mergeln, welche aufgrund einer speziellen tektonischen Konstellation zu einer aussergewöhnlich grossen Akkumulation verschuppt und verfaltet worden sind. Einschaltungen von Kalkbankabfolgen sind schwer korrelierbar, Kalkschuppen mit erheblichen Ausmassen können als Fremdgesteinseinschlüsse auftreten.

Die Erläuterung der strukturgeologischen und tektonischen Verhältnisse im Bereich der geologischen Standortgebiete konzentriert sich im vorliegenden Dossier auf jene Aspekte mit spezifischer Bedeutung für den sicherheitstechnischen Vergleich der geologischen Standortgebiete in SGT Etappe 2. Dabei handelt es sich um die Charakterisierung der tektonischen Regimes in den Standortgebieten, um die Ausweisung und Abgrenzung von regionalen tektonischen Elementen und die lokalen strukturgeologisch-tektonischen Verhältnisse in den geologischen Standortgebieten.

Der Begriff des tektonischen Regimes bezieht sich im Sinne von SGT Etappe 1 auf eine Zone mit einer für sie charakteristischen geologisch-tektonischen Lage und Entstehungsgeschichte. Für Bereiche innerhalb eines tektonischen Regimes kann mit ähnlichen struktureologischen Eigenschaften und tektonischer Überprägung gerechnet werden. Die für die fünf Standortgebiete in der Nordschweiz durchgeführte Differenzierung von tektonischen Regimes aus SGT Etappe 1 wurde durch die intensiven Untersuchungen in SGT Etappe 2 bestätigt. Das Standortgebiet Südranden sowie der zentrale und nördliche Abschnitt des Standortgebiets Zürich Nordost liegen im östlichen Tafeljura bzw. im nordöstlichen Schweizer Molassebecken und damit nördlich des seismisch kartierbaren Einflussbereichs der mit dem alpinen Fernschub assoziierten Kompressionstektonik. Diese Region wurde tektonisch vergleichsweise wenig beansprucht. Der südliche Teil des geologischen Standortgebiets Zürich Nordost sowie die geologischen Standortgebiete Nördlich Lägern und Jura Ost liegen im Bereich der Vorfaltenzone, das geologische Standortgebiet Jura-Südfuss liegt im Bereich der Subjurassischen Zone. Während erstere Zone nur eine milde Überprägung durch die mit dem alpinen Fernschub verbundene Tektonik aufweist, ist letztere Zone vergleichsweise stärker beansprucht. Das Standortgebiet Wellenberg, welches im Gegensatz zu den übrigen Standortgebieten innerhalb der Zentralalpen an der Grenze zwischen Drusberg- und Axen-Decke liegt, wurde vergleichsweise viel stärker tektonisch beansprucht als die Standortgebiete in der Nordschweiz.

Regionale tektonische Elemente können konkret nur für die Standortgebiete in der Nordschweiz zur Abgrenzung von Lagerperimetern ausgewiesen werden. Der Verlauf der zum Grossteil bereits im Rahmen von SGT Etappe 1 definierten regionalen Störungszonen wurde durch die Auswertung des hinsichtlich seiner Interpretierbarkeit verbesserten und verdichteten 2D-Seismikdatensatzes verifiziert und präzisiert. Zusätzlich werden in SGT Etappe 2 neu "zu meidende tektonische Zonen" ausgewiesen, die sich am Verlauf von post-paläozoisch reaktivierten Grundgebirgsstörungen und Antiklinalen im Bereich des Deckgebirges orientieren.

Die lokalen struktureologisch-tektonischen Verhältnisse in den geologischen Standortgebieten unterscheiden sich im Detail beträchtlich. Im Standortgebiet Südranden haben die Untersuchungen in SGT Etappe 2 bestätigt, dass das Deckgebirge tektonisch vergleichsweise wenig gestört ist. Dies gilt auch für das Standortgebiet Zürich Nordost. Bei der Optimierung des Lagerperimeters im sicherheitstechnischen Vergleich wurde der südliche Teil dieses Standortgebiets, welcher oberhalb der nördlichen, post-paläozoisch reaktivierten Randzone des Nordschweizer Permokarbons liegt und gemäss 3D-Seismik-Auswertung struktureologisch ungünstigere Eigenschaften zeigt, als zu meidende tektonische Zone ausgewiesen. Für das Standortgebiet Nördlich Lägern ergab sich aus den in SGT Etappe 2 durchgeführten Erkundungsmassnahmen vor allem im westlichen Teil des Gebiets ein stärkerer Einfluss von regionalen Störungszonen. Der nördliche Teil des Standortgebiets liegt oberhalb der post-paläozoisch reaktivierten Randzone des Permokarbons und wird deshalb analog zum Vorgehen im Standortgebiet Zürich Nordost als zu meidende tektonische Zone ausgewiesen. Das Standortgebiet Jura Ost wird nur in seinen äussersten Randbereichen von regionalen tektonischen Elementen berührt und erscheint gemäss aktueller Auswertung der seismischen Profile nur wenig gestört. Im Gegensatz dazu ist im Standortgebiet Jura-Südfuss der Einfluss regionaler Störungszonen deutlich stärker erkennbar als bisher. Ausserdem zeichnet sich hier auch eine im Vergleich stärkere kleinräumige tektonische Überprägung des sedimentären Schichtstapels ab. Im Standortgebiet Wellenberg zeigen Kernbohrungen eine im Vergleich zu den Standortgebieten in der Nordschweiz höhere Dichte an kleinräumigen Störungen auf. Diese können aufgrund der schwierigen Explorierbarkeit dieses Gebiets mit Reflexionsseismik nicht systematisch erfasst werden.

Zur Charakterisierung der geologischen Verhältnisse wurden die Schichtmodelle für die Standortgebiete in der Nordschweiz gegenüber SGT Etappe 1 unter Berücksichtigung aller vorhandener Daten aktualisiert. Für das Standortgebiet Wellenberg wurde ein aktualisiertes geologisches

3D-Modell erstellt. In den geologischen Standortgebieten in der Nordschweiz ergibt sich im Vergleich zu SGT Etappe 1 auch unter Berücksichtigung der methodologischen Ungewissheiten vereinzelt eine signifikante Änderung der Tiefenlage der relevanten geologischen Horizonte. Die Basis des Opalinustons, welche als regionaler Bezugshorizont betrachtet wird, liegt im Standortgebiet Südranden deutlich weniger tief, im Standortgebiet Nördlich Lägern, vor allem im Westen, tiefer als bisher angenommen. Zusätzlich wurden aus den Tiefenkarten Mächtigkeitskarten für die Wirtgesteine generiert. Diese beruhen mehrheitlich auf seismischen Daten und sind im Vergleich zu entsprechenden Informationen aus Bohrungen mit grösseren Ungewissheiten behaftet. Unter Berücksichtigung derselben bestätigen sie die sich aus diesen Bohrungen ergebenden Hinweise auf die regionale Bandbreite der stratigraphischen Mächtigkeit der potenziellen Wirtgesteine.

Dossier III: Geologische Langzeitentwicklung

Im Dossier III werden die geologischen Standortgebiete im Hinblick auf neotektonische Bewegungen und Erosion in den nächsten 10^5 Jahren (Betrachtungszeitraum für das SMA-Lager) bis 10^6 Jahren (Betrachtungszeitraum für das HAA-Lager) charakterisiert. Für den sicherheitstechnischen Vergleich liefert das vorliegende Dossier die Grundlagen für die Indikatoren 'Modellvorstellungen zur Langzeitentwicklung (Geodynamik und Neotektonik; weitere Prozesse)', 'Seismizität', 'Erosion im Betrachtungszeitraum', 'Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf Gesteins-Dekompaktion', 'Tiefenlage unter Fels im Hinblick auf glaziale Tiefenerosion' und 'Tiefenlage unter lokaler Erosionsbasis im Hinblick auf die Bildung neuer Rinnen'.

Im Hinblick auf die geologische Langzeitentwicklung wurden in SGT Etappe 2 in erster Linie Literaturstudien und Kompilationsarbeiten durchgeführt. Wichtige Datensätze für die Beurteilung der Neotektonik und Erosion stellen das hochauflösende Modell der Terrainoberfläche, das im Rahmen von SGT Etappe 2 überarbeitete Modell der Felsoberfläche sowie ein neu kompilierter Datensatz zur Verteilung und Höhenlage von Schotterablagerungen dar. Im Hinblick auf die Detektion von rezenten Krustenbewegungen wurden zudem geodätische Analysen durchgeführt und die aktuellen Daten zur Seismizität und zum Spannungszustand zusammengetragen und analysiert. In SGT Etappe 2 wurde der Kenntnisstand zur Lage von tektonischen Strukturen im Grund- und Deckgebirge und zur Tiefenlage der betrachteten potenziellen Wirtgesteine in der Nordschweiz anhand des reprozessierten und verdichteten 2D-Seismikdatensatzes verbessert (vgl. Dossier II). Diese Informationen sind zur Identifikation von im Hinblick auf Neotektonik zu meidende regionale tektonische Elemente und für die Beurteilung der Tiefenlage des Wirtgesteins im Hinblick auf zukünftige Erosion von zentraler Bedeutung.

Für das Gebiet der Nordschweiz zeichnet sich gemäss Literaturstudien und detaillierten Analysen von Schotterterrassen mit Hilfe von hochauflösenden Geländemodellen seit dem späten Pliozän nur eine sehr geringe neotektonische Aktivität ab. Die sehr langsamen Bewegungsraten erschweren die Identifikation von Spuren allfälliger neotektonischer Aktivität. Ein Ausschluss von neotektonischen Bewegungen entlang bekannter regionaler tektonischer Elemente ist in den allermeisten Fällen aktuell nicht möglich. Aus den Präzisionsnivelementdaten ergeben sich vereinzelt Hinweise auf mögliche neotektonische Aktivität, so zum Beispiel im Bereich des Faltenjuras. Die Informationen zum rezenten Spannungsfeld in der Region implizieren, dass diverse präexistente Störungszonen in Zukunft potenziell reaktiviert werden können, bevorzugt als Blattverschiebungen oder Abschiebungen. Ob die Deformation im Bereich der Nordschweiz, wie im frühen Miozän bis späten Pliozän, schwergewichtig im Deckgebirge abläuft oder auch das Grundgebirge betrifft und z.B. eine Reaktivierung der Ränder des Nordschweizer Permo-karbons mit sich bringen könnte, kann derzeit nicht abschliessend geklärt werden. Aufgrund von Erkenntnissen aus benachbarten Gebieten (z.B. Oberrheingraben) müssen in Anbetracht der verbleibenden Ungewissheiten beide Szenarien berücksichtigt werden. Nicht zuletzt aufgrund

dieser Ungewissheiten sollen existierende regionale Störungszonen und weitere Elemente, an welchen sich zukünftige Deformationen präferenziell abspielen werden, gemieden werden. Deshalb werden in SGT Etappe 2 in der Nordschweiz zusätzlich zu regionalen Störungszonen im Deckgebirge neu auch post-paläozoisch reaktivierte Ränder des Nordschweizer Permokarbons und Antiklinalstrukturen als 'zu meidende tektonische Zonen' ausgewiesen und bei der Abgrenzung der im sicherheitstechnischen Vergleich zu bewertenden Lagerperimeter berücksichtigt.

Das geologische Standortgebiet Wellenberg wird im Hinblick auf die Modellvorstellungen zur Neotektonik gegenüber den Standortgebieten in der Nordschweiz generell als ungünstiger angesehen. Es weist aufgrund seiner tektonischen Lage zwischen zwei alpinen Decken eine ungleich höhere tektonische Überprägung als die Nordschweizer Standortgebiete auf. Die in dieser Region deutlich höheren rezenten Hebungsraten sowie die erhöhte Erdbebenaktivität v.a. im untiefen Krustenbereich (< 5 – 15 km) wird als Ausdruck einer vergleichsweise höheren neotektonischen Aktivität angesehen. Im Unterschied zur Nordschweiz ist im Gebiet Wellenberg aufgrund der hohen tektonischen Komplexität zudem eine systematische Kartierung und Meidung von existierenden grösseren Störungszonen, an welchen zukünftige Deformationen mit hoher Wahrscheinlichkeit präferenziell stattfinden werden, mit reflexionsseismischen Methoden nicht möglich.

Bei der Beurteilung der geologischen Standortgebiete im Hinblick auf zukünftige Erosion spielen neben endogenen Prozessen (z.B. tektonische Hebung) vor allem exogene Prozesse eine wichtige Rolle. Letztere werden primär durch die klimatischen Verhältnisse beeinflusst. Bei der Beurteilung der zukünftigen Erosion wird ein breites Spektrum von Klimaentwicklungen betrachtet, wobei ein Fortbestehen von glazial-interglazialen Zyklen mit wiederholten Gletschervorstössen bis ins externe Alpenvorland als am wahrscheinlichsten betrachtet wird. Als wichtigste Basis für die Ableitung von Erosionsszenarien wird deshalb die Landschaftsentwicklung der letzten ca. 2 Millionen Jahre betrachtet, welche klimatisch bereits unter Einfluss einer Abfolge von Kalt- und Warmzeiten stand, anfänglich im Zyklus von 40'000 Jahren, später von 100'000 Jahren. Klimamodellierungen für die nächsten 10^5 Jahre deuten darauf hin, dass eine nächste grössere Eiszeit mit Gletschervorstössen bis ins externe Alpenvorland frühestens in 60'000 Jahren zu erwarten ist oder, je nach Annahme zum anthropogenen CO₂-Ausstoss, auch deutlich später.

Für die Langzeitstabilität eines geologischen Tiefenlagers gegenüber zukünftiger Erosion ist die Tiefenlage des Wirtgesteins im betrachteten Standortgebiet bzw. dem darin gelegenen Lagerperimeter von zentraler Bedeutung. Im Allgemeinen steigt mit grösserer Überdeckung der Schutz eines Tiefenlagers vor erosionsbedingten Dekompaktionseffekten oder einer Freilegung. In SGT Etappe 1 wurde die Überlagerung des Wirtgesteins bezüglich der Terrainoberfläche und bezüglich der Felsoberfläche analysiert und für die Abgrenzung und Bewertung von bevorzugten Bereichen verwendet. Dieser vereinfachte Ansatz ging davon aus, dass die Erosion im Wesentlichen flächenhaft ist, die lokale Topographie in ihren grossen Zügen erhalten bleibt und dass darüber hinaus die glaziale Tiefenerosion auf den Bereich der existierenden übertiefen Felsrinnen fokussiert und diese akzentuiert. In SGT Etappe 2 wird bei der Abgrenzung von im sicherheitstechnischen Vergleich zu bewertenden Lagerperimetern zusätzlich berücksichtigt, dass zwischen Haupttälern gelegene Gebiete unter Umständen rascher erodiert werden als die Haupttäler selbst. So können als Folge von Vergletscherungen bestehende Täler nachweislich in relativ kurzer Zeit verschlossen und/oder aufgeschottert werden. Dadurch können neue Felsrinnen, sogenannte Durchbruchrinnen, entstehen. Um deren zukünftige Bildung zu berücksichtigen, wird die Tiefenlage des betrachteten Wirtgesteins in SGT Etappe 2 nicht nur relativ zur Terrain- und zur Felsoberfläche, sondern neu auch relativ zur lokalen Erosionsbasis (defi-

niert durch das Niveau der tiefsten fluviatilen Paläorinnen) berechnet und bei der Abgrenzung und Bewertung von Lagerperimetern im sicherheitstechnischen Vergleich berücksichtigt.

Im Bereich der drei HAA-Gebiete wurde die Entwicklung der lokalen Erosionsbasis (Eintiefungsgeschichte der Hauptflüsse) über die letzten 2 Millionen Jahre anhand von Schotterablagerungen rekonstruiert. Als Ursache für die vergangene Eintiefung werden sowohl endogene (Hebung) als auch exogene Prozesse (z.B. erhöhter Abfluss aufgrund Änderungen des Klimas oder des Einzugsgebiets) in Betracht gezogen und diskutiert. Die dramatischsten und schnellsten Absenkungen der lokalen Erosionsbasis in den letzten 5 – 10 Millionen Jahren fanden in der Nordschweiz durch die Verschiebung von regionalen Wasserscheiden statt, insbesondere in Zusammenhang mit der Umlenkung der Aare-Donau ins Doubs-Rhone- und schliesslich ins Rhein-System. Eine grossräumige Analyse des Hauptentwässerungsnetzes der Nordschweiz zeigt, dass das Einzugsgebiet des Aare-Rhein-Systems gegenüber demjenigen des Donau-Systems aufgrund seiner tieferen Lage in Zukunft weiter wachsen wird und das Potenzial für eine Absenkung der lokalen Erosionsbasis durch die Verschiebung der regionalen Wasserscheiden in der Nordschweiz über die nächsten 10^5 – 10^6 Jahren beschränkt ist. Basierend auf den Überlegungen zur vergangenen Flussnetzentwicklung und zum heutigen Flussnetz werden verschiedene Szenarien für die zukünftige Entwicklung der lokalen Erosionsbasis entworfen, welche sich zwischen den Lagertypen bzw. Betrachtungszeiträumen und zum Teil auch zwischen den Standortgebieten unterscheiden.

Die glaziale Tiefenerosion ist ein Prozess, der auch signifikant unter die lokale Erosionsbasis greifen kann, wie verschiedene übertiefte Felsrinnen in der Nordschweiz bezeugen. Sie kommen in erster Linie im Molassesubstrat vor. Glaziale Übertiefungen in die Malmkalke existieren nur sehr vereinzelt und haben eine vergleichsweise geringe Tiefe. Um für ein geologisches Tiefenlager kritisch zu werden, muss sich eine glazial übertiefte Felsrinne nicht bloss durch das Molassesubstrat, sondern je nach Standortgebiet durch bis mehr als 200 m mächtige Kalksteine einschneiden. Glaziale Tiefenerosion findet präferenziell dort statt, wo die Eismächtigkeit und die Fliessgeschwindigkeit hoch sind, d.h. im Bereich existierender Täler und Übertiefungen. Insbesondere in flachem Gelände und über längere Zeiträume mit mehreren Eisvorstössen muss aber auch mit der Anlage von neuen übertiefen Felsrinnen gerechnet werden. Im Hinblick auf die glaziale Tiefenerosion wird deshalb neben der Vertiefung und Verbreiterung von bestehenden Felsrinnen in SGT Etappe 2 auch die Bildung von komplett neuen Rinnen geprüft, welche unter die im Verlauf des Betrachtungszeitraums abgesenkte lokale Erosionsbasis greifen.

Die Standortgebiete in der Nordschweiz und die darin gelegenen Lagerperimeter sind von den betrachteten Erosionsszenarien je nach Lagertyp und standortspezifischer Tiefenlage des Wirtgesteins unterschiedlich stark betroffen. In den SMA-Standortgebieten Zürich Nordost, Nördlich Lägern, Jura Ost und Jura-Südfuss lassen sich die Lagerperimeter bezüglich der Tiefenlage so abgrenzen, dass die Überlagerung des Wirtgesteins auch bei Anwendung von extremen Erosionsszenarien am Ende des Betrachtungszeitraums noch gross ist. Im SMA-Standortgebiet Südranden ist die Überlagerung bezüglich der lokalen Erosionsbasis vergleichsweise gering. In der Umgebung wurden in der Vergangenheit ausserdem mehrfach Durchbruchsrinnen eingeschnitten. Eine verfüllte Rinne befindet sich innerhalb des Standortgebiets. Deshalb wird hier auch für den Betrachtungszeitraum eines SMA-Lagers die Entstehung einer neuen Rinne in Betracht gezogen. In den HAA-Standortgebieten Zürich Nordost und Nördlich Lägern verbleibt auch nach Anwendung von extremen Erosionsszenarien über den deutlich längeren Betrachtungszeitraum (10^6 Jahre) noch eine erhebliche Überdeckung. Im HAA-Standortgebiet Jura Ost wird wegen des im Gegensatz zum SMA-Lager viel längeren Betrachtungszeitraums die Möglichkeit der Bildung einer Durchbruchrinne als extremes Erosionsszenario berücksichtigt. Die bei einem solchen Szenario am Ende des Betrachtungszeitraums verbleibende Überdeckung ist in diesem Standortgebiet vergleichsweise deutlich geringer.

Für das Standortgebiet Wellenberg wurden im Rahmen von SGT Etappe 2 ergänzend zu den Szenarien aus früheren Untersuchungen drei neue glaziale Erosionsszenarien erstellt (zusätzliche glaziale Übertiefung um 50, 100 und 200 m). Dabei wird davon ausgegangen, dass nach einer glazialen Vertiefung des Engelbergertals die tiefgründige, über dem Lagerbereich gelegene Rutschung von Altzellen auf einem tieferen Niveau reaktiviert wird und die oberen Hangbereiche solange nachrutschen, bis sich die heutige Gleichgewichtsneigung der Hänge wieder auf das neue Niveau des aufgeschotterten Engelbergertals einstellt. Da das Wirtgestein am Wellenberg in Form einer mächtigen tektonischen Akkumulation vorliegt, lässt sich die Tiefe der Lagerebene relativ frei wählen. Den im Vergleich zu früheren Untersuchungsphasen erhöhten Anforderungen an die Erosion und Dekompaktion (vgl. Dossier VI) kann deshalb mit der Wahl von tieferen Lagerebenen begegnet werden.

Dossier IV: Geomechanische Unterlagen

Das Dossier IV 'Geomechanische Unterlagen' gibt eine Übersicht über die vorhandenen empirischen und experimentellen Befunde zum Verformungsverhalten der vorgeschlagenen Wirtgesteine und über die erwarteten geomechanischen Verhältnisse in den potenziellen Standortgebieten. Aus der verfügbaren geomechanischen Datenbasis werden allgemeine Materialgesetze abgeleitet, die eine Grundlage für bau- und sicherheitstechnische Modellanalysen im Rahmen des sicherheitstechnischen Vergleichs der Standortgebiete bilden. Die geomechanischen Unterlagen umfassen:

- *Die Beschreibung der Spannungsverhältnisse im regionalen und lokalen Massstab*
Zu diesem Zweck wurden die bestehenden Datengrundlagen durch Feldaufnahmen des Paläo-Spannungsfelds, (Neu-)Auswertungen von Bohrlochrandausbrüchen sowie Hydrofrac-Messungen in neueren Bohrungen ergänzt. Es wurden aktualisierte Spannungskarten der Nordschweiz und der angrenzenden Gebiete erstellt. Mit numerischen Modellen wurden die lokalen Spannungsverhältnisse in ausgewählten Situationen für ein breites Spektrum von tektonischen Randbedingungen untersucht. Von besonderer Bedeutung für geomechanische Anwendungen waren hierbei die Abschätzungen der auf Lagerniveau erwarteten Magnituden der Hauptspannungskomponenten inklusive der dazugehörigen Ungewissheiten.
- *Die Charakterisierung der geomechanischen Eigenschaften der Wirtgesteine (Steifigkeit, Festigkeit, Konsolidierungs- und Quellverhalten).*
Neue Laboruntersuchungen wurden vor allem an Kernproben aus dem Opalinuston durchgeführt, der einerseits wegen seiner geringen Zugfestigkeit und seiner moderaten Quellfähigkeit als bautechnisch anspruchsvoll gilt, andererseits jedoch durch sein Selbstabdichtungsvermögen eine ausgezeichnete Transportbarriere für Radionuklide darstellt. Mithilfe der ergänzten geomechanischen Datenbasis wurden für den Opalinuston erweiterte Materialgesetze und die dazugehörigen Parametersätze hergeleitet, welche die Übertragbarkeit des Verformungsverhaltens des Gesteins auf die unterschiedlichen geologischen Situationen in den vorgeschlagenen Standortgebieten sicherstellen. Für die anderen Wirtgesteine wurden die geomechanischen Wirtgesteinseigenschaften tabellarisch kompiliert.
- *Die Beschreibung der struktureologischen Verhältnisse in den Standortgebieten als Grundlage für eine standortbezogene Einordnung des Wirtgesteins bezüglich der vorherrschenden tektonischen Überprägung ("Gebirgsmodelle").*

Strukturanalysen der in Etappe 2 im regionalen Massstab kartierten Geländeaufschlüsse und Strukturaufnahmen an Kernproben aus Tiefbohrungen sowie die struktureologische Inter-

pretation der neuen 2-D Seismik lieferten die Datenbasis für ein standortbezogenes Inventar des Trennflächengefüges. Durch eine Gegenüberstellung der Strukturanalysen und der verfügbaren geomechanischen Daten konnten Gebirgsmodelle abgeleitet werden, welche das auf tektonische Überprägung zurückzuführende strukturelle Inventar des Opalinustons hinsichtlich des Festigkeitsverlusts gegenüber dem intakten Gestein klassifizieren. Der anisotropen Entfestigung des Gesteins entlang der Schichtflächen wurde dabei explizit Rechnung getragen.

Die zusammengetragenen Grundlagen zum Verformungsverhalten der Wirtgesteine in den Standortgebieten liefern die hydro-mechanischen Modellkonzepte und Referenzdaten für die geowissenschaftlichen Systemanalysen zur Beurteilung der geotechnischen Bedingungen eines Tiefenlagers sowie zur sicherheitstechnischen Bewertung der lagerbedingten Einflüsse und der hydro-mechanischen Dekompaktionseffekte im Rahmen der geologischen Langzeitentwicklung. Im vorliegenden Dossier werden die Phänomenologie und die Konzeptualisierung von Auflockerungseffekten im Lagerumfeld behandelt. Hierzu wird mit Hilfe einfacher Analysewerkzeuge der Einfluss der Überlagerung auf die geotechnischen Verhältnisse beim Bau eines geologischen Tiefenlagers untersucht. Darüber hinaus werden die Ergebnisse von hydro-mechanischen Systemanalysen zur Selbstabdichtung der Auflockerungszone gezeigt, mit deren Hilfe die hydraulische Bedeutung der Auflockerungszone nach dem Verschluss des Tiefenlagers für verschiedene geologische Situationen quantitativ bewertet werden kann. Schliesslich wird die Veränderung der hydraulischen Barrierenfunktion des Opalinustons als Folge der Gesteinsdekompaktion im Rahmen der geologischen Langzeitentwicklung (Erosion, Neotektonik) anhand semi-empirischer Evidenzen abgeschätzt.

Dossier V: Hydrogeologische Verhältnisse

Das Dossier 'Hydrogeologische Verhältnisse' analysiert die hydrogeologischen Verhältnisse im regionalen und im lokalen Massstab. Der Fokus liegt dabei auf den Verhältnissen in den Tiefenaquiferen. Für Tiefenlager stellen diese potenzielle Wegsamkeiten für Radionuklide vom äusseren Rand des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs in die Biosphäre dar. Zusätzlich trägt die Charakterisierung der Tiefenaquifere auch massgeblich zum Verständnis der Situation in den Wirtgesteinen bei (z.B. Salinität des Porenwassers). Die Kenntnis der hydrogeologischen Verhältnisse in den Tiefenaquiferen ist zudem wichtig im Hinblick auf den Bau der Zugänge ins Tiefenlager, beispielsweise für die Beurteilung möglicher Beeinflussungen von Mineral- und Thermalwassernutzungen oder für die Planung des Bergwassermanagements. In diesem Sinne hat das Dossier 'Hydrogeologische Verhältnisse' Anknüpfungspunkte zu den Dossiers 'Barriereigenschaften' und 'Nutzungskonflikte'. Bezüglich der Kriterien und Indikatoren für den sicherheitstechnischen Vergleich liefert das vorliegende Dossier die Grundlagen zur Beurteilung des Indikators 'Grundwasserstockwerke' sowie ergänzende Angaben insbesondere zu den Kriterien 'Geochemische Bedingungen', 'Nutzungskonflikte', 'Prognostizierbarkeit der Langzeitveränderungen' und 'Untertägige Erschliessung und Wasserhaltung'.

Das Dossier baut auf dem Kenntnisstand früherer Arbeiten auf und integriert neu verfügbare Publikationen und Berichte Dritter. Im Rahmen von Etappe 2 des Sachplanverfahrens konnte der Kenntnisstand zu den hydrogeologischen Verhältnissen durch Beobachtungen in diversen Bohrungen, Auswertungen von Feldbeobachtungen, Literaturstudien und Datenkompilationen vertieft werden. Die Datensätze zur Hydrochemie und zur Isotopenhydrogeologie der Tiefengrundwässer der Nordschweiz wurden ergänzt und die regionale Situation detailliert neu ausgewertet. Für die Analyse der hydrogeologischen Verhältnisse in der Nordschweiz wurden hydrodynamische Modelle im regionalen und im lokalen Massstab erstellt. Mittels dieser stationären Modelle wurden unterschiedliche Szenarien getestet, beispielsweise bezüglich der hydraulischen Eigenschaften einzelner Einheiten oder von Störungen, sowie die Auswirkungen z.B. auf

die hydraulischen Gradienten über die Wirtgesteine oder die Exfiltrationszonen analysiert. Dadurch kann ein Spektrum möglicher hydrogeologischer Situationen aufgezeigt und die Eingangsdaten für die Sicherheitsanalysen eingegrenzt werden. Für das Standortgebiet Wellenberg lagen aus früheren Arbeiten bereits umfassende Analysen der hydrogeologischen Situation vor.

Der Malm- und der Muschelkalk-Aquifer bilden in der Nordschweiz die regionalen Tiefenaquifere über und unter den Wirtgesteinen und definieren damit die maximale Ausdehnung des potenziell einschlusswirksamen Gebirgsbereichs. In den westlichen Gebieten ist auch der Hauptrogenstein-Aquifer zu beachten: Dieser bildet die obere Begrenzung der Rahmengesteine des Opalinuston in den Standortgebieten Jura Ost und Jura-Südfuss; im Letzteren bildet er, allenfalls zusammen mit den Birmenstorfer Schichten, den nächstgelegenen Aquifer im Liegenden der Effinger Schichten. Im lokalen Massstab können weitere Einheiten als Exfiltrationspfade relevant sein: Insbesondere im Oberen Mittelkeuper können je nach lithologischer Ausbildung einzelne Schichtglieder Aquifer-Charakter aufweisen (Keuper-Aquifer). Zudem können die regionalen hydrogeologischen Verhältnisse auch durch die regionalen Störungszonen beeinflusst sein: Im Rahmen von Szenarienanalysen wurde deren Bedeutung für Fließsysteme, Exfiltrationsorte und Gradienten über die Wirtgesteine analysiert.

Im Kapitel 'Regionale Hydrochemie der Nordschweiz' wird im ersten Schritt für jede hydrogeologische Einheit die generelle chemische und isopenhydrogeologische Charakteristik wie auch die Entwicklung der Tiefengrundwässer dargestellt. Dies bildet die Grundlage für die Diskussion von Fließsystemen aus hydrochemischer Sicht. Es zeigt sich, dass in den tektonisch nicht oder nur wenig beanspruchten Gebieten ein ausgeprägter Grundwasserstockwerkbau beobachtet werden kann, der die effiziente Trennwirkung durch die Aquitarde beispielsweise im Dogger (Opalinuston, 'Brauner Dogger'), Lias und Gipskeuper unterstreicht. In tektonisch stärker beanspruchten Gebieten werden teilweise formationsübergreifende Verbindungen beobachtet, beispielsweise die bekannten Thermalwasseraustritte von Baden/Ennetbaden und Schinznach Bad an der Jura-Hauptüberschiebung.

Im Kapitel 'Standortspezifische Hydrogeologie Nordschweiz' wird für jedes Standortgebiet die generelle hydrogeologische Situation charakterisiert und hydrogeologisch relevante Beobachtungen beispielsweise in Bohrungen, an Aufschlüssen oder in Tiefbauten zusammengefasst. Von besonderem Interesse sind hier Beobachtungen zur lokalen lithologischen Ausbildung und allfälligen Wasserführung von vergleichsweise gering mächtigen Einheiten in den Rahmengesteinen, wie dem Sissach-Member der Passwang-Formation oder von kalkig-sandigen Einschaltungen im Lias. Die Hauptexfiltrationsgebiete werden für jedes Gebiet basierend auf den Modellierungen aufgelistet. Die hydraulischen Gradienten über die Wirtgesteine werden aufgrund der Szenarienanalysen der Lokalmodelle unter Berücksichtigung allfällig vorhandener lokaler Potenzialmessungen eingegrenzt.

Für das Standortgebiet Wellenberg existiert dank zahlreicher Tiefbohrungen und der Felduntersuchungen ein umfangreicher hydrogeologischer Datensatz. Dieser wurde schon früher detailliert ausgewertet und in hydrodynamische Modelle mit unterschiedlichen Massstäben integriert; diese beinhalten auch unterschiedliche konzeptionelle Ansätze der hydraulischen Eigenschaften des Wirtgesteins. Eine Besonderheit bildet die in den Mergelformationen des Helvetikums angetroffene Unterdruckzone. Es handelt sich dabei um ein transientes Phänomen im Zusammenhang mit mechanischer Entlastung durch Erosion und / oder Gletscherrückzug. Die Exfiltrationspfade werden unter Berücksichtigung des langfristigen Abbaus dieser Unterdruckzone evaluiert. Die Bedeutung der für Etappe 2 überarbeiteten geologischen Profile und die gegenüber der früheren Planung tieferen Lagerebenen wird diskutiert.

In den Tiefbohrungen am Wellenberg wurde eine ausgeprägte Zonierung der Wassertypen der Tiefengrundwässer angetroffen, inklusive charakteristischer Isotopensignaturen und Verweilzeiten. Gemäss neuer Planung würden die Lagerebenen auf Niveaus liegen, auf denen nealpines Formationswasser zu erwarten ist. In den Tiefengrundwässern wurden teilweise auch hohe Gehalte von Methan angetroffen – gemäss den vorliegenden Daten handelt es sich in der Regel um gelöstes Gas, in einzelnen Zonen muss auch mit freiem Gas gerechnet werden.

Dossier VI: Barriereneigenschaften der Wirt- und Rahmengesteine

In Dossier VI 'Barriereneigenschaften der Wirt- und Rahmengesteine' werden deren Parameter und Konzeptualisierungen für die Dosisberechnungen und den sicherheitstechnischen Vergleich im Rahmen von SGT Etappe 2 beschrieben. Dies bildet die geowissenschaftliche Grundlage für die qualitative und quantitative Bewertung von zahlreichen SGT-Kriterien bzw. der zugehörigen Indikatoren und für die Identifikation allfällig vorhandener eindeutiger Nachteile.

Das Kapitel 'Barriereneigenschaften der Wirtgesteine' enthält eine Charakterisierung der Wirtgesteine bezüglich der für den Transport der Radionuklide relevanten Eigenschaften. Die Definition der lithofaziellen Einheiten baut auf den im Dossier II präsentierten Grundlagen auf und teilt diese basierend auf Erfahrungen betreffend den Zusammenhang zwischen Tonmineralgehalt und hydraulischen Eigenschaften in drei Kategorien ein (< 20, 20 – 40 und > 40 Gew.-%):

- Die mineralogische Zusammensetzung des Opalinustons liegt im Bereich der Tonsteine und sandigen Tonsteine. Für die sicherheitsbezogenen Analysen und Bewertungen kann er als eine einzige lithofazielle Einheit mit Tonmineralgehalt > 40 Gew.-% betrachtet werden.
- Die mineralogischen Analysen des 'Braunen Doggers' zeigen im Füchtbauer-Dreieck eine beträchtliche Variation. Für die sicherheitsbezogenen Analysen und Bewertungen werden drei lithofazielle Einheiten unterschieden: Die Tonigen Abfolgen mit in der Regel > 40 Gew.-% Tonmineralen umfassen das Wirtgestein *sensu stricto* bestehend aus Tonsteinen und Tonmergeln der Parkinsoni-Württembergica-Schichten und der Variansmergel-Formation. Die Sandig-tonigen Abfolgen fassen die stark sandigen Tonsteine und Mergel der Murchisonae-Oolith-, der Wedelsandstein- und der Humphriesoolith-Formation zusammen, der mittlere Tonmineralgehalt liegt im Bereich von 20 – 40 Gew.-%. Unter dem Begriff 'Sandkalkabfolgen' werden die "harten Bänke" bestehend v.a. aus z.T. sandigen Kalken und Eisenoolithen mit charakteristischen Tonmineralgehalten < 20 Gew.-% zusammengefasst.
- Die mineralogischen Analysen der Effinger Schichten fallen im Füchtbauer-Dreieck in die Felder der (z.T. sandigen) Kalkmergel, tonigen Kalke und Kalke. Für die sicherheitsbezogenen Analysen und Bewertungen werden die lithofaziellen Einheiten Kalkmergelabfolgen (Kategorie Tonmineralgehalt 20 – 40 Gew.-%) und Kalkbankabfolgen (Kategorie Tonmineralgehalt < 20 Gew.-%) unterschieden.
- Die mineralogischen Analysen der Mergel-Formationen des Helvetikums (Helvetische Mergel) liegen im Füchtbauer-Dreieck typischerweise im Bereich von kalkig-sandigen Tonsteinen, sandigen Ton- und Kalkmergeln, tonigen Kalken bis zu nahezu reinen Kalken und weisen damit im Vergleich zu den Effinger Schichten ein ähnliche, aber variabelere Zusammensetzung auf. Die Helvetischen Mergel sind so stark ineinander verschuppt und verfalltet, dass im Hinblick auf die sicherheitsbezogenen Analysen und Bewertungen lediglich zwei lithofazielle Einheiten unterschieden werden. Die Mergel, welche die Hauptmasse des Wirtgesteins ausmachen, fallen in die Kategorie Tonmineralgehalt 20 – 40 Gew.-%. Die häufig boudinierten und auseinandergerissenen Kalkbankabfolgen fallen in die Kategorie Tonmineralgehalt < 20 Gew.-%.

Aus Untersuchungen an Bohrkernen von zahlreichen Tiefbohrungen der Nordschweiz und am Wellenberg liegen Analysenresultate zahlreicher Parameter vor. Insbesondere bezüglich der Porosität werden die Resultate verschiedener Methoden vorgestellt und diskutiert.

Die Charakterisierung der Porenwässer stützt sich insbesondere auf Untersuchungen von Bohrkernen aus den Standortregionen. Zusätzlich werden, wo vorhanden, Analysen von Grundwässern und im Fall des Opalinustons Resultate aus dem Felslabor Mont Terri berücksichtigt. Mögliche regionale Unterschiede resp. Ungewissheiten werden über Varianten des Referenzporenwassers abgedeckt.

Die Charakterisierung der hydraulischen Eigenschaften basiert auf In situ-Tests in Bohrungen, Experimenten mit Bohrkernen und Beobachtungen in Untertagebauten. Zusätzlich erfolgte ein systematischer Vergleich des Strukturinventares der Bohrkern mit den Resultaten der In situ-Tests. Die Datensätze beschreiben dabei die Gesteine auf unterschiedlichen Massstäben. Die Labortests an Bohrkernen ergeben für die Gesteinsmatrix allgemein sehr geringe hydraulische Durchlässigkeiten und zeigen damit, dass die bei einzelnen Wirtgesteinen beobachteten erhöhten Durchlässigkeiten durch diskrete tektonisch-strukturelle Elemente bedingt sein müssen:

- Beim lithologisch relativ homogenen Opalinuston zeigt die Übereinstimmung der sehr geringen Durchlässigkeiten aus Laborexperimenten und In situ-Tests in Bohrungen (unter Berücksichtigung von kleineren Störungen und unterschiedlicher lithofazieller Untereinheiten), dass eine Modellierung als homogen-poröses Medium mit diffusionsdominiertem Transport angezeigt ist.
- Beim 'Braunen Dogger' zeigen In situ-Tests im Einklang mit Untersuchungen an Bohrkernen sehr geringe hydraulische Durchlässigkeiten des ungestörten Wirtgesteins. Einzig in der nahe am Hegau-Bodensee-Graben gelegenen Bohrung Schlattingen-1 wurde in einem Intervall mit zwei potenziell offenen Strukturen in der Wedelsandstein- und in der Humphriesioolith-Formation eine erhöhte Durchlässigkeit angetroffen. In den Tonigen Abfolgen wird in Analogie zum Opalinuston eine effiziente Selbstabdichtung erwartet.
- Bei den Effinger Schichten zeigen In situ-Tests im ungestörten Wirtgestein wie auch hydraulische Tests an Bohrkernen sehr geringe hydraulische Durchlässigkeiten. Erhöhte K-Werte finden sich in gestörten Bereichen, beispielsweise in den Gerstenhübel-Schichten der Bohrung Oftringen. Die Kalke dieser Einheit sind äusserst tonmineralarm, so dass kein relevantes Selbstabdichtungsvermögen zu erwarten ist
- Bei den Helvetischen Mergeln handelt es sich um ein geklüftetes Medium mit sehr gering durchlässiger Matrix. Die Wasserführung ist ausschliesslich an Strukturen der spröden Deformation und an spröde überprägte (reaktivierte), duktile Strukturen gebunden. Unterhalb eines 500 – 600 m mächtigen Bereichs mit erhöhten Durchlässigkeiten liegen die Werte im Bereich von 10^{-13} bis 10^{-10} m/s.

Bei allen Wirtgesteinen, bei denen zumindest in einzelnen lithofaziellen Einheiten Störungen oder Klüfte hydraulisch wirksam sein können, stellt sich die Frage, in wie weit einzelne Bohrungen die zu erwartende Bandbreite abdecken können. Um die Transmissivitäten im Bereich von tektonisch-strukturellen Elementen robust einzugrenzen, werden deshalb Erfahrungen aus anderen, lithologisch ähnlichen Gesteinen und auch konzeptuelle Überlegungen zur Selbstabdichtung von Störungen berücksichtigt.

Die Diffusionseigenschaften beruhen auf Messungen im Labor sowie auf im Rahmen von Feldexperimenten im Felslabor Mont Terri gewonnen Datensätzen. Zusätzlich besteht ein empirischer Zusammenhang zwischen der Porosität und dem Diffusionskoeffizienten (*extended Archie's law*); dieser Ansatz basiert auf einer breiten internationalen Datenbasis und erlaubt eine

robuste Abschätzung einzig auf Grund der Porosität. Porenwasser-Tracerprofile erlauben die Validierung über den Massstab Formation und über lange Zeiträume.

Unabhängige Evidenzen wie Tracerprofile oder anomale hydraulische Potenziale im Wirtgestein belegen die Einschlusswirksamkeit der Wirtgesteine über sehr lange Zeiträume und untermauern beispielsweise im Fall des Opalinustons die Dominanz des diffusiven über den advektiven Stofftransport sowie die hydraulische Barrierenwirkung resultierend in ausgeprägtem Grundwasser-Stockwerkbau.

Im Kapitel 'Barriereneigenschaften der Rahmengesteine' werden die lithofaziellen Einheiten, die Gesteinsparameter und die Transportparameter hergeleitet. Es handelt sich dabei um die oberen Rahmengesteine des Opalinustons in den Standortgebieten Jura-Südfuss und Jura Ost (Passwang-Formation, Untere Acuminata-Schichten) und die unteren Rahmengesteine des Opalinustons in allen Standortgebieten der Nordschweiz. Die lithofaziellen Einheiten der restlichen als Rahmengesteine ausgeschiedenen Gesteine in den Standortgebieten Südranden, Zürich Nordost und Nördlich Lägern (Opalinuston, 'Brauner Dogger', Effinger Schichten) wurden bereits als Wirtgesteine charakterisiert. Die Effinger Schichten im Standortgebiet Jura-Südfuss und die Helvetischen Mergel im Standortgebiet Wellenberg haben keine Rahmengesteine.

Unter dem Opalinuston folgt die lithofazielle Einheit Toniger Lias mit typischen Tonmineralgehalten von 40 Gew.-% und sehr geringen hydraulischen Durchlässigkeiten von $\leq 10^{-13}$ m/s. Einzig im Standortgebiet Jura-Südfuss ist der Lias unter dem Opalinuston vergleichsweise sandig-kalkig ausgebildet und wird deshalb als Kalkiger Lias bezeichnet. Beobachtungen zur Wasser- und Gasführung insbesondere in der Bohrung Gösgen SB4 legen nahe, dass es sich um eine Einheit mit gegenüber dem Tonigen Lias erhöhter Durchlässigkeit handelt.

Die lithofazielle Einheit 'Arietenkalk' besteht aus z.T. tonigen und sandigen Kalksteinen und zeigte in den Tiefbohrungen Benken, Weiach, Riniken und Schafisheim geringe Durchlässigkeiten. Demgegenüber gibt es aus oberflächennahen Bereichen und Tunneln Evidenzen, dass der 'Arietenkalk' in Zusammenhang mit einer verstärkten Deformation (Störungen, Klüfte) Aquifercharakter aufweisen kann.

Zwischen 'Arietenkalk' und Keuper-Aquifer finden sich in der lithofaziellen Einheit Toniger Keuper wiederum tonreiche Lithologien mit geringer Durchlässigkeit.

Im Oberen Mittelkeuper finden sich Einheiten, die in Abhängigkeit der lokalen lithologischen Ausbildung Aquifer-Charakter aufweisen können. Diese werden in der lithofaziellen Einheit Keuper-Aquifer zusammengefasst.

Unter dem Keuper-Aquifer folgen gering durchlässige Gesteine, welche zur mächtigen lithofaziellen Einheit 'Gipskeuper' zusammengefasst werden.

Die oberen Rahmengesteine des Opalinustons in den Standortgebieten Jura Ost und Jura-Südfuss umfassen insbesondere die Passwang-Formation. In Analogie zum 'Braunen Dogger' wurde sie in die lithofaziellen Einheiten Sandig-tonige Abfolgen und Sandkalkabfolgen unterteilt. Die Passwang-Formation wurde in den Bohrungen Riniken und Schafisheim hydraulisch getestet, in beiden ergaben sich sehr geringe Durchlässigkeiten. Insbesondere mit dem Sissach-Member kann sie eine lokal markante, bis über 10 m mächtige Kalkbankabfolge direkt über dem Opalinuston aufweisen, welche in Bereichen mit einer stärkeren Klüftung resp. bei kleineren Störungen deutlich erhöhte Durchlässigkeiten aufweisen könnte.

Das Kapitel 'Standortbezogene Modellkonzepte und Parameter für den Radionuklidtransport in den Wirt- und Rahmengesteinen' präsentiert die Herleitung der Modellkonzepte und den Geodatensatz für die provisorische Sicherheitsanalyse und den sicherheitstechnischen Vergleich im Rahmen von SGT Etappe 2. Dieser basiert auf den in den beiden vorangehenden Kapiteln präsentierten Grundlagen und berücksichtigt bei den hydraulischen Parametern auch Erfahrungen mit ähnlichen Gesteinen. Die präsentierten Mächtigkeiten der lithofaziellen Einheiten beruhen auf den in Dossier II präsentierten Grundlagen.

Dossier VII: Nutzungskonflikte

In Dossier VII 'Nutzungskonflikte' wird aufgezeigt, ob innerhalb, oberhalb oder unterhalb des Wirtgesteins aus heutiger Sicht oder in absehbarer Zeit wirtschaftlich nutzungswürdige Rohstoffe (z.B. Salz, Kohlenwasserstoffe, Kohle), Mineral- und Thermalwassernutzungen, geothermische Ressourcen, Rohstoffe für die Bauindustrie, Erze etc. in besonderem Masse vorkommen, und inwiefern sich daraus Nutzungskonflikte ergeben könnten.

Ein Nutzungskonflikt entsteht einerseits, wenn die Nutzung von vorhandenen Ressourcen durch ein Tiefenlager (inkl. Zugangsbauwerke) verunmöglicht oder beeinträchtigt wird, oder wenn eine erhebliche Wahrscheinlichkeit des unbeabsichtigten menschlichen Eindringens in das Tiefenlager besteht. Diskutiert wird ferner, ob die Erschliessung und Nutzung von Rohstoffen die Barrierenwirkung des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs (Wirtgestein und Rahmengesteine) beeinträchtigen könnten, sei es beispielsweise durch direktes Eindringen mittels Sondierbohrungen in den einschlusswirksamen Gebirgsbereich oder in das Lager selbst, oder durch indirekte Beeinträchtigungen aufgrund induzierter Bewegungen an Störungen (Subsidenz des Untergrunds, induzierte Seismizität).

Mit dem Bundesratsentscheid vom 30. November 2011 zur Aufnahme der von der Nagra in Etappe 1 vorgeschlagenen Standortgebiete in den Sachplan geologische Tiefenlager wurde auch festgelegt, dass die Kantone, basierend auf Unterlagen des ENSI, bei Bohrbewilligungen oder Konzessionen prüfen, ob mit den angefragten Tätigkeiten die Barriereneigenschaften des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs gefährdet werden könnten. Dazu wurde von der Nagra im Auftrag des ENSI ein Bericht mit entsprechenden Schutzzonen-Karten erarbeitet.

Die potenziellen Nutzungskonflikte innerhalb und im näheren Umfeld der geologischen Standortgebieten wurden für die oben aufgeführten Rohstoffe und Nutzungsarten analysiert; die Ergebnisse sind nachfolgend zusammenfassend dargestellt.

- *Kohlenwasserstoffe, Kohle:* Die potenziellen Nutzungskonflikte bezüglich Abbau/Förderung von fossilen Kohlenwasserstoff-Ressourcen (Erdgas, Erdöl) und von Kohle sind vielschichtig. Sie betreffen die Exploration, Fördermethoden wie auch Folgeerscheinungen des Abbaus.

Innerhalb der vier in SGT Etappe 1 vorgeschlagenen Wirtgesteine sind keine fossilen Rohstoffvorkommen bekannt. Keines der Wirtgesteine hat ein Potenzial für eine Schiefergas-Nutzung.

Die Evaluation möglicher Rohstoffe unterhalb der Wirtgesteine zeigt, dass nur das geologische Standortgebiet Zürich Nordost in grossen Teilen, kein Potenzial für fossile Rohstoffe aufweist. Im gesamten Standortgebiet Jura Ost besteht ein mögliches Potenzial für Erdgas in dichten Gesteinen des Permokarbons (sog. tight gas plays). Dasselbe gilt für das Gebiet Nördlich Lägern, wobei dort der Nordwestrand auch im Bereich von weiteren möglichen Lagerstättentypen liegt; diese liegen aber ausserhalb des Lagerperimeters. Für die Standortgebiete Jura-Südfuss und Südranden besteht ein spekulatives Potenzial für Erdgas in dichten

Gesteinen (tight gas) des Permokarbons sowie Kohleflözgas in den Karbonkohlen. Im geologischen Standortgebiet Wellenberg ist die Datenlage über den tiefen Untergrund (> 2 km) ungenügend für eine Abschätzung möglicher Ressourcen; aber weil Tiefbohrungen von der Talsohle aus erfolgen würden, zeichnen sich keine Nutzungskonflikte ab.

Die Mengen an potenziellen Energieressourcen auf Basis von Kohlenwasserstoffen bzw. Kohle sind erheblich. Allerdings wären für den Nachweis dieses Potenzials und dessen wirtschaftliche Nutzung weitere kostspielige Explorationsarbeiten notwendig.

Im Hinblick auf Explorationsarbeiten zur Erkundung der meist spekulativen Kohlenwasserstoff- und Kohle-Ressourcen zeichnen sich wegen des geringen Platzbedarfs eines Tiefenlagers keine konkreten Interessenskonflikte ab. Explorationsbohrungen können ohne Erkenntnisverlust ausserhalb der potenziellen Lagerperimeter mit angemessenen Sicherheitsabständen durchgeführt werden. Durch geophysikalische Explorationskampagnen (Reflexionsseismik, Gravimetrie) wird ein Tiefenlager nicht beeinträchtigt. Für eine allfällige Nutzung sind entsprechende Sicherheitsabstände einzuhalten.

- *Salz:* Für Etappe 2 wurden die Informationen über die Salzvorkommen der Nordschweiz aktualisiert und präzisiert. Der Abbau des Steinsalzes erfolgt ausschliesslich im Auslaugungsverfahren mit Bohrungen. Die Salzsichten liegen im Bereich der Standortgebiete meist so tief, dass sie für eine wirtschaftliche Nutzung aus heutiger Sicht nicht in Betracht kommen, oder es gibt Hinweise auf eine sehr geringe Mächtigkeit oder ein Nichtvorhandensein des Salzlagers. Einzig im nördlichsten und westlichsten Bereich des Standortgebiets Jura Ost käme ein Salzabbau in Frage, falls mit zukünftigen Bohrungen eine wirtschaftlich nutzbare Mächtigkeit nachgewiesen werden könnte. Dieses Gebiet liegt jedoch deutlich ausserhalb der Lagerperimeter SMA und HAA.
- *Steine und Erden, Erze:* Unter dem Sammelbegriff Steine und Erden (auch 'anorganische Nicht-Erze' genannt) werden verschiedene nicht-metallische, mineralische Rohstoffe zusammengefasst. Steine und Erden werden aus wirtschaftlichen Gründen nur oberflächennah – meist im Tagebau, selten in oberflächennahen Kavernen – abgebaut. Eine potenzielle Beeinträchtigung eines geologischen Tiefenlagers wäre denkbar, wenn direkt über dem Lagerperimeter ein tiefreichender, grossflächiger Abbau von mineralischen Rohstoffen stattfinden würde, welcher eine Dekompaktion des Gebirges und als Folge davon eine Erhöhung der hydraulischen Durchlässigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs bewirken würde.

Im geologischen Standortgebiet Jura Ost fand in den letzten Jahren eine öffentliche Debatte über ein grosses Kalk/Mergelabbau-Projekt statt. Ein solcher Abbau hätte Dimensionen erreicht, die im Extremfall einen Einfluss auf die Abgrenzung der Lagerperimeter gehabt hätten. Das Projekt wurde jedoch zurückgezogen. Zurzeit gibt es im Standortgebiet Jura Ost keine konkreten Kalk/Mergel-Abbauprojekte. Inzwischen sind auch die entsprechenden Schutzzonen für geologische Tiefenlager festgelegt worden.

Ein wirtschaftlicher Abbau von Erzen in den geologischen Standortgebieten wird als unwahrscheinlich eingestuft.

- *Mineral- und Thermalwassernutzungen:* In der Nordschweiz und im angrenzenden süddeutschen Gebiet existieren an verschiedenen Orten Mineral- und Thermalwassernutzungen. Die genutzten Grundwässer stammen dabei typischerweise aus tiefreichenden Fliesssystemen. Es muss deshalb beurteilt werden, ob durch die Zugänge ins Tiefenlager (Wirtgestein) eine Beeinflussung dieser Nutzungen zu erwarten ist. Eine Beeinflussung durch Bauwerke im Wirtgestein selbst kann aufgrund der sehr geringen hydraulischen Durchlässigkeit dieser Gesteine ausgeschlossen werden.

Mineral- oder Thermalwassernutzungen könnten während der Bau- oder der Betriebsphase der Zugänge beeinflusst werden, wenn eine hydraulische Verbindung zwischen diesen Nutzungen und den von den Zugängen durchfahrenen Bereichen besteht. Umfangreiche, jahrelange Abklärungen der Nagra haben eine Fülle von Informationen zum Verständnis der Fliessverhältnisse der Tiefengrundwässer geliefert. Sie bilden die Basis für die Beurteilung potenzieller Nutzungskonflikte im Zusammenhang mit Mineral- und Thermalwassernutzungen.

In den meisten Fällen kann eine Beeinflussung der Mineral- und Thermalwassernutzungen durch die Zugangsbauwerke ausgeschlossen werden, da die betreffenden hydrogeologischen Einheiten, welche sich oft unterhalb des Opalinustons befinden, nicht durchfahren werden. Insgesamt gibt es nur eine Nutzung, bei welcher eine Beeinflussung durch die Zugangsbauwerke nicht vollständig ausgeschlossen werden kann. Es handelt sich um die mit einer geringen Schüttung in einen Brunnen artesisch ausfliessende Thermalwasserbohrung Lottstetten-Nack (D). In diesem Fall müssten bei der Erstellung der Zugangsbauwerke in den Standortgebieten Südanden und Zürich Nordost beim Durchfahren des Malm-Aquifers entsprechende Vorsichts- und Ueberwachungsmassnahmen getroffen werden.

Im geologischen Standortgebiet Wellenberg und Umgebung existieren keine Mineral- oder Thermalwassernutzungen.

- *Geothermie (insbesondere tiefe Nutzungen):* Die potenziellen Nutzungskonflikte bezüglich tiefer Geothermie hängen stark von der Nutzungsart (hydrothermal, petrothermal), der geologischen Zielstrukturen und Zieltiefe sowie der verwendeten Technologie (Art der Stimulation) ab.

Die von der Schweizerischen Vereinigung für Geothermie aufgelisteten Standorte geothermischer Anlagen lassen den Schluss zu, dass zurzeit keine direkten Nutzungskonflikte zwischen bestehenden bzw. aktuell geplanten geothermischen Anlagen und einem Tiefenlager vorliegen.

Als mögliches Zielgebiet zukünftiger tiefer hydrothermalen Anlagen gelten Randstörungen des Nordschweizer Permokarbondrogs. Bei der Abgrenzung der Lagerperimeter innerhalb der Standortgebiete wurde bekannten Trograndstörungen ausgewichen und post-paläozoisch reaktivierte Randbereiche des Nordschweizer Permokarbondrogs wurden aus verschiedenen Gründen als 'zu meidende tektonische Zonen' eingestuft. D.h. es gibt keine Lagerperimeter, welche direkt über solchen geothermischen Zielgebieten liegen. In den Standortgebieten Zürich Nordost, Nördlich Lägern und Jura Ost sind die Lagerperimeter teilweise durch Trogrand-Störungszonen begrenzt.

In diesen Gebieten müssten – falls zukünftig ein Geothermie-Projekt in Trograndstörungen lanciert werden sollte – ein nötiger Sicherheitsabstand eingehalten und geeignete Überwachungsprogramme durchgeführt werden, damit eine Beeinträchtigung eines Tiefenlagers durch induzierte Bewegungen an Störungen bzw. Seismizität ausgeschlossen werden kann.

Gemäss neuester Einschätzung einer breitgefächerten Gruppe von Fachexperten sind petrothermale Systeme am vielversprechendsten für eine erfolgreiche langfristige Erschliessung der schweizerischen Geothermieressourcen, obwohl diese Systeme angesichts der noch bestehenden technischen Probleme zur Zeit noch nicht genügend ausgereift sind, um am Markt bestehen zu können.

Im Gegensatz zu hydrothermalen Systemen nutzen petrothermale Systeme grossflächige Wärmeanomalien im tiefen Untergrund und können praktisch überall errichtet werden. Aus diesem Grund bestehen in Bezug auf geologische Tiefenlager viele Möglichkeiten, um potenziellen Nutzungskonflikten auszuweichen.

- *Erdgasspeicherung*: Aufgrund der bisherigen Speicherforschungsarbeiten konnten im weiteren Umfeld der von der Nagra vorgeschlagenen Standortgebiete keine geeigneten Formationen für die Grossspeicherung von Erdgas lokalisiert werden.
- *CO₂-Speicherung*: Die neueste Studie des BFE zeigen, dass die meisten Standortgebieten in der Nordschweiz ausserhalb der potenziell geeigneten Zonen für die CO₂-Speicherung liegen. Nur das Standortgebiet Jura-Südfuss liegt am Rand der in dieser Studie als günstig bezeichneten Zone. Weil ein geologisches Tiefenlager nur eine geringe Fläche beansprucht, sehen die Autoren der Studie die Nutzungskonflikte auch dort als vernachlässigbar an.

Dossier VIII: Charakterisierbarkeit und Explorierbarkeit

Das Dossier VIII 'Charakterisierbarkeit und Explorierbarkeit' des vorliegenden Berichts beschreibt die Grundlagen für die Beurteilung von drei Indikatoren des Sicherheitstechnischen Vergleichs der Etappe 2 SGT: 'Variabilität der Gesteinseigenschaften im Hinblick auf ihre Charakterisierbarkeit', 'Explorationsverhältnisse im geologischen Untergrund' und 'Explorationsbedingungen an der Oberfläche'.

In Kapitel 2 wird die 'Variabilität der Wirtgesteine im Hinblick auf ihre Charakterisierbarkeit' diskutiert. Im Rahmen des sicherheitsgerichteten Vorgehens wird für die einzelnen Wirtgesteine geprüft, ob präferenzielle Fliesspfade mit ungünstigen Radionuklid-Rückhalteeigenschaften auftreten können, welche nicht zuverlässig lokalisierbar oder charakterisierbar sind. Das Auftreten solcher Fliesspfade hängt von der Wechselwirkung von verschiedenartigen, lithofaziellen Einheiten mit tektonisch-strukturellen Elementen ab. Präferenzielle Fliesspfade können in lithofaziellen Einheiten mit reduziertem Selbstabdichtungsvermögen auch entlang tektonisch-struktureller Elemente mit sehr geringen Versätzen auftreten. Solche tektonisch-strukturellen Elemente sind seismisch nicht erfassbar und die Fliesspfade sind aufgrund ihres in der Regel komplexen internen Aufbaus auch mit Bohrungen nicht zuverlässig hydraulisch charakterisierbar. In lithofaziellen Einheiten mit reduziertem Selbstabdichtungsvermögen muss deshalb damit gerechnet werden, dass solche sicherheitsrelevanten Elemente auftreten können, welche nicht zuverlässig lokalisierbar oder charakterisierbar sind. In Gesteinen mit hohem Selbstabdichtungsvermögen ist nicht mit präferenziellen Fliesspfaden zu rechnen, welche ungünstige Radionuklid-Rückhalteeigenschaften haben.

Der Opalinuston verfügt über ein sehr gutes Selbstabdichtungsvermögen und das Potenzial für undetektierte präferenzielle Fliesswege ist deshalb sehr gering. Der 'Braune Dogger' ist nur in etwa seiner oberen Hälfte sehr gut selbstabdichtend. Im restlichen, weniger gut selbstabdichtenden Teil treten über Meter-mächtige Einschaltungen (harte Bänke) mit teilweise sehr geringen Tonmineralgehalten auf, die lateral nur unzureichend korrelierbar sind und unter dem seismischen Auflösungsvermögen liegen. Das Potenzial für undetektierte präferenzielle Fliesswege über den gesamten 'Braunen Dogger' ist erhöht. Die Effinger Schichten bestehen aus einer Wechselfolge von mässig gut selbstabdichtenden Kalkmergel- und wenig selbstabdichtenden Kalkbankabfolgen. Die Korrelation der Abfolgen zwischen Bohrungen ist teilweise gut möglich, teilweise gibt es Ungewissheiten. Das Potenzial für undetektierte präferenzielle Fliesswege in den Effinger Schichten ist erheblich, weil sie höchstens ein mässig gutes Selbstabdichtungsvermögen aufweisen. Die Mergel-Formationen des Helvetikums bestehen zu grossen Teilen aus kleinräumig zerscherten Mergeln mit mässig gutem Selbstabdichtungsvermögen. Einschaltungen von Kalkbankabfolgen sind schwer korrelierbar, Kalkschuppen mit erheblichen Ausmassen können als Fremdgesteinseinschlüsse auftreten. Das Potenzial für undetektierte präferenzielle Fliesswege in den Mergel-Formationen des Helvetikums (insbesondere entlang von Störungen) ist somit höher als in den anderen Standortgebieten.

In Kapitel 3 werden die 'Explorationsverhältnisse im geologischen Untergrund' untersucht. Hier wird massgeblich die Möglichkeit der Erkundung mit 3D-seismischen Methoden diskutiert. Die Erkundung mit 3D-Seismik bildet die wichtigste Grundlage für die räumlich abdeckende Beurteilung der strukturellen Situation unter Tage. Die zu betrachtenden Wirtgesteine der Nordschweiz Opalinuston, 'Brauner Dogger' und Effinger Schichten liegen regional in einem hoch reflektiven Schichtstapel, der mit seismischen Methoden gut abgebildet werden kann. Der Opalinuston weist eine grosse vertikale und laterale Kontinuität auf, so dass sicherheitsrelevante Versätze mit grosser Zuverlässigkeit detektiert werden können. Im 'Braunen Dogger' konnten in Aufschlüssen und Bohrungen laterale Änderungen nachgewiesen werden, die mit seismischen Methoden nicht zuverlässig erfasst werden können. Der interne Aufbau der Effinger Schichten weist zwar eine ausreichende laterale Kontinuität auf, wie aus Log-Korrelationen mehrerer Bohrungen nachgewiesen wurde. Da das Selbstabdichtungsvermögen der Kalkmergel- und Kalkbankabfolgen eingeschränkt ist, kann es jedoch bereits bei geringen tektonischen Versätzen, die mit seismischen Methoden nicht lokalisiert werden können, zur Bildung von präferenziellen Fliesspfaden kommen. Die Mergel-Formationen des Helvetikums im Standortgebiet Wellenberg weisen nur geringe Impedanzkontraste zum Nebengestein auf. Zusätzlich sind die Wirtgesteinsgrenzen steilstehend. Die Voraussetzungen für eine seismische Erkundung des Wirtgesteinskörpers und ggf. vorhandenen Störungen sind hier nicht erfüllt.

Für die ergänzende standortspezifische Bewertung der Explorationsbedingungen im Untergrund werden die jeweils in Frage kommenden Wirtgesteine betrachtet. Die räumlichen Verhältnisse im Untergrund der Standortgebiete sind für alle betrachteten Wirtgesteine gut explorierbar. Der Opalinuston und der 'Braune Dogger' sind in den Gebieten, in denen sie als Wirtgesteine in Frage kommen, in eine Sequenz mit hohen Reflektivitäten eingebettet, die eine Abbildung der tektonischen Situation stets zuverlässig ermöglichen. Unterschiede zwischen den einzelnen Standortgebieten ergeben sich aus der lokalen geologischen Situation. Die Geometrie der Effinger Schichten kann im Ostteil des Standortgebiets Jura-Südfuss anhand lokaler Hilfs-horizonte interpretiert werden. Die Explorationsverhältnisse im geologischen Untergrund des Standortgebiets Wellenberg lassen eine sinnvolle Erkundung mit Hilfe von 3D-Seismik nicht zu. Die Erkundung muss sich hier vollständig auf Bohrungen oder sogar Erkundungsstollen abstützen.

Kapitel 4 legt die Grundlagen für die 'Explorationsbedingungen an der Oberfläche' dar im Hinblick auf eine flächendeckend hochauflösende 3D-Seismik. Zu diesem Zweck wurden detaillierte Studien bezüglich Messaufwand und Überdeckungsrisiko für provisorisch festgelegte Seismik-Perimeter der geologischen Standortgebiete der Nordschweiz im Hinblick auf die Erkundung des primären Wirtgesteins angefertigt und analysiert. Eine verlässliche Explorierbarkeit an der Oberfläche ist in allen geologischen Standortgebieten gegeben. Es ergeben sich leichte Unterschiede für die einzelnen Standortgebiete oder Teile davon in Abhängigkeit der Oberflächenbedingungen wie z.B. Siedlungsdichte, Flussläufe oder Infrastruktur. Die Explorationsbedingungen an der Oberfläche für die Erkundung mit Bohrungen werden für alle Gebiete der Nordschweiz aufgrund der geringen Ausmasse der Bohrplätze und der bestehenden Flexibilität bei ihrer Platzierung als gegeben und gleichwertig betrachtet.

Résumés

Dossier II: Conditions sédimentologiques et tectoniques

Le dossier II est consacré aux conditions sédimentologiques et tectoniques dans les domaines d'implantation géologiques (ci-dessous désignés par la forme abrégée «domaines» ou «domaines d'implantation») et les régions avoisinantes. Il décrit et illustre les caractéristiques stratigraphiques et sédimentologiques des roches d'accueil et des roches encaissantes ainsi que la situation du point de vue de la géologie structurale et de la tectonique dans les domaines proposés. En outre, on y trouve des cartes relatives à la profondeur et à l'épaisseur des roches d'accueil dans les domaines d'implantation géologiques.

Les informations relatives aux conditions sédimentologiques et tectoniques qui règnent dans les domaines d'implantation géologiques sont prises en compte de différentes manières dans la comparaison des domaines du point de vue de la sûreté. Les caractéristiques stratigraphiques et sédimentologiques des roches d'accueil et des roches encaissantes sont en effet déterminantes pour évaluer leur épaisseur et leur capacité de confinement, ainsi que les possibilités de caractérisation et, en partie, d'exploration. Ces dernières propriétés sont traitées respectivement dans les dossiers VI et VIII, sur la base des données présentées dans le dossier II. En partant des conditions relatives à la géologie structurale et à la tectonique dans les régions concernées par les domaines d'implantation, on a défini des éléments tectoniques régionaux; ceux-ci jouent à leur tour un rôle décisif dans la définition des domaines et des périmètres de dépôt et ont des répercussions sur l'espace disponible pour aménager le dépôt souterrain. Par ailleurs, les données sur la géologie structurale et la tectonique, en particulier sur le régime tectonique dans les domaines d'implantation, sont utilisées pour évaluer différents aspects relatifs à l'évolution à long terme et au comportement mécanique des roches, des thèmes qui font respectivement l'objet des dossiers III et IV. La profondeur des roches d'accueil est un facteur essentiel pour délimiter le périmètre du dépôt dans le cadre de la comparaison des domaines d'implantation du point de vue de la sûreté. Pour déterminer la profondeur optimale, on considère l'évolution à long terme, la géomécanique et les techniques de construction. Tous ces aspects sont étudiés plus en détail dans les dossiers III et IV (et les rapports cités dans ces documents).

Les données relatives à la caractérisation sédimentologique et tectonique des domaines d'implantation géologiques ont été considérablement améliorées au cours de l'étape 2 du plan sectoriel «Dépôts en couches géologiques profondes». D'une part, on dispose aujourd'hui de plus de données issues de forages; il convient de mentionner en particulier le grand nombre de nouveaux forages de tiers, généralement peu profonds, mais bien documentés sur le plan géophysique, qui fournissent de précieuses informations pour améliorer la caractérisation stratigraphique et sédimentologique des roches d'accueil et des roches encaissantes. Les données issues de la nouvelle campagne de sismique 2D dans le nord de la Suisse fournissent également des informations essentielles sur le plan régional. Les données déjà à disposition pour l'étape 1 du plan sectoriel ont été entièrement retraitées au cours de l'étape 2, améliorant ainsi les possibilités d'interprétation. La campagne de sismique 2D 2011/12 a permis de densifier les données disponibles, avec l'ajout de 20 profils sismiques supplémentaires de grande qualité. Cette campagne sismique a permis d'atteindre une densité de données comparable pour tous les domaines d'implantation du nord de la Suisse et par conséquent de vérifier et de préciser les éléments tectoniques régionaux. Sur cette base, il a été également possible de réviser localement les modèles géologiques établis pour les domaines d'implantation.

Les roches d'accueil dans le nord de la Suisse sont l'Argile à Opalinus, la série de roches argileuses «Dogger brun» («Brauner Dogger») et les couches d'Effingen. Elles constituent, avec les roches encaissantes inférieures et supérieures, la zone de confinement géologique

potentielle. Elles sont brièvement caractérisées ci-après, en partant des strates inférieures et en procédant vers le haut.

Les formations situées au-dessous de l'Argile à Opalinus sont constituées essentiellement de sédiments argilo-marneux et riches en sulfates datant du Keuper et du Lias (formation de la Staffelegg). Dans ces sédiments, on trouve des unités calcaires, dolomitiques et sableuses de plusieurs mètres d'épaisseur qui, au niveau d'affleurements, peuvent former des «bancs durs» résistants aux intempéries (Calcaires à Arietites, Dolomie de Gansingen, formations du Stubensandstein et du Schilfsandstein). Dans le domaine d'implantation Jura-Südfuss en outre, une série de roches calcaires sableuses et de grès calcaires, atteignant jusqu'à plus de 10 m d'épaisseur, est présente juste en dessous de l'Argile à Opalinus.

L'Argile à Opalinus est constituée essentiellement de roches argileuses, comportant parfois une part importante de sable. Par comparaison aux autres formations mésozoïques du nord de la Suisse, elle forme un ensemble de couches homogène et de grande épaisseur. Des indices concrets suggèrent que l'Argile à Opalinus est un peu moins épaisse dans le domaine d'implantation Jura-Südfuss que dans les autres domaines proposés.

Dans les domaines Südranden, Zürich Nordost et Nördlich Lägern, l'Argile à Opalinus est recouverte par la série de roches argileuses «Dogger brun». Cette formation constitue elle-même une roche d'accueil potentielle dans les domaines Zürich Nordost et Nördlich Lägern. Elle est principalement argileuse, mais comprend aussi des «bancs durs» isolés ou en série, qui peuvent être constitués de roches calcaires micritiques, sableuses ou biodétritiques et d'oolithes ferrugineuses, regroupées ici sous le terme «Séries sablo-calcaires». Certaines de ces séries pauvres en argile ne peuvent pas être corrélées latéralement de manière satisfaisante. L'ensemble le plus riche en argile et le plus homogène du «Dogger brun» se situe dans la partie supérieure de la série; il est constitué des couches Parkinsoni-Württembergica et de la formation marneuse dite «Varians». Certaines données indiquent que, à côté des séries de roches argileuses traversées par le forage à Weiach, il pourrait se trouver des séquences plus épaisses et plus pauvres en argile dans les zones occidentales et orientales du domaine d'implantation Nördlich Lägern. Dans les domaines Jura Ost et Jura-Südfuss, les séries argileuses du «Dogger brun» sont absentes; l'Argile à Opalinus y est recouverte par la formation du Passwang et les couches de marnes à *Ostrea acuminata* (inférieures). La formation du Passwang est composée de plusieurs séries de roches argileuses, sableuses et/ou de marnes, calcaires et oolithes ferrugineuses bioclastiques. Elle présente des variations de faciès verticales et latérales marquées. Elle est d'une manière générale moins riche en argile que le «Dogger brun».

Les couches d'Effingen recouvrent le «Dogger brun» dans les domaines d'implantation Südranden, Zürich Nordost et Nördlich Lägern et sont considérées dans ces domaines comme «roches encaissantes». Dans le domaine Jura-Südfuss, elles constituent une roche d'accueil potentielle. Elles comprennent des marnes calcaires et des séries de bancs calcaires d'une épaisseur qui peut atteindre plus de 10 m. La corrélation de ces séries entre les forages est en partie possible.

La roche d'accueil dans le domaine d'implantation du Wellenberg (formation de Palfris, marnes de Vitznau et formations marneuses tertiaires) est constituée en grande partie de marnes qui, par le fait d'une constellation tectonique particulière, forment une couche épaisse verticale due à une d'écailles et de plis de dimensions exceptionnelles. Les intercalations de séries calcaires y sont difficilement corrélables et on pourrait y rencontrer des écailles calcaires de dimensions considérables.

Les considérations sur la géologie structurale et la tectonique spécifique aux domaines d'implantation se concentrent, dans le dossier II, sur les aspects qui revêtent une importance particulière pour la comparaison entre les domaines du point de vue de la sûreté prévue à l'étape 2 du plan sectoriel. Il s'agit plus précisément de caractériser le régime tectonique des domaines concernés, de détecter et de délimiter les éléments tectoniques régionaux et de déterminer les conditions structurales et tectoniques locales.

Le terme «régime tectonique» se réfère, au sens de l'étape 1 du plan sectoriel, à une zone présentant une situation structurale et une genèse caractéristiques. Dans les zones situées à l'intérieur d'un même régime tectonique, on s'attend à rencontrer des caractéristiques structurales et des déformations polyphasées analogues. La différenciation des régimes tectoniques effectuée pour les cinq domaines d'implantation du nord de la Suisse au cours de l'étape 1 du plan sectoriel a été confirmée par les examens approfondis de l'étape 2. Le domaine Südranden et les parties centrale et septentrionale du domaine Zürich Nordost se situent dans le Jura tabulaire oriental et la partie nord-est du bassin molassique suisse, et par conséquent au nord de la zone d'influence de la tectonique de compression associée à l'orogénèse alpine, zone qui a pu être cartographiée à l'aide de la sismique. Cette région a été relativement peu affectée sur le plan tectonique. Le secteur méridional du domaine Zürich Nordost ainsi que les domaines Nördlich Lägern et Jura Ost se situent dans la zone d'avant-pays, tandis que le domaine Jura-Südfuss fait déjà partie de la zone sub-jurassienne. Si la première zone ne présente qu'une légère superposition induite par la tectonique liée à l'orogénèse alpine, la seconde apparaît nettement plus affectée. Le domaine du Wellenberg qui, au contraire des autres domaines d'implantation, est situé au cœur des Alpes centrales entre les nappes du Drusberg et de l'Axen, a été par comparaison beaucoup plus affecté par la tectonique alpine que les domaines d'implantation proposés dans le nord de la Suisse.

Les éléments tectoniques régionaux n'ont servi à délimiter concrètement les périmètres de dépôt que dans les domaines d'implantation du nord de la Suisse. Le tracé des zones de failles, déjà déterminé en grande partie durant l'étape 1 du plan sectoriel, a pu être vérifié et précisé par le biais des données de sismique 2D, qui ont été densifiées et dont l'interprétation a été améliorée. En outre, des «zones tectoniques à éviter» ont été délimitées dans le cadre de l'étape 2 du plan sectoriel. Elles prennent en compte les failles post-paléozoïques du socle et les anticlinaux dans la couverture sédimentaire du socle cristallin.

Les conditions structurales et tectoniques locales varient nettement dans leurs détails d'un domaine d'implantation géologique à l'autre. Dans le domaine Südranden, les examens effectués dans le cadre de l'étape 2 du plan sectoriel ont confirmé que les sédiments de la couverture étaient relativement peu perturbés. Cette affirmation vaut également pour le domaine Zürich Nordost. Dans le cadre de l'optimisation du périmètre de dépôt, effectuée pour la comparaison des domaines du point de vue de la sûreté, la partie méridionale de ce dernier domaine a été déclarée «zone tectonique à éviter». Il est ressorti de l'évaluation des données de la campagne sismique 3D que les propriétés structurales de cette zone, située au-dessus de la marge septentrionale du fossé permo-carbonifère du nord de la Suisse, réactivée après le Paléozoïque, étaient défavorables. Des campagnes de terrain réalisées durant l'étape 2 pour le domaine Nördlich Lägern ont révélé que sa partie occidentale, en particulier, était affectée par la zone de failles régionales. Le secteur septentrional de ce domaine se situe également au-dessus de la bordure du fossé permo-carbonifère; il a par conséquent été désigné comme zone tectonique à éviter, comme dans le cas du domaine Zürich Nordost. Seules les limites extérieures du domaine d'implantation Jura Ost sont concernées par des éléments tectoniques régionaux; d'après les évaluations actuelles des profils sismiques, ce domaine apparaît peu perturbé. Au contraire, dans le domaine d'implantation Jura-Südfuss, les zones de failles régionales sont nettement plus prononcées. De plus, on décèle ici une déformation tectonique à

petite échelle des empilements de couches, qui est par comparaison plus marquée que dans les autres domaines. Dans le domaine du Wellenberg, les données issues de forages montrent qu'il s'y trouve une plus forte densité de petites failles que dans les domaines du nord de la Suisse. Cette région étant difficile à explorer, il n'est pas possible d'effectuer un levé systématique de ces failles à l'aide de la sismique réflexion.

Dans le but de caractériser les conditions géologiques, on a complété les modèles géologiques des domaines d'implantation proposés dans le nord de la Suisse par rapport à l'état de l'étape 1 du plan sectoriel, en y intégrant toutes les données à disposition. Pour le Wellenberg, un modèle géologique 3D mis à jour a été établi. Pour les domaines du nord de la Suisse, on observe par endroits, par rapport aux résultats obtenus à l'étape 1 du plan sectoriel, des modifications significatives de la profondeur des horizons géologiques pertinents, ceci même en tenant compte des incertitudes méthodologiques. La base de l'Argile à Opalinus, que l'on considère comme horizon de référence régional, est située, dans le domaine d'implantation Südranden, à une profondeur moindre, alors que dans le domaine d'implantation Nördlich Lägern, notamment dans sa partie occidentale, elle est localisée à une plus grande profondeur qu'on ne l'avait présumé jusque-là. Par ailleurs, en utilisant les cartes indiquant la profondeur des formations, des cartes d'isopaques (cartes d'épaisseur) ont été réalisées. Reposant essentiellement sur des données sismiques, ces dernières contiennent de plus grandes incertitudes que les informations compilées lors des forages. En tenant compte de ces incertitudes, les cartes d'isopaques confirment les informations obtenues lors de ces forages en ce qui concerne le spectre des valeurs relatives à l'épaisseur stratigraphique des roches d'accueil potentielles.

Dossier III: Evolution géologique à long terme

Le dossier «Evolution géologique à long terme» est consacré à l'étude des mouvements néotectoniques et à l'érosion au cours des 10^5 et 10^6 années (périodes considérées pour les dépôts DFMA et DHA respectivement) dans les domaines d'implantation géologiques. Il sert de base pour la comparaison des domaines d'implantation du point de vue de la sûreté en ce qui concerne les indicateurs «Conceptions de modèles sur l'évolution à long terme (géodynamique et néotectonique; autres processus)», «Sismicité», «Erosion au cours de la période considérée», «Profondeur sous le niveau du sol dans la perspective de la décompaction des roches», «Profondeur sous la surface rocheuse dans la perspective d'un surcreusement glaciaire» et «Profondeur et base d'érosion locale dans la perspective de la formation de nouveaux sillons d'écoulement fluvio-glaciaires».

Pour l'évolution géologique à long terme, les travaux de l'étape 2 du plan sectoriel ont été essentiellement axés sur l'étude de la littérature et la compilation des données existantes. Pour évaluer les aspects néotectoniques et l'érosion, on a utilisé le modèle de haute définition de la surface du sol, le modèle de la surface de la roche amélioré au cours de l'étape 2 du plan sectoriel ainsi que des données recompilées relatives à la répartition et à l'altitude des dépôts fluviaux, fluvio-glaciaires et glaciaires. En outre, des analyses géodésiques ont été effectuées pour détecter des mouvements récents de la croûte terrestre; les données actuelles sur la sismicité et l'état des contraintes ont été réunies et analysées. Au cours de cette étape, les données retraitées et densifiées émanant des campagnes sismiques 2D ont permis d'approfondir les connaissances dans plusieurs domaines, en particulier concernant la structure du socle et de sa couverture sédimentaire, ainsi que sur la profondeur des roches d'accueil potentielles dans le nord de la Suisse (cf. dossier II). Ces informations sont indispensables pour identifier les éléments tectoniques régionaux à éviter en raison de la situation néotectonique et pour évaluer la profondeur de la roche d'accueil en tenant compte de l'érosion future.

Il ressort des études de la littérature et des analyses détaillées des terrasses alluviales, effectuées à l'aide de modèles de terrain à haute résolution, que l'activité néotectonique dans la région de la Suisse septentrionale a été très faible depuis le Pliocène tardif. Une éventuelle activité néotectonique est difficile à identifier, notamment en raison de l'extrême lenteur des mouvements. Dans la plupart des cas, il n'est pas possible actuellement d'exclure toute activité néotectonique le long d'éléments tectoniques régionaux connus. Les données issues du nivellement de précision indiquent dans des cas isolés une activité néotectonique, par exemple dans la région du Jura plissé. Sur la base des informations dont on dispose sur le champ des contraintes récent dans cette région, on peut supposer que plusieurs zones de failles existantes pourraient être réactivées dans le futur, surtout sous forme de failles normales ou décrochantes. A l'heure actuelle, il est impossible de déterminer de façon définitive si une déformation future dans le nord de la Suisse affectera, comme ce fut le cas entre le Miocène inférieur et le Pliocène supérieur, prioritairement les sédiments de la couverture, ou si elle inclura également le socle, entraînant une réactivation des bordures du fossé permo-carbonifère. En se fondant sur les connaissances relatives aux régions voisines (p. ex. fossé du Rhin supérieur) et en tenant compte des incertitudes qui subsistent, il faut envisager les deux scénarios. C'est précisément en raison de ces incertitudes qu'il convient d'éviter les zones de failles régionales existantes ainsi que d'autres éléments où de futures déformations sont possibles. A l'étape 2 du plan sectoriel, dans le nord de la Suisse, on a par conséquent décrété «zones tectoniques à éviter» les zones de failles régionales dans la couverture rocheuse, mais aussi les bordures du fossé permo-carbonifère du nord de la Suisse réactivées après le Paléozoïque et les structures anticlinales; ces secteurs ont été pris en compte pour la définition du périmètre de dépôt dans le cadre de la comparaison des domaines du point de vue de la sûreté.

Le domaine d'implantation géologique du Wellenberg est, d'une manière générale, considéré comme moins favorable que les domaines du nord de la Suisse si l'on considère les modélisations relatives à la néotectonique. En l'occurrence, la tectonique polyphasée est beaucoup plus importante du fait que le domaine est situé entre deux nappes alpines. Les taux de soulèvement récents dans cette région sont nettement plus élevés que dans le nord de la Suisse, tout comme l'activité sismique, surtout dans la partie peu profonde de la croûte (< 5 - 15 km); on constate l'expression d'une activité néotectonique comparativement plus élevée. Par ailleurs, il n'est pas possible de cartographier systématiquement le domaine du Wellenberg à l'aide de la sismique réflexion (contrairement au nord de la Suisse), afin d'éviter les principales zones de failles qui seraient susceptibles d'être réactivées par de futures déformations.

Si l'on considère les domaines d'implantation sur le plan d'une érosion future, il apparaît que celle-ci va dépendre de processus endogènes (p. ex. soulèvement tectonique), mais surtout de phénomènes exogènes. Ces derniers sont liés avant tout aux conditions climatiques. Pour évaluer l'érosion future, on a envisagé un large éventail de possibilités concernant l'évolution potentielle du climat; le scénario le plus probable est cependant la poursuite des cycles glaciaires/interglaciaires, avec des poussées glaciaires répétées atteignant la bordure externe de l'avant-pays alpin. Les scénarios d'érosion ont été par conséquent basés sur l'évolution de la topographie au cours des deux derniers millions d'années, déjà caractérisée par une alternance de périodes chaudes et de périodes froides, avec une cyclicité tout d'abord de 40 000 ans, plus tard de 100 000 ans. Selon les modèles climatologiques établis pour les 10⁵ années à venir, la prochaine glaciation avec des poussées glaciaires atteignant la bordure externe de l'avant-pays alpin ne devrait pas intervenir avant 60 000 ans; en fonction des hypothèses retenues pour les émissions de CO₂ anthropogènes, cette glaciation pourrait aussi intervenir nettement plus tard.

Si l'on considère les processus d'érosion, la profondeur à laquelle se situe la roche d'accueil dans le domaine d'implantation et le périmètre de dépôt joue un rôle primordial pour la stabilité

à long terme d'un dépôt en couches géologiques profondes. D'une manière générale, plus la couverture est épaisse, meilleure est la protection du dépôt contre des effets de décompaction ou de dénudement dus à l'érosion. Au cours de l'étape 1 du plan sectoriel, l'épaisseur de recouvrement de la roche d'accueil par rapport à la surface du sol et à la surface rocheuse a été analysé. Les résultats ont ensuite servi à délimiter et évaluer des zones préférentielles. Cette approche simplifiée est partie du principe que le taux d'érosion ne montrerait pas de variations latérales, que la topographie locale serait conservée dans ses grandes lignes et que le surcreusement glaciaire s'exercerait en priorité au niveau des vallées déjà surcreusées, dont le profil se trouverait accentué. Au cours de l'étape 2 du plan sectoriel, un facteur supplémentaire a été pris en compte pour délimiter les périmètres de dépôt qui doivent être comparés du point de vue de la sûreté: il s'agit des zones situées entre des vallées principales, qui pourraient éventuellement connaître une érosion plus rapide que celles-ci. En effet, il est attesté que, lors d'une glaciation, des vallées existantes peuvent assez rapidement s'obturer ou être comblées par des dépôts. Ce phénomène peut déboucher sur la formation de nouvelles vallées surcreusées que l'on nomme «sillons d'écoulement fluvio-glaciaires». Pour tenir compte de ce processus, l'étape 2 prend en considération la profondeur de la roche d'accueil envisagée non seulement par rapport à la surface du sol et de la surface de la couverture rocheuse, mais aussi par rapport à la base d'érosion locale. L'ensemble de ces données est utilisé lors de la délimitation des périmètres de dépôt et de leur évaluation comparative.

Dans les trois domaines destinés aux dépôts DHA, l'évolution de la base d'érosion locale (genèse du creusement des cours d'eau principaux) a été reconstituée sur les derniers 2 millions d'années à partir des dépôts de cailloutis fluviaux et fluvio-glaciaires. Les causes envisagées et examinées pour les processus de creusement passés sont aussi bien endogènes (soulèvement) qu'exogènes (p. ex. un débit accru lié à des changements climatiques ou à des modifications du bassin versant). Dans le nord de la Suisse, les baisses les plus rapides et les plus marquées de la base d'érosion locale survenues au cours des derniers 5 à 10 millions d'années sont dues à des déplacements des lignes régionales de partage des eaux, en particulier la déviation de l'Aar/Danube vers le système Doubs/Rhône et finalement vers le Rhin. Une analyse à large échelle du réseau de drainage hydrographique du nord de la Suisse montre que le bassin versant du système Aar/Rhin continuera à s'agrandir par rapport au système du Danube, ceci en raison de sa plus faible altitude et parce qu'il est peu probable qu'un abaissement de la base d'érosion locale lié au déplacement des lignes régionales de partage des eaux survienne dans les 10^5 - 10^6 années à venir. En partant des réflexions sur l'évolution passée du réseau hydrologique et sur les cours d'eau actuels, plusieurs scénarios ont été ébauchés pour le développement de la base d'érosion locale à l'avenir. Ces scénarios varient selon les types de dépôts, et par conséquent les périodes considérées, et parfois aussi selon les domaines d'implantation proposés.

Le surcreusement glaciaire est un processus qui peut aussi jouer un rôle significatif en dessous de la base d'érosion locale, comme l'attestent plusieurs vallées surcreusées situées dans le nord de la Suisse. Ces vallées se trouvent avant tout dans le substrat molassique. Dans le calcaire du Jurassique supérieur (Malm), elles sont en revanche très rares et de faible profondeur. Pour atteindre une profondeur critique pour un dépôt géologique, une vallée surcreusée devrait entailler non seulement le substrat molassique, mais encore, selon le domaine d'implantation, une épaisseur de roches calcaires de plus de 200 m. Le surcreusement glaciaire a lieu en priorité là où l'épaisseur de la glace est la plus grande et le débit le plus rapide, c'est-à-dire dans les vallées et les surcreusements existants. Toutefois, en particulier en terrain plat et sur de longues périodes comprenant plusieurs cycles de glaciation, la formation de nouvelles vallées surcreusées est possible. C'est pourquoi, dans le cadre de l'étude sur le surcreusement glaciaire à l'étape 2 du plan sectoriel, on a examiné non seulement le scénario du creusement et de l'élargissement des vallées surcreusées existantes, mais aussi la formation de nouveaux

surcreusements, qui apparaîtraient en dessous du niveau d'érosion local actuel au cours de la période considérée.

Les domaines d'implantation du nord de la Suisse et les périmètres de dépôt ne sont pas tous affectés de la même manière par les scénarios d'érosion examinés, en raison des différences dans la profondeur de la roche d'accueil et le type de dépôt. Dans le cas des domaines pour dépôts DFMA, à savoir Zürich Nordost, Nördlich Lägern, Jura Ost et Jura-Südfuss, les périmètres prévus pour le dépôt peuvent être placés à des profondeurs garantissant qu'une épaisse couverture de roche d'accueil subsistera à la fin de la période de confinement, même dans l'hypothèse d'une érosion extrême. Dans le domaine pour dépôt DFMA de Südranden par contre, la couverture est comparativement faible si l'on considère la base d'érosion locale. Par ailleurs, l'existence de plusieurs vallées surcreusées est connue dans les régions environnantes. Une paléo-vallée aujourd'hui comblée par des sédiments quaternaires se situe d'ailleurs à l'intérieur du domaine d'implantation. On ne peut donc pas exclure la formation d'un nouveau sillon d'écoulement au cours de la période pertinente pour un dépôt DFMA. Dans deux domaines d'implantation pour dépôts DHA, Zürich Nordost et Nördlich Lägern, la couverture restera considérable, même si l'on applique des scénarios d'érosion extrême sur la durée nettement supérieure à prendre en considération (10^6 années). Pour le domaine pour dépôt DHA de Jura Ost, étant donné que la période à considérer est beaucoup plus longue que pour le dépôt DFMA, on a pris en compte la formation d'un sillon d'écoulement fluvio-glaciaire dans le cas d'un scénario d'érosion extrême: la couverture qui subsisterait dans ce domaine à l'issue de la période déterminante serait alors nettement plus mince.

Pour le domaine du Wellenberg, trois nouveaux scénarios d'érosion (surcreusement glaciaire de 50, 100 et 200 m) ont été élaborés à l'étape 2 du plan sectoriel afin de compléter les scénarios datant des études préalables. Pour ces scénarios, on a supposé que, à l'issue d'un surcreusement glaciaire de la vallée d'Engelberg, la partie profonde du glissement d'Altzellen, située partiellement au-dessus de la zone de dépôt, serait réactivée plus bas, de sorte que sa partie supérieure se mettrait aussi en mouvement; le glissement s'arrêterait lorsque l'angle des pentes atteindrait à nouveau un état d'équilibre par rapport au nouveau niveau de la vallée d'Engelberg comblée par les dépôts glaciaires. Du fait que la roche d'accueil dans ce domaine d'implantation se présente sous la forme d'une couche verticale de grande épaisseur due à une accumulation tectonique, on dispose d'une liberté suffisante pour déterminer la profondeur du dépôt. Il sera donc possible de répondre aux nouvelles exigences (accrues par rapport aux phases d'étude antérieures) relatives à l'érosion et à la décompaction (voir dossier VI), en plaçant le dépôt à une plus grande profondeur.

Dossier IV: Documentation sur le comportement mécanique des roches

Le dossier IV «Documentation sur le comportement mécanique des roches» présente les connaissances empiriques et expérimentales existantes relatives au comportement mécanique des roches d'accueil proposées et sur les conditions mécaniques prévisionnelles dans les domaines d'implantation envisagés. Sur la base des données de mécanique des roches disponibles, des lois de comportement mécanique générales ont été dérivées. Elles servent de base aux analyses de modélisation relatives à la construction du dépôt et à la démonstration de sa sûreté, effectuées dans le cadre de la comparaison des domaines d'implantation du point de vue de la sûreté. La documentation sur le comportement mécanique des roches comprend les éléments suivants:

- *Etat des contraintes mécaniques naturelles in-situ initiales aux échelles régionale et locale*

A cet effet, les données existantes ont été complétées par des levés de terrain relatifs aux paléo-contraintes, par des (ré)-évaluations des ovalisations de la paroi des forages et par des mesures d'hydrofracturation dans des forages plus récents. Une cartographie des contraintes mécaniques *in-situ* initiales a été établie pour le nord de la Suisse et les régions avoisinantes. Les contraintes locales ont été étudiées dans des situations choisies à l'aide de simulations numériques reposant sur une large palette de conditions aux limites tectoniques. A ce titre, en vue d'applications touchant au comportement mécanique des roches, l'évaluation de l'amplitude des contraintes principales au niveau du dépôt et des incertitudes associées ont fait l'objet d'une attention particulière.

- *Propriétés mécaniques des roches d'accueil (rigidité, résistance, consolidation et gonflement/retrait)*

De récentes expérimentations en laboratoire ont principalement porté sur des échantillons issus de carottes de forages dans l'Argile à Opalinus. Cette roche présente certains défis sur le plan géotechnique, en raison de sa faible résistance à la traction et d'une capacité de gonflement modérée. Cependant, elle possède d'excellentes propriétés de confinement et fait obstacle au transfert des radionucléides, en raison de sa forte capacité d'auto-cicatrisation. La base de données mécaniques complétée a été utilisée pour dériver des lois de comportement mécanique et leur paramètres associés, spécifiques à l'Argile à Opalinus. Ceci a permis de transposer le comportement en déformation de la roche pour les différentes situations géologiques des domaines d'implantation proposés. Les propriétés mécaniques des autres roches d'accueil potentielles ont été compilées dans un tableau.

- *Analyse géologique structurale des domaines d'implantation, à la base d'un classement de la roche d'accueil de chaque domaine d'implantation particulier en fonction des caractéristiques tectoniques dominantes («modèles types de massifs rocheux»).*

Les données recueillies à l'aide des analyses structurales des affleurements cartographiés à l'échelle régionale durant l'étape 2 du plan sectoriel, des relevés structuraux des carottes provenant de forages en profondeur ainsi que de l'interprétation des nouvelles campagnes sismiques 2D en termes de géologie structurale ont permis de dresser, pour chaque domaine d'implantation, l'inventaire des zones de failles. Des modèles types de massifs rocheux ont été établis par mise en regard des analyses structurales et des données mécaniques à disposition. Ces modèles permettent de classer l'inventaire structural de l'Argile à Opalinus résultant des caractéristiques tectoniques en fonction de la perte de sa résistance mécanique relativement à la roche intacte. L'affaiblissement anisotrope de la roche le long des plans de diaclases a été explicitement pris en compte dans cette approche.

Les données collectées sur le comportement en déformation des roches d'accueil des domaines d'implantation ont fourni des modèles conceptuels hydromécaniques et des paramètres de référence pour les analyses géoscientifiques. Il a ainsi été possible d'apprécier les conditions géotechniques d'un dépôt en profondeur et d'évaluer, du point de vue de la sûreté, les phénomènes induits par le dépôt, tout comme les effets de décompaction hydromécanique dans le cadre de l'évolution géologique à long terme. Le dossier IV traite en outre de la phénoménologie et de la conceptualisation des perturbations mécaniques de la zone proche des excavations du dépôt. Dans cet objectif, l'influence du recouvrement sur les conditions géotechniques lors de la construction d'un dépôt en profondeur a été examinée à l'aide d'instruments d'analyse simples. Par ailleurs, le dossier IV présente les résultats d'analyses de principe hydromécaniques relatives à l'auto-cicatrisation de la zone perturbée mécaniquement par le dépôt. Ces analyses permettent de quantifier, pour différentes situations géologiques,

l'impact hydraulique de la zone perturbée en phase de post-fermeture du dépôt. L'évolution à long terme de la fonction de confinement hydraulique de l'Argile à Opalinus suite à la décompaction de la roche (érosion, évolution tectonique future) a été évaluée sur la base d'évidences semi-empiriques.

Dossier V: Conditions hydrogéologiques

Le dossier V est consacré à l'analyse des «Conditions hydrogéologiques» aux échelles régionale et locale. L'accent y est mis en particulier sur les conditions qui règnent dans les aquifères profonds. Au regard des dépôts géologiques, les aquifères profonds sont susceptibles de jouer un rôle dans le transfert des radionucléides depuis la limite de la zone de confinement géologique vers la biosphère. Par ailleurs, leur caractérisation aide à mieux comprendre les conditions qui règnent dans les roches d'accueil (p. ex. la salinité de l'eau interstitielle). Il est en outre important de connaître les conditions hydrogéologiques dans les aquifères profonds du point de vue de la construction des accès au dépôt, par exemple pour estimer les éventuelles répercussions sur des exploitations d'eaux minérales ou thermales ou pour planifier la gestion des eaux souterraines. Le dossier «Conditions hydrogéologiques» a par conséquent aussi des liens avec les dossiers «Propriétés de confinement des roches d'accueil et des roches encaissantes» et «Conflits d'exploitation». S'agissant des critères et des indicateurs requis pour la comparaison des domaines d'implantation du point de vue de la sûreté, ce dossier fournit les bases nécessaires sur lesquelles reposera l'évaluation de l'indicateur «Systèmes d'aquifères» ainsi que des informations complémentaires notamment pour les critères «Conditions géochimiques», «Conflits d'exploitation», «Prévisibilité de l'évolution à long terme» et «Accès souterrain et régime hydraulique».

Le dossier part des connaissances acquises lors de travaux antérieurs et intègre des informations émanant de publications et de rapports de tiers. Les connaissances sur les conditions hydrogéologiques ont été approfondies dans le cadre de l'étape 2 du plan sectoriel, grâce aux observations qui ont pu être faites à l'occasion de divers forages et campagnes de terrain, par l'étude des publications et par la compilation de données. Les bases de données relatives à l'hydrochimie et l'hydrogéologie isotopique des eaux souterraines du nord de la Suisse ont été complétées et la situation régionale a fait l'objet d'une nouvelle évaluation détaillée. Des modèles hydrodynamiques ont été établis aux échelles régionale et locale pour analyser la situation hydrogéologique dans le nord de la Suisse. Ces modèles stationnaires ont servi à tester différents scénarios, par exemple pour mieux connaître les propriétés hydrauliques de certaines unités ou zones de failles et pour analyser des impacts potentiels, notamment sur les gradients hydrauliques, au niveau des roches d'accueil ou des zones de drainage. On dispose ainsi d'une palette de situations hydrogéologiques possibles, ce qui permet de restreindre les données d'entrée pour les analyses de sûreté. Pour le domaine du Wellenberg, on disposait déjà d'analyses détaillées de la situation hydrogéologique provenant de travaux antérieurs.

Dans le nord de la Suisse, les aquifères régionaux profonds situés au-dessus et en dessous des roches d'accueil sont ceux du Malm et du Muschelkalk. Ils délimitent par conséquent l'extension maximale de la zone de confinement géologique. Dans la partie occidentale, il faut aussi tenir compte de l'aquifère du Hauptrogenstein; celui-ci constitue la limite supérieure des formations géologiques encaissantes de l'Argile à Opalinus dans les domaines d'implantation Jura Ost et Jura-Südfuss. Dans ce dernier domaine, il forme, avec le Membre de Birmenstorf, l'aquifère le plus proche de la partie inférieure des couches d'Effingen. Localement, d'autres unités peuvent être importantes en tant que voies de drainage: dans le Keuper moyen supérieur surtout, certains éléments stratigraphiques peuvent, selon la formation lithologique, avoir caractère d'aquifère (aquifère du Keuper). En outre, les zones de failles régionales peuvent avoir un impact sur les conditions hydrogéologiques. Leur importance pour les systèmes

d'écoulement, les voies de drainage et les gradients hydrauliques dans les roches d'accueil a été analysée à l'aide de différents scénarios.

Le chapitre «Hydrochimie régionale du nord de la Suisse» commence par présenter les caractéristiques générales de chaque unité hydrogéologique du point de vue de la chimie et de l'hydrogéologie isotopique ainsi que le développement des eaux souterraines. Ces données sont ensuite utilisées pour aborder la question des systèmes d'écoulement du point de vue hydrochimique. Il ressort que, dans les domaines pas ou peu sollicités sur le plan tectonique, on observe une séparation hydraulique se traduisant par des compositions chimiques caractéristiques des eaux souterraines dans des aquifères adjacents, par exemple dans le Dogger (Argile à Opalinus, «Dogger brun»), le Lias et le «Keuper gypseux». Dans certains domaines davantage sollicités sur le plan tectonique, on relève des liaisons entre les formations, comme c'est le cas pour les eaux thermales de Baden/Ennetbaden et Schinznach Bad, qui surgissent dans la zone du chevauchement principal du Jura.

Le chapitre «Hydrogéologie du nord de la Suisse: Présentation des domaines d'implantations géologiques» fait le point sur la situation hydrogéologique générale de chaque domaine d'implantation et résume les observations correspondantes qui ont pu par exemple être faites lors de forages, sur des affleurements ou dans des constructions souterraines. Les observations relatives aux caractéristiques lithologiques locales et à d'éventuels écoulements d'eau dans des unités comparativement peu épaisses des roches encaissantes, telles que le Membre de Sissach de la formation du Passwang ou les inclusions de calcaire sableux dans le Lias, présentent ici un intérêt particulier. La liste des principales zones de drainage est dressée pour chaque région, sur la base des modélisations. Les gradients hydrauliques dans les roches d'accueil sont déterminés sur la base des analyses des scénarios issus des modèles locaux, en tenant compte des mesures de potentiels locales éventuellement disponibles.

Pour le domaine du Wellenberg, il existe une importante base de données hydrogéologiques issue des nombreux forages en profondeur et des campagnes géologiques réalisés par le passé. Ces données ont déjà été évaluées en détail et intégrées dans des modèles hydrodynamiques réalisés à diverses échelles; ces derniers partent de conceptions différentes des propriétés hydrauliques de la roche d'accueil. Il convient de relever une particularité, à savoir la zone de dépression identifiée dans les formations marneuses de l'Helvétique. Il s'agit d'un phénomène passager, fruit d'une décompression mécanique résultant de l'érosion et / ou du retrait de glaciers. On a évalué les voies de drainage en tenant compte de la dégradation à long terme de cette zone de dépression. Enfin, deux points sont soulignés, à savoir l'importance des profils géologiques mis à jour et l'emplacement du dépôt, à une profondeur supérieure à celle précédemment envisagée.

Les forages au Wellenberg ont révélé un zonage marqué des types d'eau dans les eaux souterraines, avec des différences dans les signatures isotopiques caractéristiques et les temps de résidence. En vertu de la nouvelle planification, les niveaux du dépôt se situeraient à des profondeurs où l'on s'attend à trouver des eaux de formation néoalpines. On a rencontré en partie un taux élevé de méthane dans les eaux souterraines; au vu des données disponibles, il s'agit généralement de gaz dissout; dans certaines zones, il faudra également s'attendre à trouver du gaz libre.

Dossier VI: Propriétés de confinement des roches d'accueil et des roches encaissantes

Le dossier VI «Propriétés de confinement des roches d'accueil et des roches encaissantes» présente les paramètres et les concepts qui ont été utilisés dans le cadre des calculs de doses et de la comparaison des domaines du point de vue de la sûreté, qui font l'objet de l'étape 2 du plan sectoriel. Ces données constituent la base géoscientifique des évaluations qualitatives et quantitatives de nombreux critères du plan sectoriel et des indicateurs correspondants et servent à identifier d'éventuels facteurs montrant qu'un domaine présente de nets désavantages par rapport aux autres.

Le chapitre «Propriétés de confinement des roches d'accueil» décrit les caractéristiques qui sont déterminantes pour le transfert des radionucléides au travers de ces roches. La définition des unités lithologiques se fonde sur les données présentées dans le dossier II. En se basant sur le lien avéré entre la teneur en minéraux argileux et les caractéristiques hydrauliques, on a réparti ces unités en trois catégories (teneur en minéraux argileux de respectivement < 20 %, 20 – 40 % et > 40 % du poids)

- L'Argile à Opalinus a une composition minéralogique correspondant à celle des roches argileuses et argilo-sableuses. Pour les analyses et les évaluations relatives à la sûreté, l'ensemble de l'Argile à Opalinus peut être considéré comme une seule unité lithologique ayant une teneur en argile > 40 %.
- Les résultats des analyses effectuées sur «Dogger brun», reportés dans le triangle de Füchtbauer, révèlent une composition minéralogique d'une grande variété. En vue des analyses et des évaluations du point de vue de la sûreté, on distingue ainsi trois unités lithologiques: en premier lieu, les Séries argileuses, dont la teneur en minéraux argileux est en règle générale > 40 %; elles comprennent la roche d'accueil *stricto sensu*, qui est composée de roches argileuses et de marnes argileuses des couches Parkinsoni-Wurthembergica et de la formation marneuse dite «Varians». Deuxièmement, les Séries sablo-argileuses, qui incluent des roches argileuses et des marnes fortement sableuses des formations Murchisonae-Oolith, Wedelsandstein et Humphriesioolith. Leur teneur moyenne en minéraux argileux est de 20 à 40 %. Enfin, sous le terme de Séries sablo-calcaires, on regroupe les «bancs durs» composés essentiellement de calcaires en partie sableux et d'oolithes ferrugineuses; leur teneur en minéraux argileux caractéristique est < 20 % du poids.
- Les analyses minéralogiques effectuées sur les couches d'Effingen révèlent, dans le triangle de Füchtbauer, une répartition entre les marnes calcaires (en partie sableuses), les calcaires argileux et les calcaires. Pour les analyses et les évaluations du point de vue de la sûreté, les unités lithologiques sont divisées en Séries calco-marneuses (teneur en minéraux argileux de la catégorie 20 à 40 %) et Séries de bancs calcaires (teneur en minéraux argileux de la catégorie < 20 %).
- Les résultats des analyses minéralogiques des formations marneuses de l'Helvétique (Marnes Helvétiques) présentent, dans le triangle de Füchtbauer, une composition caractéristique située dans le secteur des roches argileuses calco-sableuses, des marnes argileuses et calco-sableuses, des calcaires argileux, jusqu'à des calcaires presque purs. Du point de vue minéralogique, elles sont donc similaires aux couches d'Effingen, mais leur composition est plus variée. Les Marnes Helvétiques étant intimement imbriquées et plissées, seules deux unités lithologiques peuvent être distinguées en vue des analyses et des évaluations du point de vue de la sûreté. Les marnes, qui constituent la masse principale de la roche d'accueil, ont une teneur en minéraux argileux de 20 à 40 %. Les séries de bancs calcaires, souvent boudinés et cisailés, sont à classer dans la catégorie < 20 % de minéraux argileux.

Les examens de carottes provenant des nombreux forages effectués dans le nord de la Suisse et au Wellenberg ont permis d'analyser de multiples paramètres. Les résultats émanant de différentes méthodes d'analyse sont présentés et discutés dans le dossier VI, en mettant particulièrement l'accent sur les données concernant la porosité.

La caractérisation des eaux interstitielles s'appuie en particulier sur des examens de carottes provenant des domaines d'implantation proposés. Ces informations sont complétées par des analyses des eaux souterraines, là où elles existent, et, dans le cas de l'Argile à Opalinus, les résultats obtenus au laboratoire souterrain du Mont-Terri. Pour tenir compte d'éventuelles incertitudes ou différences entre les régions, on a utilisé des variantes de l'eau interstitielle de référence.

La caractérisation des propriétés hydrauliques se fonde sur des tests *in situ* dans des forages, des expériences sur des carottes et des observations faites dans des ouvrages souterrains. En outre, on a procédé à une comparaison systématique entre l'inventaire des structures des carottes et les résultats des tests *in situ*. Les données obtenues reflètent les propriétés des roches à des échelles différentes. Les tests en laboratoire sur les carottes indiquent, d'une manière générale, des conductivités hydrauliques très faibles pour la matrice rocheuse. Ceci montre que les perméabilités plus élevées observées pour certaines roches d'accueil doivent être le fait d'éléments tectoniques structurels discrets.

- Concernant l'Argile à Opalinus, qui est relativement homogène sur le plan lithologique, les expériences en laboratoire et les tests *in situ* sur les forages concordent (en tenant compte de petites failles et de différences dans les sous-unités lithologiques). Ces résultats suggèrent qu'il est possible de la modéliser comme un milieu à porosité homogène, où le transfert des radionucléides est dominé par la diffusion.
- Dans le cas du «Dogger brun», les tests *in situ* et les examens des carottes concordent et indiquent une très faible conductivité hydraulique dans la roche d'accueil non perturbée. Une conductivité accrue n'a été rencontrée que dans un seul cas, à savoir dans le forage Schlattingen-1, près du fossé Hegau-lac de Constance, dans un intervalle présentant deux structures ouvertes potentielles dans les formations Wedelsandstein et Humphriesoolith. Dans les Séries argileuses, on s'attend à de bonnes propriétés d'auto-cicatrisation, comme dans l'Argile à Opalinus.
- Dans les couches d'Effingen, les tests *in situ* dans la roche d'accueil non perturbée et les tests hydrauliques sur les carottes de forage montrent également une très faible conductivité hydraulique. Les coefficients K de perméabilité sont plus élevés dans les zones de failles, par exemple dans les couches Gerstenhübel du forage d'Oftringen. Les calcaires de cette unité sont très pauvres en minéraux argileux et on ne peut dès lors pas s'attendre à une bonne capacité d'auto-cicatrisation.
- Les Marnes Helvétiques sont un ensemble fissuré dont la matrice est très peu perméable. La circulation d'eau est liée exclusivement à des structures de déformation cassantes et de structures ductiles cassantes de recouvrement (réactivées). En dessous d'une zone à plus forte conductivité, épaisse de 500 à 600 m, les valeurs se situent entre 10^{-13} et 10^{-10} m/s.

Pour toutes les roches d'accueil où, dans au moins l'une des unités lithologiques, des failles ou des fractures pourraient avoir un impact sur la conductivité hydraulique, il faut se demander dans quelle mesure des forages isolés sont susceptibles de refléter l'ensemble des situations auxquelles on peut s'attendre. Pour cerner efficacement les phénomènes de transfert de fluides dans les zones comprenant des éléments tectoniques et structurels, on s'est donc appuyé sur des expériences concernant des roches similaires sur le plan lithologique et sur des réflexions conceptuelles concernant l'auto-cicatrisation des failles.

Les propriétés en matière de diffusion reposent sur des mesures effectuées en laboratoire et sur des données issues d'expériences menées sur le terrain au laboratoire souterrain du Mont-Terri. En outre, il existe un lien empirique entre la porosité et le coefficient de diffusion (*extended Archie's law*); cette approche s'appuie sur une vaste base de données internationale et permet de faire une estimation fiable des propriétés de diffusion sur la seule base de la porosité. A l'aide des profils de traceurs dans les eaux interstitielles, il est possible de procéder à une validation de ces données à l'échelle de la formation et sur de longues périodes.

Des preuves indépendantes telles que des profils de traceurs ou des potentiels hydrauliques anormaux dans les roches d'accueil attestent la capacité de confinement des roches sur de longues périodes; ils étaient aussi, par exemple dans le cas de l'Argile à Opalinus, la prépondérance du transfert des radionucléides par diffusion plutôt que par advection, tout comme l'efficacité de la roche en tant que barrière de confinement, la séparation hydraulique se traduisant par des compositions chimiques caractéristiques des eaux souterraines dans des aquifères adjacents.

Le chapitre «Capacité de confinement des roches encaissantes» traite des unités lithologiques, des paramètres des roches et des paramètres du transfert des fluides. Il s'agit ici des roches situées au-dessus de l'Argile à Opalinus dans les domaines d'implantation Jura-Südfuss et Jura Ost (formation du Passwang, couches de marnes à *Ostrea acuminata* (inférieures)) et des roches situées en dessous de l'Argile à Opalinus dans tous les domaines d'implantation du nord de la Suisse. Les unités lithologiques des autres roches désignées comme encaissantes dans les domaines Südranden, Zürich Nordost et Nördlich Lägern (Argile à Opalinus, «Dogger brun», couches d'Effingen) ont déjà été caractérisées à titre de roches d'accueil. Dans le cas des couches d'Effingen dans le domaine Jura-Südfuss et des Marnes Helvétiques au Wellenberg, il n'y a pas de roches encaissantes.

Sous l'Argile à Opalinus se situe l'unité lithologique du Lias argileux, avec des teneurs caractéristiques en minéraux argileux de 40 % et une très faible conductivité hydraulique de $\leq 10^{-13}$ m/s. Ce n'est que dans le cas du domaine d'implantation Jura-Südfuss que le Lias situé en dessous de l'Argile à Opalinus est davantage calco-sableux; on le désigne d'ailleurs par le terme de Lias calcaire. Des observations faites sur les écoulements d'eau et de gaz, en particulier au forage SB4 de Gösgen, semblent indiquer que cette unité présente une conductivité supérieure au Lias argileux.

L'unité lithologique des «Calcaires à Arietites» se compose en partie de calcaires argileux et sableux; la conductivité hydraulique mesurée dans les forages profonds de Benken, Weiach, Riniken et Schafisheim était faible. Toutefois, l'observation de zones proches de la surface ou de tunnels indique que les «Calcaires à Arietites» peuvent avoir caractère d'aquifère lorsqu'ils sont affectés par d'importantes déformations (failles, fractures).

Entre les «Calcaires à Arietites» et l'aquifère du Keuper, on trouve, au sein de l'unité lithologique du «Keuper argileux», des éléments lithologiques riches en argile et à faible conductivité.

Il se trouve des éléments qui ont caractère d'aquifère dans le Keuper moyen supérieur, en fonction des propriétés lithologiques locales. Ces éléments sont regroupés dans l'unité lithologique de l'aquifère du Keuper.

Sous l'aquifère du Keuper, on trouve des roches peu perméables, qui font partie de l'épaisse unité lithologique du «Keuper gypseux».

Les roches encaissantes situées au-dessus de l'Argile à Opalinus dans les domaines Jura Ost et Jura-Südfuss comprennent en particulier la formation du Passwang. De façon analogue au «Dogger brun», celle-ci a été subdivisée en deux unités lithologiques: les Séries calco-argileuses et les Séries sablo-calcaires. La formation du Passwang a fait l'objet de tests hydrauliques dans les forages de Riniken et Schafisheim. La conductivité s'est révélée très faible dans les deux cas. En association avec le Membre de Sissach en particulier, elle peut atteindre localement une épaisseur de plus de 10 m de séries calcaires, situées juste au-dessus de l'Argile à Opalinus, qui pourraient avoir une conductivité nettement plus élevée dans des zones fortement fissurées ou présentant de petites failles.

Le chapitre «Conceptions de modèles spécifiques à chaque domaine et paramètres pour le transport des radionucléides dans les roches d'accueil et les roches encaissantes» explique comment les conceptions de modèles ont été élaborées et précise l'ensemble de géodonnées utilisé pour l'analyse de sécurité provisoire et la comparaison des domaines du point de vue de la sûreté à l'étape 2 du plan sectoriel. Ces données reposent sur les bases présentées dans les deux chapitres précédents et tiennent compte, pour les paramètres hydrauliques, d'expériences faites dans des roches similaires. Les épaisseurs utilisées pour les unités lithologiques sont issues du dossier II.

Dossier VII: Conflits d'exploitation

Le dossier VII «Conflits d'exploitation» vise à déterminer si, actuellement ou à moyen terme, il existe à l'intérieur, au-dessus ou en dessous de la roche d'accueil, des matières premières susceptibles d'être exploitées (p. ex. sel, hydrocarbures, charbon), des exploitations d'eaux minérales ou thermales, des ressources géothermiques, des matières premières pour la construction, des minerais, etc., si ces gisements sont importants et s'il y a un risque de voir surgir des conflits d'exploitation.

Un conflit d'exploitation peut naître lorsque l'aménagement d'un dépôt en profondeur (y compris la construction des ouvrages d'accès) rend impossible ou difficile l'exploitation de ressources existantes ou s'il existe une forte probabilité d'intrusion humaine involontaire. Il s'agit par ailleurs de déterminer si l'exploration et l'exploitation de matières premières pourraient porter atteinte à la zone de confinement géologique (roche d'accueil et roches encaissantes), que ce soit en raison d'une pénétration directe de forages exploratoires dans la zone de confinement géologique ou le dépôt lui-même, ou par une atteinte indirecte résultant de mouvements induits affectant des failles ou des fractures (subsidence du sous-sol, activité sismique induite).

L'inscription, consécutive à la décision du Conseil fédéral du 30 novembre 2011, des propositions de domaines d'implantation formulées par la Nagra au cours de l'étape 1 dans le plan sectoriel «Dépôts en couches géologiques profondes», signifie aussi que les cantons appelés à délivrer des autorisations de forage ou des concessions d'exploitation doivent vérifier, sur la base de la documentation fournie par l'IFSN, si les activités envisagées pourraient compromettre la capacité de confinement des roches. A cet effet, la Nagra a élaboré, sur mandat de l'IFSN, un rapport contenant les cartes des périmètres de protection.

Les conflits d'exploitation potentiels dans les domaines d'implantation géologiques et les régions environnantes ont été analysés du point de vue des matières premières et des types d'exploitation énumérés plus haut. Les résultats sont résumés ci-après.

- *Hydrocarbures, charbon*: les conflits d'exploitation potentiels concernant l'exploitation d'hydrocarbures fossiles (gaz naturel, pétrole) et de charbon sont multiples. Ils peuvent porter sur l'exploration, les méthodes d'extraction ou les conséquences de l'exploitation.

Selon l'état des connaissances, les quatre roches d'accueil proposées dans le cadre de l'étape 1 du plan sectoriel ne contiennent pas de gisements de ressources fossiles. Aucune d'entre elles ne peut être utilisée pour l'extraction de gaz de schiste.

L'évaluation relative à la présence d'éventuels gisements de matières premières dans les formations situées en dessous des roches d'accueil montre qu'une grande partie du domaine d'implantation Zürich Nordost ne recèle pas de matières premières fossiles potentielles. En revanche, sur l'ensemble du domaine Jura Ost, du gaz naturel pourrait être présent dans les roches denses du permocarbonifère (dit tight gas plays). Il en va de même pour Nördlich Lägern, où la zone nord-ouest recèle en outre d'autres types de gisements potentiels; ceux-ci se situeraient toutefois en dehors du périmètre du dépôt. Dans le cas des domaines Jura-Südfuss et Südranden, il se pourrait qu'il y ait du gaz naturel (tight gas) dans les roches denses du permocarbonifère ainsi que du gaz de couche dans des gisements houillers. Les données disponibles sur le sous-sol profond (> 2 km) du domaine d'implantation du Wellenberg ne permettent pas d'évaluer son potentiel en matière de ressources. Cependant, si des forages profonds étaient effectués, ils le seraient à partir du fond de la vallée. Il n'y a donc pas de raison de craindre des conflits d'exploitation.

La quantité de ressources énergétiques potentielles issues d'hydrocarbures ou du charbon est considérable. Pour matérialiser ce potentiel et exploiter ces ressources de façon commerciale, il faudrait toutefois procéder à des travaux exploratoires onéreux.

Il n'y a guère de risque de conflits d'intérêts en rapport avec de tels travaux exploratoires pour découvrir des gisements d'hydrocarbures ou de charbon, pour la plupart hypothétiques, car un dépôt en profondeur sollicite peu d'espace. Des forages exploratoires peuvent être effectués en dehors du périmètre potentiel du dépôt, en respectant des distances de sécurité adéquates, sans que leurs résultats en soient affectés. Les campagnes d'exploration géophysiques (sismique réflexion, gravimétrie) ne portent pas atteinte à un dépôt en profondeur. Si l'exploration débouchait sur une exploitation, il conviendrait de respecter les distances de sécurité qui s'imposent.

- *Sel*: les informations relatives aux gisements de sel dans le nord de la Suisse ont été mises à jour et précisées au cours de l'étape 2. L'extraction du sel gemme se fait exclusivement par un procédé de lixiviation avec forages. Les couches de sel dans les domaines d'implantation se situent à une profondeur telle qu'ils n'entrent pas en ligne de compte, du point de vue actuel, pour une exploitation commerciale, ou alors tout donne à penser que leur épaisseur est très faible ou qu'ils n'existent pas. Ce n'est que dans la partie à l'extrême nord et à l'extrême ouest du domaine Jura Ost qu'une exploitation du sel pourrait être envisagée, si de futurs forages devaient révéler une épaisseur suffisante pour être économiquement viable. Ce secteur se situe toutefois nettement en dehors du périmètre du dépôt DFMA et DHA.
- *Pierres et terres, minerais*: le terme «pierres et terres» est générique (on parle aussi de non-minerais inorganiques) et recouvre différentes matières premières minérales non métalliques. Pour des raisons économiques, celles-ci ne sont extraites qu'à une faible profondeur, généralement à ciel ouvert et plus rarement dans des cavernes proches de la surface. Une atteinte potentielle à un dépôt en couches géologiques profondes est théoriquement possible, si une extraction de matières minérales devait être pratiquée, à grande échelle et sur une certaine profondeur, directement au-dessus du périmètre du dépôt.

Ces opérations pourraient entraîner une décompaction des formations rocheuses et partant une augmentation de la conductivité hydraulique des roches assurant le confinement.

Un débat public a eu lieu ces dernières années à propos d'un grand projet d'extraction de calcaires/marnes situé dans le domaine d'implantation géologique Jura Ost. Ce projet aurait pu atteindre des dimensions qui, dans le cas extrême, auraient eu des conséquences sur la délimitation du périmètre de dépôt. La demande a toutefois été retirée. Il n'y a donc pas actuellement de projet concret d'extraction de calcaires/marnes dans le domaine Jura Ost. Dans l'intervalle, les zones de protection requises pour les dépôts en couches géologiques profondes ont été déterminées.

Une exploitation économique de minerais dans les domaines d'implantation géologiques est considérée comme peu probable.

- *Exploitations d'eaux minérales et thermales*: il existe plusieurs exploitations d'eaux minérales et thermales dans le nord de la Suisse et dans les régions voisines du sud de l'Allemagne. Ces eaux souterraines proviennent en général de systèmes d'écoulement profonds. D'où la nécessité d'examiner si les accès au dépôt (c'est-à-dire à la roche d'accueil) pourraient avoir des répercussions sur ces utilisations. Il est permis d'exclure un effet négatif résultant des ouvrages aménagés dans la roche d'accueil elle-même, étant donné que ces formations présentent une très faible conductivité hydraulique.

Des atteintes aux exploitations d'eaux minérales ou thermales sont possibles pendant la phase de construction ou d'exploitation des voies d'accès, s'il existe une connexion hydraulique entre ces exploitations et les zones traversées par les accès. Les vastes études menées pendant de nombreuses années par la Nagra ont fourni des informations qui permettent de mieux comprendre les modes d'écoulement des nappes phréatiques profondes. C'est sur ces connaissances que se fondent les évaluations des conflits d'exploitation potentiels avec des exploitations d'eaux minérales ou thermales.

Une atteinte aux exploitations d'eaux minérales ou thermales due aux ouvrages d'accès peut être exclue dans la plupart des cas, étant donné que les unités hydrogéologiques concernées se situent souvent en dessous de l'Argile à Opalinus et ne seront donc pas traversées par des éléments d'infrastructure. Concrètement, il n'y a qu'une seule utilisation où un préjudice lié aux ouvrages d'accès ne peut être entièrement exclu. Il s'agit du forage d'eau thermale de Lottstetten-Nack (D) où l'eau jaillit d'un puits artésien de faible débit. Cela signifie que dans les domaines d'implantation Südranden et Zürich Nordost, il faudrait, lors de la construction des ouvrages d'accès, procéder avec les précautions requises et appliquer des mesures de surveillance appropriées lors de la traversée de l'aquifère situé dans les calcaires.

Le domaine d'implantation géologique du Wellenberg et ses environs ne compte aucune exploitation d'eaux minérales ou thermales.

- *Géothermie (en particulier géothermie profonde)*: les conflits d'exploitation potentiels en rapport avec la géothermie (profonde) sont fortement dépendants du type d'exploitation (hydrothermal ou pétrothermal), des structures géologiques concernées ainsi que de la profondeur visée par les technologies utilisées (type de stimulation).

La Société suisse pour la géothermie a établi une liste des sites pour installations géothermiques. Sur cette base, il est permis de conclure qu'il n'existe pas actuellement de conflits d'exploitation directs entre des installations existantes ou en projet et un dépôt en profondeur.

Les marges perturbées du fossé permo-carbonifère du nord de la Suisse présentent un potentiel pour de futures installations hydrothermales profondes. De ce fait, on a évité les

zones de failles connues situées sur les bordures de ce fossé lors de la définition des périmètres de dépôts à l'intérieur des domaines d'implantation; en outre, on a, pour diverses raisons, classé «zones tectoniques à éviter» les zones de failles réactivées du fossé permocarbonifère du nord de la Suisse. En d'autres termes, aucun périmètre de dépôt ne se situe au-dessus de telles zones envisagées pour une exploitation géothermique. Ainsi, dans les domaines d'implantation Zürich Nordost, Nördlich Lägern et Jura Ost, les limites des périmètres de dépôt sont en partie définies par les bordures tectonisées du fossé permocarbonifère.

Si un projet de géothermie dans les marges du fossé permocarbonifère devait être lancé à l'avenir dans ces domaines d'implantation, il faudrait veiller à respecter la distance de sécurité requise et à appliquer un programme de surveillance adéquat afin d'exclure une atteinte au dépôt en profondeur résultant de mouvements induits sur les zones de failles ou d'une activité sismique.

Un groupe d'experts pluridisciplinaire a récemment conclu que les systèmes géothermiques stimulés (ou «pétrothermaux») s'avéraient les plus prometteurs au regard de l'exploitation à long terme des ressources géothermales en Suisse; la maturité technologique de cette méthode n'est toutefois pas encore suffisante pour une utilisation commerciale.

A la différence des systèmes hydrothermaux, la géothermie pétrothermale exploite des anomalies à grande échelle dans la distribution des températures dans le sous-sol profond. Elle peut être par conséquent mise en œuvre presque partout. Il est dès lors possible de contourner aisément les périmètres des dépôts en profondeur et d'éviter ainsi les conflits d'exploitation.

- *Stockage de gaz naturel*: les travaux de recherche menés jusqu'ici n'ont révélé aucune formation se prêtant au stockage à large échelle de gaz naturel dans les domaines d'implantation proposés par la Nagra ni dans leurs environs.
- *Stockage du CO₂*: selon la dernière étude de l'OFEN, la plupart des domaines d'implantation dans le nord de la Suisse se situent en dehors des zones se prêtant au stockage de CO₂. Seul le domaine Jura-Südfuss se trouve à la limite d'une zone désignée comme favorable dans cette étude. Mais étant donné qu'un dépôt en profondeur ne nécessite qu'une petite surface, les auteurs de l'étude estiment que les conflits d'exploitation sont négligeables.

Dossier VIII: Caractérisation et exploration

Le dossier VIII «Caractérisation et exploration» décrit les bases sur lesquelles vont reposer l'évaluation de trois indicateurs servant à la comparaison des domaines d'implantation du point de vue de la sûreté, requise à l'étape 2 du plan sectoriel. Ces indicateurs sont: «Variabilité des propriétés des roches quant à leur caractérisation», «Conditions d'exploration du sous-sol géologique» et «Conditions d'exploration en surface».

Le chapitre 2 porte sur la «Variabilité des propriétés des roches d'accueil quant à leur caractérisation». La démarche, découlant d'une exigence de sûreté, vise à examiner s'il existe, dans les différentes roches d'accueil, des voies d'écoulement préférentielles susceptibles d'avoir un impact négatif sur la capacité de confinement des radionucléides, qui ne pourraient pas être localisées ou caractérisées de manière fiable. La présence de telles voies d'écoulement dépend de l'interaction entre différentes unités lithologiques comprenant des éléments structurels tectoniques. Dans des unités lithologiques ayant une capacité d'auto-cicatrisation réduite, des cheminements préférentiels peuvent aussi apparaître le long d'éléments structurels tectoniques

peu décalés. Ces derniers ne sont pas détectables à l'aide de mesures sismiques. En raison des structures internes souvent complexes de ces voies d'écoulement, leurs caractéristiques hydrauliques ne peuvent pas non plus être déterminées de manière fiable par le biais de forages. Dans les unités lithologiques à faible capacité d'auto-cicatrisation, il faut par conséquent s'attendre à rencontrer de tels éléments, qui sont pertinents pour la sûreté du dépôt, mais ne peuvent être ni localisés ni caractérisés de façon fiable. Dans les roches présentant une capacité d'auto-cicatrisation élevée, il n'y a en revanche pas lieu de craindre la présence de voies d'écoulement préférentielles qui pourraient avoir un impact négatif sur les propriétés de confinement.

L'Argile à Opalinus possède une très bonne capacité d'auto-cicatrisation et le risque d'y rencontrer des voies d'écoulement préférentielles non détectées est par conséquent très faible. Le «Dogger brun» en revanche ne présente de bonnes capacités d'auto-cicatrisation que dans sa moitié supérieure. Dans le reste de cette unité lithologique, la capacité d'auto-cicatrisation est moindre et l'on y trouve des couches de plusieurs mètres d'épaisseur (bancs durs) dont la teneur en minéraux argileux est très basse; pour ces zones, la corrélation latérale est insuffisante et elles se situent en dessous du seuil de détection des mesures sismiques. La probabilité de l'existence de voies d'écoulement préférentielles non détectées est donc plus élevée dans l'ensemble du «Dogger brun». Les couches d'Effingen sont constituées d'une alternance de marnes calcaires ayant une capacité d'auto-cicatrisation moyenne et de bancs calcaires où cette capacité est faible. La corrélation de ces unités entre les différents forages est pour une part parfaitement possible, mais, pour une autre part, s'accompagne d'incertitudes. La probabilité de rencontrer des voies d'écoulement préférentielles non détectées est considérable dans les couches d'Effingen, car cette formation présente au mieux une capacité d'auto-cicatrisation moyenne. Les formations marneuses de l'Helvétique se composent en grande partie de marnes présentant des zones de cisaillement de petite taille, dont la capacité d'auto-cicatrisation est moyenne. Les inclusions de bancs calcaires sont difficilement corrélables entre elles, des écailles calcaires de dimensions considérables peuvent en effet y être présentes. Dans les formations marneuses de l'Helvétique (surtout le long des failles), l'existence de voies d'écoulement préférentielles non décelées est potentiellement plus élevée que dans les autres domaines d'implantation.

Le chapitre 3 porte sur les «Conditions d'exploration du sous-sol géologique» et concerne notamment les possibilités d'exploration à l'aide de la sismique 3D. Ce mode d'exploration constitue la base la plus importante pour une évaluation spatiale complète de la structure du sous-sol. Les roches d'accueil envisagées dans le nord de la Suisse, à savoir l'Argile à Opalinus, le «Dogger brun» et les couches d'Effingen, sont disposées en couches qui se prêtent bien aux méthodes de sismique réflexion. Etant donné que l'Argile à Opalinus présente une grande continuité aussi bien verticale que latérale, d'éventuels décalages pertinents pour la sûreté pourront être détectés. Dans le cas du «Dogger brun», l'observation d'affleurements en surface et les résultats de forages ont indiqué la présence de modifications latérales, qu'il n'est pas possible de détecter de manière fiable au moyen des méthodes sismiques. Quant à la structure interne des couches d'Effingen, elle présente une continuité latérale suffisante, ainsi qu'il ressort de la corrélation des logs de plusieurs forages. Cependant, du fait que les successions de calcaire marneux et de bancs calcaires ont une capacité d'auto-cicatrisation restreinte, des discontinuités tectoniques mineures, qu'il n'est pas possible de détecter au moyen de méthodes sismiques, peuvent suffire à faire apparaître des voies d'écoulement préférentielles. Les formations marneuses de l'Helvétique dans le domaine du Wellenberg ne présentent que de faibles contrastes d'impédance par rapport aux roches environnantes. Qui plus est, les limites des roches d'accueil sont abruptes. Les conditions nécessaires pour une exploration sismique de la roche d'accueil et des failles éventuelles ne sont en l'occurrence pas réunies.

Cette évaluation est complétée par l'étude des conditions d'exploration du sous-sol spécifiques à chaque site, en tenant compte des roches d'accueil considérées. Les spécificités spatiales du sous-sol des domaines d'implantation sont aisées à explorer dans toutes les roches d'accueil proposées. Dans les régions où l'Argile à Opalinus et le «Dogger brun» sont envisagés comme roche d'accueil, ces formations sont intégrées dans des séquences présentant une forte réflectivité et qui permettent donc une représentation fiable de la situation tectonique. Les différences entre les domaines d'implantation sont le fait de la situation géologique locale. La géométrie des couches d'Effingen peut être interprétée à l'aide d'horizons auxiliaires locaux dans la partie orientale du domaine Jura-Südfuss. Dans le cas du Wellenberg, les conditions d'exploration du sous-sol géologique n'autorisent pas une reconnaissance satisfaisante à l'aide de campagnes sismiques 3D. Il faudra en l'occurrence avoir entièrement recours à des forages, voire à des galeries de sondage.

Le chapitre 4 traite des «Conditions d'exploration en surface», qui vise à obtenir des levés sismiques 3D à haute résolution pour l'ensemble des zones concernées. A cet effet, des études détaillées ont été réalisées et analysées pour des périmètres sismiques définis provisoirement dans les domaines d'implantation du nord de la Suisse, en vue de l'exploration de la roche d'accueil prioritaire: elles permettent d'évaluer les efforts nécessaires à la réalisation des campagnes sismiques et le risque potentiel que les couches géologiques ne soient pas réfléchies de manière adéquate. Dans tous les domaines d'implantation géologiques, une exploration fiable est possible à partir de la surface. On constate de légères différences entre les domaines ou entre certaines parties de ceux-ci, selon les conditions régnant en surface, par exemple la densité des constructions, les lits de rivières ou les infrastructures. Concernant les forages, les conditions d'exploration à la surface sont considérées comme équivalentes dans toutes les régions du nord de la Suisse, étant donné que les sites de forage sont de petites dimensions et que l'on dispose d'une marge de manœuvre suffisante pour choisir leur emplacement.

Abstracts

Dossier II: Sedimentological and tectonic conditions

Dossier II discusses the sedimentological and tectonic conditions in the geological siting regions and their surroundings. It describes the stratigraphic and sedimentological characteristics of the host rocks and their confining units as well as the structural geology and the tectonic situation in the siting regions. Maps of the depth and thickness of the host rocks in the siting regions are also presented.

The information on the sedimentological and tectonic conditions in the geological siting regions provides input for the safety-based comparison in several respects. The stratigraphic and sedimentological features of the host rocks and confining units are important for evaluating their thickness, barrier properties, ease of characterisation and partly also explorability. The latter aspects are discussed in Dossiers VI on the barrier properties of the host rocks and confining units and VIII on ease of characterisation and explorability, based on the background information provided here. Information on the structural geology and tectonic regime in the area of the siting regions is used to define regional tectonic elements that are important for delimiting the geological siting regions and the disposal perimeters located within these regions; they also influence the underground space available for the repository. Structural and tectonic characteristics, particularly the tectonic regime in the siting regions, are also considered in the evaluation of various aspects of long-term geological evolution and geomechanical properties. These aspects are discussed in Dossiers III on long-term evolution and IV on geomechanical information. The depth of the host rocks in the siting regions is important for defining the disposal perimeters that will be evaluated as part of the safety-based comparison. Aspects of long-term evolution and geomechanics as well as construction technology are taken into consideration when considering optimum depth; these are discussed in more detail in the Dossiers III and IV mentioned above (and the reports cited therein).

The database for characterisation of the sedimentological and tectonic conditions in the siting regions was improved significantly during Stage 2 of the Sectorial Plan process. The borehole data were expanded, particularly with information from a large number of new boreholes of third parties; these were mostly shallow, but geophysical logging campaigns were able to provide key data for improving the stratigraphic and sedimentological characterisation of the host rocks and the confining units. The regional 2D seismic measurements for Northern Switzerland also represent an important element of the information base. The seismic dataset already available from Stage 1 was completely reprocessed in Stage 2 and its interpretability improved. With the 2D seismic campaign 2011/12 the existing data were furthermore supplemented with 20 new seismic profiles with an improved imaging quality. The thereby increased density of the data, which is comparable for all the siting regions in Northern Switzerland, made it possible to clarify regional tectonic elements and to lay the groundwork for local revision of the geological models for the siting regions.

The host rocks in Northern Switzerland are the Opalinus Clay, the 'Brauner Dogger' claystone sequence and the Effingen Member. Together with their under- and overlying confining units, they form the so-called potential effective containment zone; this is characterised briefly in the following from stratigraphically underlying to overlying formations.

The lower confining units of the Opalinus Clay host rock consist mainly of clayey-marly and sulphate-rich sediments of the Keuper and Lias (Staffelegg Formation). Calcareous, dolomitic and sandy units occur within these sediments (Arietenkalk, Gansingen Dolomite, Stubensandstein and Schilfsandstein Formations). They are up to several metres thick and form weathering-

resistant 'hard beds' in outcrops. In the Jura-Südfuss region there is a sequence of sandy limestones and calcareous sandstones up to more than 10 m thick directly beneath the Opalinus Clay.

The Opalinus Clay consists mainly of partly strongly sandy claystones and, compared to other Mesozoic formations of Northern Switzerland, it forms a homogeneous thick layer package. There are distinct indications in the Jura-Südfuss siting region that the Opalinus Clay is less thick than in the other regions.

In the siting regions Südranden, Zürich Nordost and Nördlich Lägern, the Opalinus Clay is overlain by the 'Brauner Dogger' claystone sequence. This formation is considered as a potential host rock in the Zürich Nordost and Nördlich Lägern regions. The sequence is mainly argillaceous in composition, but contains micritic, sandy or biotrital limestones and iron oolites (so called 'hard beds') that occur isolated or in sequences and are summarised together here under the heading sandy limestone sequences. Some of these less clay-rich sequences can laterally not be correlated unambiguously. The most clay-rich homogeneous package within the 'Brauner Dogger' is located in the upper part of the unit and consists of the Parkinsoni-Württembergica strata and the Variansmergel Formation. In the Nördlich Lägern siting region, there are indications of a thicker, less clay-rich rock body in the western and eastern parts, besides the claystone sequence encountered in the Weiach borehole. In the Jura Ost and Jura-Südfuss siting regions, the upper confining units of the Opalinus Clay consist of the Passwang Formation and the marly Lower Acuminata strata. The Passwang Formation consists of several sequences of claystones, sandy and/or bioclastic marls, limestones and iron oolites. It shows clear lateral and vertical facies variations and is generally less clayey compared to the 'Brauner Dogger'.

The Effingen Member follows above the 'Brauner Dogger' in the Südranden, Zürich Nordost and Nördlich Lägern siting regions and belongs here to the confining units. It is considered as a potential host rock in the Jura-Südfuss siting region. The Effingen Member can be divided into calcareous marl sequences and limestone sequences up to more than 10 m thick. The correlation of these sequences between boreholes is partly possible.

The host rock in the Wellenberg siting region (Palfris Formation, Vitznau Marls and Tertiary marl formations) consists mainly of marls. Due to a special tectonic constellation, these have been subject to imbrication and folding to form an unusually large accumulation. Intercalations of limestone sequences are difficult to correlate and limestone wedges of considerable size could be present as exotic blocks.

The discussion of the structural geological and tectonic conditions in the geological siting regions in the present Dossier is focused on aspects that are significant for the safety-based comparison of the siting regions in Stage 2 of the Sectorial Plan process. This involves characterising the tectonic regime in the siting regions, the identification of regional tectonic elements and the local structural and tectonic conditions in the siting regions.

The term tectonic regime as used in Stage 1 of the Sectorial Plan process relates to a zone with a characteristic tectonic location and formation history. Areas within a tectonic regime can be expected to have similar structural geological and tectonic properties and overprinting patterns. The differentiation of the tectonic regime for the five siting regions in Northern Switzerland carried out in Stage 1 of the Sectorial Plan process was confirmed by the intensive investigations in Stage 2. The Südranden siting region and the central and northern sections of the Zürich Nordost region are located in the eastern Tabular Jura and the north-eastern Swiss Molasse Basin respectively and hence to the north of the seismically mappable zone of

influence of the compression tectonics associated with the Alpine “distant push” (Fernschub). This region was subject to comparatively low tectonic strain. The southern part of the Zürich Nordost siting region and the Nördlich Lägern and Jura Ost regions lie in the area of influence of the Deformed Tabular Jura, while the Jura-Südfuss siting region lies in the Subjurassic Zone. While the Deformed Tabular Jura shows only slight overprinting due to the tectonics associated with the Alpine “distant push”, the Subjurassic Zone is more strongly deformed. In contrast to the other geological siting regions, the Wellenberg siting region lies within the central Alps between the Drusberg and the Axen nappe and was subject to much stronger tectonic deformation than the siting regions in Northern Switzerland.

Regional tectonic elements can only be used for defining the disposal perimeters in the siting regions in Northern Switzerland. The trend of the regional fault zones already identified in Stage 1 was verified by the denser 2D seismic database, which has also been improved in terms of its interpretability. In addition, tectonic zones to be avoided were newly defined in Stage 2; these follow the trend of basement faults that were reactivated in post-Palaeozoic times, and anticlines within the Mesozoic sedimentary succession.

The local structural and tectonic conditions in the siting regions differ considerably in detail. In Südranden, the investigations in Stage 2 confirmed that the overburden has undergone relatively little tectonic disturbance; the same applies for the Zürich Nordost region. The southern part of this siting region is located above the northern boundary zone of the Permo-Carboniferous Trough of Northern Switzerland which was reactivated in post-Palaeozoic times and, according to the 3D seismic analysis, has less favourable structural geological properties. When optimising the disposal perimeter for the safety-based comparison this part of the siting region is identified as a tectonic zone to be avoided. For the Nördlich Lägern siting region, the explorations in Stage 2 showed a stronger influence of regional fault zones, particularly in the western part of the region. The northern part of the siting region is located above the northern boundary zone of the Permo-Carboniferous Trough of Northern Switzerland which was reactivated in post-Palaeozoic times. Similarly to the situation for Zürich Nordost, it is designated as a tectonic zone to be avoided. The Jura Ost siting region is affected by regional tectonic elements only in its outermost marginal areas and the current interpretation of the seismic profiles shows only slight disturbance. In contrast, the influence of regional fault zones is more clearly recognisable in the Jura-Südfuss siting region than previously assumed. In addition, there is also a comparatively more pronounced small-scale tectonic overprinting in this region. In Wellenberg, cored boreholes show a higher density of small-scale fault zones compared with the siting regions in Northern Switzerland. These cannot be recorded systematically because of the difficulties with exploring this region using reflection seismics.

To characterise the geological conditions in the siting regions, the geological models for the regions in Northern Switzerland were updated compared to Stage 1, taking into account all available data. An updated 3D geological model was also prepared for Wellenberg. For the siting regions in Northern Switzerland, there is a significant change in the depth of the relevant geological horizons compared to Stage 1 in some cases, even taking into account methodological uncertainties. The base of the Opalinus Clay which can serve as regional reference horizon is significantly shallower in Südranden and, in the Nördlich Lägern region, mainly in the western part, significantly deeper than previously assumed. Depth maps were also used to prepare thickness maps for the host rocks. These are based mainly on seismic data and contain greater uncertainties compared to information from boreholes. Nevertheless, they confirm the indications from boreholes concerning the regional bandwidth of the stratigraphic host rock thicknesses.

Dossier III: Long-term geological evolution

In Dossier III on long-term geological evolution, the geological siting regions are characterised in terms of neotectonic movements and erosion over the next 10^5 and 10^6 years (time periods considered for the L/ILW and HLW repositories respectively). For the safety-based comparison, this Dossier provides the background information for the indicators 'conceptual models of long-term evolution (geodynamics and neotectonics; other processes)', 'seismicity', 'erosion in the time period under consideration', 'depth below terrain as relevant for rock decompaction', 'depth below top bedrock as relevant for glacial overdeepening' and 'depth below the local base level as relevant for formation of new ice-marginal drainage channels'.

In Stage 2 of the Sectoral Plan process, the work carried out on long-term geological evolution consisted mainly of literature studies and compilation of existing data. The key datasets for evaluating neotectonics and erosion were the high-resolution digital terrain model, the revised digital elevation model of the top bedrock surface and a newly compiled dataset on the distribution and elevation of gravel deposits. In order to detect recent crustal movements, geodetic data and data on seismicity and stress state were acquired and jointly analysed. Based on the reprocessed and densified 2D seismic dataset in Northern Switzerland, the knowledge of the location of tectonic structures in the basement and in the sedimentary cover was improved and the depth of the potential host rocks in the siting areas could be mapped with greater confidence (see Dossier II). This information is of key importance for identifying regional tectonic elements to be avoided and for evaluating the depth of the host rock with respect to future erosion.

For the area of Northern Switzerland, literature studies and detailed analyses of gravel terraces using high-resolution terrain models indicate that, since the Late Pliocene, neotectonic activity was minor. Owing to the very low movement rates, however, traces of neotectonic activity are expected to be difficult to identify. Thus, ruling out neotectonic activity along known regional tectonic elements is currently not possible. Precision levelling data provide some indications of possible activity, for example in the region of the Folded Jura. Information on the recent stress field in the region implies that some pre-existing fault zones could potentially be reactivated in the future, most probably as strike-slip faults or normal faults. Whether deformation in the area of Northern Switzerland occurs mainly in the sedimentary cover, as was the case in the Early Miocene to Late Pliocene, or whether the basement is also affected, leading for example to a reactivation of the margins of the Permo-Carboniferous Trough of Northern Switzerland, cannot be fully clarified at present. Particularly when information from neighbouring regions is taken into consideration (e.g. the Upper Rhine Graben), and given the remaining uncertainties, both scenarios have to be considered. Because of these uncertainties, existing regional fault zones and other elements where future deformation would preferably occur should be avoided. In Stage 2 of the Sectoral Plan process, the margins of the Permo-Carboniferous Trough (that underwent post-Palaeozoic reactivation) and anticline structures are now considered as tectonic zones to be avoided in Northern Switzerland, along with the regional fault zones in overlying sedimentary cover. These zones, together with the remapped regional fault zones, are avoided, when defining the disposal perimeters to be evaluated in the safety-based comparison.

The Wellenberg siting region is generally seen as less favourable in terms of the conceptual understanding of the neotectonic situation compared to the siting regions in Northern Switzerland. Because of its tectonic situation between two alpine nappes, it shows higher tectonic overprinting than the siting regions in Northern Switzerland. The significantly higher recent uplift rates in this region and the higher earthquake activity mainly in the shallow crustal zone (< 5 – 15 km) are taken to be an expression of comparatively higher ongoing tectonic activity. In contrast to Northern Switzerland, systematic mapping of existing larger fault zones using reflection seismic methods is not possible in the Wellenberg region. Consequently, those

zones, where future deformations would preferentially take place, cannot be avoided based on exploration from the surface.

When evaluating the siting regions in terms of future erosion, beside endogenetic processes (e.g. tectonic uplift), also exogenetic processes play an important role. The latter are strongly influenced by climatic conditions. When evaluating future erosion, a wide spectrum of climate evolutions is considered. Thereby, the glacial-interglacial cycles with repeated glacial advances into the external alpine foreland are assumed to be the persisting pattern in the future. The key basis for deriving erosion scenarios is therefore the development of the landscape in the past 2 million years, when the climate was characterized already by alternating cold and warm periods, initially in 40 ka and later in 100 ka cycles. Climate modelling for the next 10^5 years indicates that the next major ice age with glacial advances into the external Alpine foreland is to be expected in 60,000 years at the earliest and, depending on the assumptions made regarding anthropogenic CO₂ emissions, may be significantly later.

For the long-term stability of a deep geological repository with respect to future erosion, the depth of the host rock in the siting region under consideration and particularly in the disposal perimeter within this region is of central importance. In general, the greater the overburden, the better protected a repository is against erosion-driven decompaction effects or exposure. In Stage 1 of the Sectoral Plan process, the overburden of the host rock with respect to terrain surface and with respect to bedrock surface was analysed and used for defining and evaluating preferred areas within the siting regions. This simplified approach assumed firstly a laterally constant erosion rate with the main features of the local topography remaining intact over time and secondly a preferential glacial erosion in existing valleys and bedrock overdeepenings. In Stage 2, the delimitation and evaluation of the disposal perimeters as part of the safety-based comparison, also takes into account that areas lying between main valleys could, under certain circumstances, be eroded more quickly than the valleys themselves. As a result of glaciation existing valleys can be closed and/or infilled with gravel in a relatively short period of time; subsequently, new bedrock valleys can be cut through bedrock ridges, forming so-called 'ice-marginal drainage channels'. To take into account the formation of such features in the future, the depth of the host rock under consideration is calculated not only relative to terrain and bedrock surface but now also relative to the local base level (defined by the altitude of existing fluvial bedrock valleys); this is taken into account for defining and evaluating the disposal perimeters as part of the safety-based comparison.

In the three HLW siting regions, the past development of the local base level (incision of the main rivers) was reconstructed over the past 2 million years using gravel deposits. The causes of fluvial incision in the past were considered to be both endogenetic (uplift) and exogenetic processes (e.g. increased runoff due to changes in climate or catchment area). The most dramatic and fastest lowering of the local base level in Northern Switzerland in the past 5 to 10 million years occurred due to the shift of regional watersheds, particularly associated with the diversion of the Aare-Danube into the Doubs-Rhone and finally the Rhine system. A large-scale analysis of the main drainage network in Northern Switzerland shows that the catchment area for the Aare-Rhine system will continue to grow compared to the Danube system, because of its lower elevation and that the potential for further lowering of the local base level by the displacement of the regional watersheds in Northern Switzerland in the course of the next 10^5 to 10^6 years is likely to be limited. Based on considerations of river network development in the past and the present-day network, various scenarios are formulated for the future evolution of the local base level; these differ between repository types (due to the different time periods under consideration) and partly also between siting regions.

Glacial overdeepening is an erosion process that can lower the top bedrock level significantly below the local base level, as is evidenced by several overdeepened valleys in Northern Switzerland. These occur mainly in the Molasse substrate. Glacial overdeepening in the Malm limestones exists only in few cases and reaches only a shallow depth. To become critical for a deep geological repository, a glacially overdeepened valley not only has to cut through the Molasse substrate, but, depending on the siting region, also through a limestone layer up to more than 200 m thick. Although glacial overdeepening occurs preferentially where the ice thickness and flow rates are high, i.e. in the area of existing valleys and overdeepened bedrock troughs, the potential formation of new overdeepenings has to be taken into account, particularly in flat terrain and over longer time periods with several glacial advances. Consequently, in phase 2 of the Sectoral Plan process, besides the deepening and widening of existing overdeepened valleys, the formation of completely new glacial overdeepenings reaching significantly below the lowered local base level at the end of the time of consideration is taken into account in the evaluation process of the potential siting regions.

Depending on the depth of the host rock and the repository type, the siting regions in Northern Switzerland and the disposal perimeters within these regions are affected differently by the erosion scenarios considered. In the L/ILW siting regions Zürich Nordost, Nördlich Lägern, Jura Ost and Jura-Südfuss, the disposal perimeters can be defined in terms of depth in such a way that the overburden of the host rock will remain large even after application of extreme erosion scenarios at the end of the time period under consideration. In the Südranden L/ILW siting region, the overburden relative to the local base level is comparatively small. Ice-marginal drainage channels were formed several times in the past in the vicinity and a filled valley is located within the siting region. For these reasons, the formation of a new ice-marginal drainage channel is assumed as a possibility for the time period under consideration for a L/ILW repository at the Südranden site. In the HLW siting regions Zürich Nordost and Nördlich Lägern, a considerable overburden also remains over the much longer time period under consideration (10^6 years) even when extreme erosion scenarios are applied. For the HLW region Jura Ost, the formation of an ice-marginal drainage channel is considered as an extreme erosion scenario, despite the high topographic relief and the lack of existing ice-marginal drainage channels west of the Lower Aare Valley, because of the longer time period compared to that considered for a L/ILW repository. For such a scenario, the overburden remaining at the end of the time period being considered is clearly smaller in this siting region.

In Stage 2 of the Sectoral Plan process, three new glacial erosion scenarios (additional glacial overdeepening by 50, 100 and 200 m) were developed for the Wellenberg siting region, in addition to scenarios from earlier investigations. It is assumed that, following a glacial overdeepening of the Engelberg valley, the deep-seated Altzellen slide mass that lies above the westernmost part of the repository zone will be reactivated at a deeper level and the upper slope areas will continue to slip until the equilibrium profile of the slopes has adjusted to the new level of the Engelberg valley. As the host rock in this siting region has the form of a thick, nearly vertically oriented layer caused by tectonic accumulation, the depth of the disposal zone can be selected relatively freely. The stricter requirements relating to erosion and decompaction (compared to earlier investigation phases; see Dossier VI) can therefore be fulfilled by selecting deeper disposal levels.

Dossier IV: Geomechanical data

Dossier IV on geomechanical data provides an overview of the available empirical and experimental findings on the deformation behaviour of the proposed host rocks and the geomechanical conditions expected in the potential geological siting regions. The geomechanical database is used to derive general material laws that form a basis for the analytical

modelling of construction and safety aspects as part of the safety-based comparison of the siting regions. The geomechanical information comprises the following:

- *Description of the stress regime on a regional and local scale*

For this purpose, the existing database was supplemented with field measurements of the palaeo-stress field, complementary analyses of borehole breakouts and hydrofrac measurements in recent boreholes. Updated stress maps were also prepared for Northern Switzerland and the surrounding areas. Numerical models were used to investigate the local stress conditions in selected situations for a wide range of tectonic boundary conditions. Of particular importance for geomechanical applications were the estimates of the magnitudes of the principal stress components expected at repository depth, including associated uncertainties.

- *Characterisation of the geomechanical properties of the host rocks (stiffness, strength, consolidation and swelling behaviour)*

Laboratory investigations were recently carried out on core samples from the Opalinus Clay, which is considered to be challenging in terms of construction due to its low tensile strength and its moderate swelling capacity. On the other hand, it represents an excellent transport barrier for radionuclides due to its self-sealing capacity. The extended geomechanical database was used to derive constitutive laws and associated parameter sets for the Opalinus Clay; this ensures the transferability of the findings on the deformation behaviour of the rock to the different geological situations in the proposed siting regions. The geomechanical properties were compiled in tabular form for the other host rocks.

- *Description of the structural geological conditions in the siting regions as the basis for site-specific classification of the host rock in terms of prevailing tectonic overprinting (rock models)*

Structural analyses of the outcrops mapped on a regional scale in Stage 2 and imaging of structures on core samples from deep boreholes, combined with structural geological interpretation of the new 2D seismic measurements, provided the database for a site-specific inventory of discrete structural features. A comparison of the structural analyses with the available geomechanical data was used to derive rock models that allow the structural inventory of the Opalinus Clay arising from tectonic overprinting to be classified in terms of loss of strength compared to the intact rock. The anisotropic softening of the rock along bedding planes was explicitly taken into account.

The data compiled on the deformation behaviour of the host rocks in the siting regions provide the hydromechanical conceptual models and reference data for the geoscientific analyses used for evaluating the geotechnical conditions of a deep geological repository, for the assessment of repository-induced effects and, last but not least, for the evaluation of hydromechanical unloading effects in the context of long-term geological evolution. This Dossier investigates the phenomenology and conceptualisation of unloading effects in the repository surroundings. Simple analytical tools are used to investigate the effect of overburden on the geotechnical conditions during construction of a geological repository. The results of hydromechanical analyses of self-sealing of the excavation damaged zone are also presented; these are used to perform a quantitative evaluation of the hydraulic significance of the excavation damaged zone after closure of the repository for different geological situations. Finally, the change in the hydraulic barrier function of the Opalinus Clay as a result of rock decompaction is estimated within the context of long-term geological evolution (erosion, neotectonics) using semi-empirical evidence.

Dossier V: Hydrogeological conditions

The Dossier on hydrogeological conditions analyses the hydrogeological conditions on a regional and local scale. The focus is on the conditions in the deep aquifers which, for deep geological repositories, represent potential flowpaths for radionuclides from the outer boundary of the effective containment zone into the biosphere. The characterisation of the deep aquifers also makes an important contribution to understanding the situation in the host rocks, for example with regard to porewater salinity. Knowledge of the hydrogeological conditions in deep aquifers is also important for constructing the accesses to the deep repository, for example for evaluating the potential influence on the use of mineral and thermal waters or for the planning of deep groundwater management. In this sense, the Dossier on hydrogeological conditions has connections to Dossier VI on the barrier properties of the host rocks and confining units and Dossier VII on conflicts of use. For the criteria and indicators used in the safety-based comparison of the siting regions, the Dossier provides the basic information used to evaluate the indicator 'groundwater storeys' as well as supplementary information on the criteria 'geochemical conditions', 'conflicts of use', 'predictability of long-term changes' and 'underground development infrastructure and water management'.

The Dossier is based on information from earlier work and integrates new publications and reports of third parties. As part of Stage 2 of the Sectoral Plan process, the level of knowledge of hydrogeological conditions was improved through observations in several boreholes, analyses of field observations, literature studies and data compilations. The datasets for hydrochemistry and isotope hydrogeology of the deep groundwaters of Northern Switzerland were expanded and the regional situation was re-evaluated in detail. Hydrodynamic models were developed on a regional and local scale for analysing the hydrogeological conditions in Northern Switzerland. These stationary models were used to test a range of scenarios, for example regarding the hydraulic properties of individual units or faults, and to analyse the impacts, for example, on the hydraulic gradients across the host rocks or the exfiltration zones. This allows a spectrum of potential hydrogeological situations to be identified and to constrain the input data required for the safety analyses. Comprehensive analyses of the hydrogeological situation from earlier work were already available for the Wellenberg siting region.

The Malm and Muschelkalk aquifers in Northern Switzerland form the regional deep aquifers above and below the host rocks and thus define the maximum extent of the potentially effective containment rock zone. In western areas, the Hauptrogenstein aquifer also has to be considered; this forms the upper boundary of the confining units of the Opalinus Clay in the siting regions Jura Ost and Jura-Südfuss. In the latter region, and possibly together with the Birmenstorf Member, it forms the aquifer directly below the Effingen Member. Other units may be relevant as exfiltration pathways on a local scale; in the Upper Mittelkeuper in particular, some layers can exhibit aquifer characteristics (Keuper aquifer), depending on their lithological composition. Regional fault zones can also influence the regional hydrogeological conditions. The significance of these zones for flow systems, exfiltration locations and gradients across the host rocks was investigated in the context of scenario analyses.

In the chapter on the regional hydrochemistry of Northern Switzerland, the first step is to present the general chemical and isotope hydrogeology characteristics for each hydrogeological unit, as well as the evolution of the deep groundwaters. This then forms the basis for discussion of flow systems from a hydrochemical perspective. In areas not or only slightly affected by tectonics, the groundwater shows aquifer specific hydrochemical characteristics (groundwater storeys) that underpin the efficient separation effect of the aquitards, for example in the Dogger (Opalinus Clay, 'Brauner Dogger'), Lias and Gipskeuper. In areas more strongly affected by tectonics, connections that partly extend beyond single formations can be observed, for example

the well known thermal water springs of Baden/Ennetbaden and Schinznach Bad located on the Jura Main Thrust.

In the chapter on the site-specific hydrogeology of Northern Switzerland, the general hydrogeological situation is characterised for each siting region and hydrogeologically relevant observations (for example in boreholes, outcrops or underground structures) are summarised. Of particular interest here are observations of the local lithology of the confining units and associated hydrogeological observations, for example in the Sissach Member of the Passwang Formation or sandy-limestone-rich intercalations in the Lias. The main exfiltration areas are listed for each region based on the modelling studies. The hydraulic gradients across the host rocks are defined based on scenario analyses using the local models, taking into account any available local measurements of hydraulic potential.

Thanks to the numerous boreholes and field investigations, an extensive hydrogeological database exists for the Wellenberg siting region. This has already been analysed in detail and integrated into hydrodynamic models on different scales. These also include different conceptual approaches for the hydraulic properties of the host rock. One particular feature is the underpressure zone encountered in the Helvetic Marls. This is a transient phenomenon associated with mechanical unloading due to erosion and/or glacier retreat. The exfiltration pathways are evaluated taking into account the reduction of this underpressure zone on the long term. The significance of the geological profiles that were reworked for Stage 2 and the deeper disposal level (compared to earlier planning) are also discussed.

A marked zoning of the types of deep groundwaters was observed in the deep boreholes at Wellenberg; this includes characteristic isotope signatures and residence times. According to the most recent plans, the disposal zones would be located at levels where neoalpine formation water is expected. High methane contents were also encountered in some of the deep groundwaters – available data indicate that this is dissolved gas, but free gas also has to be expected in some zones.

Dossier VI: Barrier properties of the host rocks and confining units

Dossier VI on the barrier properties of the host rocks and confining units describes the parameters and concepts used for the dose calculations and the safety-based comparison of the siting regions as part of Stage 2 of the Sectoral Plan process. This forms the geoscientific basis for the qualitative and quantitative assessment of the numerous criteria set out in the Sectoral Plan together with the associated indicators, and for identifying any clear disadvantages.

The chapter on the barrier properties of the host rocks includes a characterisation of the host rocks with regard to the properties that are relevant for radionuclide transport. The definition of the lithofacial units is based on the information presented in Dossier II; they are divided into three categories based on experience regarding the connection between clay mineral content and hydraulic properties (< 20, 20 – 40 and > 40 wt.%):

- The mineralogical composition of the Opalinus Clay lies in the range of claystones and sandy claystones. For the purpose of the provisional safety analyses, it can be considered as a single lithofacial unit with a clay mineral content > 40 wt.%.
- The mineralogical analyses of the 'Brauner Dogger' show considerable variation in the Füchtbauer triangle. For the purpose of the provisional safety analyses, three lithofacial units are distinguished: the Clay-rich sequences generally with > 40 wt.% clay minerals comprise the host rock sensu stricto consisting of claystones and clay-rich marls of the Parkinsoni-Württembergica strata and the Variansmergel Formation. The Sandy-clay-rich

sequences include the sandy claystones and marls of the Murchisonae-Oolite, Wedelsandstein and Humphriesioolite Formations, with an average clay mineral content between 20 – 40 wt.%. The term Sandy limestone sequences includes so-called 'hard beds' consisting mainly of sandy limestones and iron oolites with characteristic clay mineral contents < 20 wt.%.

- The mineralogical analyses of the Effingen Member fall into the fields of (partly sandy) calcareous marls, clay-rich limestones and limestones within the Füchtbauer triangle. For the purpose of the provisional safety analyses, a distinction is made between the lithofacial units Calcareous marl sequences (clay mineral content 20 – 40 wt.%) and Limestone sequences (clay mineral content < 20 wt.%).
- The mineralogical analyses of the Helvetic Marls lie typically in the area of calcareous-sandy claystones, sandy clay-rich and calcareous marls, clay-rich limestones to almost pure limestones in the Füchtbauer triangle and thus have a similar composition to the Effingen Member, but with more variability. The Helvetic Marls are so strongly imbricated and folded that they are divided into only two lithofacial units for the purpose of the provisional safety analyses. The Marls, which make up the main mass of the host rock, fall into the category with a clay mineral content of 20 – 40 wt.%. The Limestone sequences are often boudinated and sheared off and fall into the category with a clay mineral content of < 20 wt.%.

Investigations on drillcores from a number of deep boreholes in Northern Switzerland and Wellenberg have provided analytical results for a large range of parameters. The results for porosity in particular acquired using a range of different methods are presented and discussed.

The characterisation of the porewaters is based mainly on investigations on drillcores from the siting regions. Where available, analyses of groundwaters and, for the Opalinus Clay, results from the Mont Terri Rock Laboratory are also included. Possible regional differences and uncertainties are taken into account by considering variants of the reference porewater.

The characterisation of the hydraulic properties is based on in situ tests in boreholes, experiments on drillcores and observations in underground installations. A systematic comparison was also carried out of the structural inventory from drillcores and the results of in situ tests. The datasets describe the rocks on different scales. Laboratory tests on drillcores give a generally very low hydraulic conductivity for the rock matrix and thus indicate that the increased conductivities observed for a few host rocks must be due to discrete tectonic-structural elements.

- For the lithologically relatively homogeneous Opalinus Clay, the good agreement between the very low hydraulic conductivities determined in laboratory experiments and in situ tests in boreholes (taking into account small faults and differing lithofacial sub-units) indicates that it is appropriate to model it as a homogeneous-porous medium with diffusion-dominated transport.
- For the 'Brauner Dogger', in situ tests and investigations on drillcores both show a very low hydraulic conductivity of the undisturbed host rock. Only in the borehole Schlattingen-1, which is located close to the Hegau-Bodensee Graben, was an increased conductivity encountered in an interval with two potentially open structures in the Wedelsandstein and Humphriesioolite Formation. Efficient self-sealing is expected in the Clay-rich sequences, similarly to the Opalinus Clay.
- For the Effingen Member, in situ tests in the undisturbed host rock and hydraulic tests on drillcores show very low hydraulic conductivities. Increased hydraulic conductivities are

found in fractured zones, for example in the Gerstenhübel Beds in the Oftringen borehole. The limestones of this unit have an extremely low clay mineral content and no relevant self-sealing capacity is expected.

- The Helvetic Marls are a fractured medium with a very low hydraulic conductivity matrix. Water flow is associated exclusively with brittle deformation structures and ductile structures that have undergone brittle overprinting (reactivation). Beneath a 500 – 600 m zone with increased hydraulic conductivities, the values are in the range of 10^{-13} to 10^{-10} m/s.

For all the host rocks for which faults or joints could be hydraulically active in at least some lithofacial units, the question arises to what extent individual boreholes can cover the expected bandwidth. To obtain a robust estimate of the transmissivities of tectonic-structural elements, experience from other lithologically similar rocks and conceptual considerations of self-sealing of faults are also taken into account.

The diffusion properties are based on measurements in the laboratory and on data acquired in field experiments in the Mont Terri Rock Laboratory. There is also an empirical correlation between the porosity and the diffusion coefficient (extended Archie's law). This approach is based on an extensive international database and allows a robust estimate to be made solely on the basis of porosity. Porewater tracer profiles allow validation on the formation scale and over long timescales.

Independent evidence such as tracer profiles or anomalous hydraulic potentials in the host rock confirm the effective containment function of the host rocks over very long time periods and underpin – for example in the case of the Opalinus Clay – the dominance of diffusive over advective solute transport, as well as the fact that the hydraulic barrier function results in a marked groundwater storey structure.

In the chapter on the barrier properties of the confining units, the lithofacial units, rock parameters and transport parameters are derived and defined. The units in question are the upper confining units of the Opalinus Clay in the siting regions Jura Ost and Jura-Südfuss (Passwang Formation, Lower Acuminata strata) and the lower confining units of the Opalinus Clay in all the siting regions in Northern Switzerland. The lithofacial units of the rest of the rocks identified as confining units in the siting regions Südranden, Zürich Nordost and Nördlich Lägern (Opalinus Clay, 'Brauner Dogger' and Effingen Member) have already been characterised as host rocks. The Effingen Member in the Jura-Südfuss siting region and the Helvetic Marls in the Wellenberg siting region have no confining units.

The lithofacial unit Clay-rich Lias beneath the Opalinus Clay has typical clay mineral contents of 40 wt.% and very low hydraulic conductivities of $\leq 10^{-13}$ m/s. Only in the Jura-Südfuss siting region is the Lias beneath the Opalinus Clay comparatively sandy and calcareous and is therefore designated as Limestone-rich Lias. Observations of water and gas flow, particularly in the borehole Gösgen SB4, indicate that this unit has an increased hydraulic conductivity compared to the Clay-rich Lias.

The lithofacial unit 'Arietenkalk' consists of partly clayey and sandy limestones and showed low conductivities in the Benken, Weiach, Riniken and Schafisheim boreholes. On the other hand, evidence from near-surface zones and tunnels indicates that the 'Arietenkalk' can exhibit the characteristics of an aquifer when associated with strong deformation (faults, joints).

Between the 'Arietenkalk' and the Keuper aquifers clay-rich lithologies with low conductivity again occur in the lithofacial unit Clay-rich Keuper.

In the Upper Middle Keuper there are units that could exhibit aquifer characteristics depending on the local lithological composition. These are summarised together as the lithofacial unit Keuper aquifer.

Below the Keuper aquifer there are low conductivity rocks that are summarised together as the thick lithofacial unit 'Gipskeuper'.

The upper confining units of the Opalinus Clay in the siting regions Jura Ost and Jura-Südfuss include mainly the Passwang Formation. Similarly to the 'Brauner Dogger', this was divided into the lithofacial units Sandy-clay-rich sequences and Sandy limestone sequences. The Passwang Formation underwent hydraulic testing in the Riniken and Schafisheim boreholes, resulting in both cases in very low conductivities. With the Sissach Member in particular, it shows a locally pronounced limestone sequence over 10 m thick directly above the Opalinus Clay, which could show significantly higher hydraulic conductivities in areas with stronger jointing or small faults.

The chapter on site-specific conceptual models and parameters for radionuclide transport in the host rock and confining units presents the derivation of conceptual models and the geodatabase for the provisional safety analyses and the safety-based comparison in Stage 2 of the Sectoral Plan process. This is based on the information presented in the two preceding chapters and takes into account experience with similar rock types for the hydraulic parameters. The thicknesses presented for the lithofacial units are based on the information presented in Dossier II.

Dossier VII: Conflicts of use

Dossier VII on conflicts of use discusses whether resources that are commercially exploitable either from a present-day viewpoint or in the foreseeable future (e.g. salt, hydrocarbons, coal), mineral and thermal water sources, geothermal resources, raw materials for the construction industry, ores, etc. occur within, above or below the host rock and to what extent conflicts of use could arise.

A conflict arises when the use of resources is made more difficult or impossible by a deep geological repository (including its underground access structures) or when there is a significant likelihood of unintentional human intrusion into the repository. Whether the exploitation and use of raw materials could have an adverse effect on the barrier function of the effective containment zone (host rock and confining units) is also discussed; this could occur either through direct penetration into the effective containment zone or the repository itself by exploratory boreholes or indirectly due to induced movement along faults (subsidence of the bedrock, induced seismicity).

With the decision of the Federal Council of 30th November 2011 to adopt the siting regions proposed by Nagra in Stage 1 into the Sectoral Plan process, it was also decided that the Cantons would be responsible for checking, in the case of drilling permits or concessions, whether the proposed activities could present a risk to the barrier function of the effective containment zone. These checks are based on documentation provided by ENSI and a report prepared by Nagra with maps showing protection zones.

Potential conflicts of use within, and in the close vicinity of, the geological siting regions were analysed for the raw materials and types of usage mentioned above. The results are summarised below.

- *Hydrocarbons, coal*: Potential conflicts of use in terms of mining and conveying of fossil hydrocarbon resources (natural gas, oil) and coal are complex in nature. They relate to exploration, conveying methods and the consequences of the mining activities.

No deposits of fossil raw materials are known in the four host rocks proposed in Stage 1 of the Sectoral Plan process and none of them has the potential for exploitation of shale gas.

Evaluation of the possible occurrence of raw materials beneath the host rock shows that only the Zürich Nordost siting region shows no potential for fossil raw resources over large areas. There is a potential for natural gas in the tight rocks of the Permo-Carboniferous (so-called tight gas plays) in the whole of the Jura Ost siting region. The same applies for the Nördlich Lägern siting region; the north-western boundary of this region also lies in an area with other potential types of deposit but these are outside the disposal perimeter. There is a speculative potential for natural gas in the tight gas plays of the Permo-Carboniferous in the Jura-Südfuss and Südranden regions, as well as coalbed methane in the carboniferous coals. The data on the deep underground (> 2 km) in the Wellenberg siting region are insufficient to allow the potential for natural resources to be assessed. However, because deep boreholes would be drilled from the valley floor there are no indications that there would be a conflict of use.

The volumes of potential energy resources based on hydrocarbons and coal are considerable, but costly exploration work would be necessary to demonstrate this potential and its economic significance.

With regard to exploration of the largely speculative hydrocarbon and coal reserves, no concrete conflicts of interest are expected because of the small footprint of a geological repository. Exploratory boreholes could be drilled outside the potential disposal perimeters (with appropriate safety distances) without any significant loss of relevant information. A repository would not be adversely affected by geophysical exploration campaigns such as reflection seismics and gravimetric surveys, although appropriate safety distances should be observed.

- *Salt*: The information on salt deposits in Northern Switzerland was updated for Stage 2 of the Sectoral Plan process. Rock salt is mined exclusively by the leaching extraction process using boreholes. The salt deposits in the vicinity of the siting regions are generally so deep that they do not come into question for commercial exploitation today, or there are indications that they are very small or even completely absent. Salt extraction would only come into question in the very northern and western parts of the Jura Ost siting region if future boreholes indicated a commercially viable thickness of the deposits. However, these areas would lie clearly outside the HLW and L/ILW disposal perimeters.
- *Stone and earth, ores*: The collective term stone and earth (also 'inorganic non-ores') includes various non-metallic mineral raw materials such as stone and earth mined for the building industry. For commercial reasons, these materials are extracted only close to the surface, mostly through open-pit mining and rarely in near-surface caverns. Potential adverse effects on a deep geological repository would be conceivable if extensive, deep extraction of mineral resources were to take place directly above the disposal perimeter. This would lead to decompaction of the rock and a corresponding increase in the hydraulic conductivity of the effective containment zone.

In recent years, there has been a public debate in the Jura Ost siting region regarding a large-scale limestone/marl quarrying project. In the extreme case, this project would have reached dimensions that could have had an influence on the definition of the disposal perimeter. However, plans for the project have been withdrawn, meaning that there are

presently no such concrete projects for the Jura Ost region. In the meantime, the protection zones for deep geological repositories have also been defined.

Commercial extraction of ores in the geological siting regions is thus considered to be unlikely.

- *Mineral and thermal waters:* Mineral and thermal water resources are exploited at several locations in Northern Switzerland and in neighbouring southern Germany. The groundwaters typically originate from deep flow systems and it therefore has to be considered whether the accesses to the deep repository (host rock) would influence these uses. Because of the very low hydraulic conductivity of the host rock, any influence from structures in the host rock itself can be ruled out.

Use of mineral and thermal waters could be influenced during the phase of constructing or operating the accesses to the repository if a hydraulic connection is established between these uses and the areas passed through by the repository access infrastructure. Extensive investigations carried out by Nagra over many years have provided a wealth of information on the flow conditions of deep groundwaters; this knowledge provides the basis for evaluating potential conflicts of use associated with mineral and thermal waters.

In most cases, an influence of the underground access structures on mineral and thermal waters can be ruled out because the relevant hydrogeological units mostly lie beneath the Opalinus Clay and are not passed through. Considered overall, there is only one case where an influence from the underground access structures cannot be completely ruled out, namely the thermal water borehole (artesian outflow) at Lottstetten-Nack (Germany) which has a small delivery into a well. In this case, appropriate preventive and monitoring measures would have to be taken when passing through the Malm aquifer if the underground access structures are constructed in the Südanden and Zürich Nordost siting regions.

There are no uses of mineral or thermal waters in the Wellenberg siting region and its surroundings.

- *Geothermal energy (particularly deep uses):* Potential conflicts of use with respect to deep geothermal energy sources depend to a large extent on the type of use (hydrothermal, petrothermal), the geological target structures and target depth and the technology being used (type of stimulation).

The sites for geothermal installations listed by the Swiss Association for Geothermal Energy indicate that there are presently no direct conflicts of use between existing and currently planned geothermal projects and a deep geological repository.

A potential target area for future deep hydrothermal installations is the peripheral faults of the Northern Swiss Permo-Carboniferous Trough. These peripheral faults were deliberately avoided when defining the disposal perimeters in the siting regions and boundary zones of the Trough reactivated after the Palaeozoic were designated as tectonic zones to be avoided for several reasons, i.e. there are no disposal perimeters directly above such geothermal target areas. In the siting regions Zürich Nordost, Nördlich Lägern and Jura Ost, the disposal perimeters are partly bounded by fault zones at the Trough periphery.

If a geothermal project were to be initiated in peripheral fault zones of the Trough in the future, a safety distance would have to be respected in these areas and monitoring programmes put in place to rule out any adverse effects on the repository due to induced movements along faults and seismic activity.

According to a recent assessment by a group of experts, petrothermal systems are the most promising option in terms of successful long-term development of Swiss geothermal

resources. However, due to existing technical problems, development of these systems is not yet sufficiently advanced to make them viable on the market.

In contrast to hydrothermal systems, petrothermal systems use large-scale heat anomalies deep underground and can be set up practically anywhere. For this reason, there are many opportunities to avoid potential conflicts of use with geological repository projects.

- *Natural gas storage*: Research into storage possibilities in the wider surroundings of the geological siting regions proposed by Nagra has not identified any formations that would be suitable for large-scale storage of natural gas.
- *CO₂ storage*: A recent study by the Swiss Federal Office of Energy (SFOE) shows that most of the siting regions in Northern Switzerland lie outside zones that are potentially suitable for CO₂ storage. The Jura-Südfuss siting region is the only one that is located at the edge of the zone designated as suitable in the SFOE study. However, because a geological repository has only a small footprint, the authors of the study consider the potential for conflict of use in this case to be negligible.

Dossier VIII: Ease of characterisation and explorability

Dossier VIII on 'ease of characterisation and explorability' describes the background information used to evaluate three indicators for the safety-based comparison of Stage 2 of the Sectoral Plan process: 'variability of rock properties with respect to their ease of characterisation', 'exploration conditions underground' and 'exploration conditions at the surface'.

Chapter 2 discusses the 'variability of host rock properties with respect to their ease of characterisation'. As part of a safety-oriented approach, it is checked for the individual host rocks whether preferential flowpaths with unfavourable radionuclide retention properties could occur that cannot be located or characterised reliably. The occurrence of such flowpaths depends on the interaction of a range of different lithofacies units with tectonic-structural elements. Preferential flowpaths can also occur along tectonic-structural elements with very slight displacements in lithofacies units that have a reduced self-sealing capacity. These elements cannot be identified using seismic methods and, because of their usually complex internal structure, they cannot be characterised hydraulically with any degree of reliability using boreholes. In lithofacies units with a reduced self-sealing capacity, it therefore has to be expected that such safety-relevant elements can occur, but that they cannot be located or characterised reliably. In rocks with a high self-sealing capacity, no preferential flowpaths with unfavourable radionuclide retention properties are expected.

The Opalinus Clay has very good self-sealing properties and the potential for undetected preferential flowpaths is therefore very low. The 'Brauner Dogger' has good self-sealing properties only in its upper half. In the remaining part there are metre-thick intercalations (hard banks) with partly very low clay mineral contents that cannot be correlated laterally sufficiently well and lie below the seismic resolution capacity. The potential for undetected preferential flowpaths is therefore increased over the entire 'Brauner Dogger'. The Effingen Member consists of alternating calcareous marl sequences with an average self-sealing capacity and limestone sequences with a poor self-sealing capacity. Correlation of the sequences between boreholes is possible to some extent, but there are uncertainties. The potential for undetected preferential flowpaths in the Effingen Member is therefore considerable because it has at best an average self-sealing capacity. The Helvetic Marls consist to a large extent of sheared marls with an average self-sealing capacity. Intercalations of limestone sequences are difficult to correlate and limestone wedges with large dimensions can occur as tectonic inclusions of foreign rock.

The potential for undetected preferential flowpaths in Helvetic Marls, particularly along fault zones, is therefore higher than in other siting regions.

Chapter 3 considers the 'exploration conditions underground'. Important in this respect is the possibility of exploration using 3D seismic methods. The ability to investigate using 3D seismics is the most important criterion for achieving a spatially comprehensive analysis of the structural situation underground. The host rocks being considered in Northern Switzerland – Opalinus Clay, 'Brauner Dogger' and the Effingen Member – lie regionally in a highly reflective layer stack that can be imaged reliably using seismic methods. The Opalinus Clay has a good vertical and lateral continuity and safety-relevant displacements can thus be detected reliably. In the 'Brauner Dogger', investigations in outcrops and boreholes have shown lateral lithological changes that cannot be detected reliably using seismic methods. The internal structure of the Effingen Member has a sufficient lateral continuity, as has been demonstrated by log correlations from several boreholes. However, as the calcareous marl sequences and limestone sequences have a restricted self-sealing capacity, small tectonic displacements which cannot be located using seismic methods could result in formation of preferential flowpaths. The Helvetic Marls in the Wellenberg siting region show only small impedance contrasts with the surrounding rock; added to this is the fact that the host rock boundaries are steeply dipping. The requirements for seismic investigation of the host rock and any faults present are therefore not fulfilled in this case.

For the site-specific evaluation of exploration conditions underground, the host rocks that come into question are considered individually. The underground spatial conditions in the siting regions show good explorability for all the host rocks. In the areas where they are considered as host rocks, the Opalinus Clay and the 'Brauner Dogger' are embedded in a sequence of reflective layers, which allows reliable imaging of the tectonic situation. Differences between the individual siting regions are the result of the local geological situation. The geometry of the Effingen Member in the eastern part of the Jura-Südfuss siting region can be interpreted using local auxiliary horizons. The underground in the Wellenberg siting region cannot be investigated meaningfully using 3D seismics. Here, investigations have to rely completely on boreholes or even exploratory drifts.

Chapter 4 presents the basic requirements for the 'exploration conditions at the surface' in terms of being able to use high-resolution 3D seismics over large areas. Detailed studies were carried out on the measurement effort required and the risk of insufficient seismic fold for provisionally defined seismic perimeters for the geological siting regions in Northern Switzerland when exploring the primary host rock. A reliable explorability from the surface exists in all the siting regions. There are slight differences for the individual regions or parts of them, depending on surface conditions such as population density, river courses or infrastructure. The exploration conditions at the surface for borehole investigations are good for all the siting regions in Northern Switzerland given the small dimensions of the drillsites and the existing flexibility regarding their location.