

Zusammenfassung

Der vorliegende Bericht (Geosynthese-Bericht) ist integraler Bestandteil der Dokumentation zum Entsorgungsnachweis, welcher zum Ziel hat, die grundsätzliche Machbarkeit der geologischen Tiefenlagerung von abgebrannten Brennelementen (BE), hochaktiven verglasten Abfällen (HAA) und langlebigen mittelaktiven Abfällen (LMA) in der Schweiz nachzuweisen. Der Geosynthese-Bericht weist die genügende Ausdehnung des Wirtgesteins Opalinuston in einem potenziellen Standortgebiet im Zürcher Weinland nach (Standortnachweis) und dokumentiert die geowissenschaftlichen Grundlagen für die Beurteilung der Langzeitsicherheit eines geologischen Tiefenlagers im Opalinuston (Nagra 2002b) sowie für die Abklärung der bautechnischen Machbarkeit (Nagra 2002a). Dazu wird das wissenschaftliche Verständnis der geologischen Entwicklungsgeschichte des Untersuchungsgebiets und der in der Geosphäre ablaufenden Prozesse aufgezeigt. Daraus wird ein Spektrum der zukünftigen Entwicklung des geologischen Umfelds abgeleitet. Die Grundlagen für die Beurteilung der Langzeitsicherheit und der bautechnischen Machbarkeit basieren auf detaillierten standortbezogenen Untersuchungen, spezifischen Labor- und Feldversuchen, praktischen Erfahrungen in Untertagebauten und – wo möglich – unabhängigen Konsistenzprüfungen und Vergleichen mit anderen Tongesteinen (z.B. ausländische Felslabors, Erfahrungen Erdölindustrie). Zusätzlich wird das wissenschaftliche Verständnis anhand konzeptueller Modelle und Modellrechnungen aufgezeigt. Die hergeleiteten Referenz-Datensätze (Referenztiefe des Lagers 650 m) werden fallweise durch pessimistische Werte, konservative Annahmen oder Bandbreiten von Parametern ergänzt.

In einem breit angelegten schrittweisen Evaluations- und Einengungsverfahren, welches in enger Begleitung und im Konsens mit den Aufsichtsbehörden und ihren Fachexperten erfolgte, wurde der Opalinuston (eine rund 180 Millionen Jahre alte marine Tonsteinformation) 1994 als prioritäre Sediment-Wirtgesteinsoption und das Zürcher Weinland als Gebiet erster Priorität für standortbezogene Erkundungen bestimmt. Aus sicherheits- und bautechnischen Überlegungen wurde ein geologisch einfaches, tektonisch ruhiges Gebiet mit Opalinuston im Tiefenbereich von 400 bis 900 m gesucht. Das Verfahren basierte auf einer integralen Auswertung von Untersuchungen der Nagra und der Erdölindustrie in der Nordschweiz (Tiefbohrungen, 2D-Seismik, thematische regionale Studien) sowie publizierten geologischen Karten und Fachartikeln. Nach 1994 erfolgte eine detaillierte Charakterisierung des Wirtgesteins und des potenziellen Standortgebiets. Die Hauptpfeiler dieses Untersuchungsprogramms waren eine 3D-Seismikkampagne im Zürcher Weinland auf einer Fläche von rund 50 km², eine Sondierbohrung (Benken), Experimente im Rahmen des internationalen Forschungsprogramms im Felslabor Mont Terri (Kanton Jura) sowie regionale Vergleichsstudien an Opalinuston und Vergleiche mit ausländischen Tonvorkommen, welche im Hinblick auf die geologische Tiefenlagerung untersucht werden. Dank der guten Kenntnis und Homogenität der Lithologie des Opalinustons lassen sich Parameter, welche an anderen Lokalitäten erhoben worden sind, auf das Untersuchungsgebiet im Zürcher Weinland zuverlässig übertragen. Dabei werden die unterschiedlichen lokalen gesteinsunabhängigen Randbedingungen (z.B. unterschiedliche Überlagerung des Wirtgesteins, unterschiedliche Gebirgsspannung) berücksichtigt.

Erfüllung der Grundanforderungen an das geologische Umfeld eines Tiefenlagers

Basierend auf der Synthese der regionalen und lokalen geowissenschaftlichen Untersuchungen wird nachgewiesen, dass das ausgewählte Gebiet im Zürcher Weinland die Grundanforderungen an ein Standortgebiet für ein geologisches Tiefenlager (vgl. HSK 1999) erfüllt, und dass bezüglich der Wirtgesteinsoption Opalinuston auch das geologische Umfeld vorteilhaft ist. Die wichtigsten Eigenschaften sind:

- **Geologische Langzeitstabilität:** Das Untersuchungsgebiet liegt am Rand des Einflussbereichs der Alpen, ist tektonisch leicht kompressiv beansprucht, aber nicht signifikant deformiert. Es liegt zudem in einem der seismisch ruhigen Gebiete der Schweiz, mit einer geringen Hebungs- und Erosionsrate, ohne erhöhten Wärmefluss.
- **Günstige Wirtgesteinseigenschaften:** Das Wirtgestein ist im Untersuchungsgebiet in genügender Mächtigkeit und lithologischer Homogenität vorhanden. Es hat eine sehr geringe hydraulische Durchlässigkeit, liefert ein stabiles, für die Radionuklid-Rückhaltung und das Langzeitverhalten der technischen Barrieren günstiges geochemisches Umfeld und besitzt felsmechanische Eigenschaften, welche die bautechnische Machbarkeit eines Tiefenlagers nicht in Frage stellen. Die mehrheitlich geringdurchlässigen Formationen oberhalb und unterhalb des Wirtgesteins (obere/untere Rahmengesteine), welche eine geologische Zusatzbarriere zwischen dem Wirtgestein und den regionalen Aquiferen bilden, verstärken zusätzlich die Barrierenwirkung des Wirtgesteins.
- **Genügende Ausdehnung des Wirtgesteinskörpers:** Für die Aufnahme eines Lagers besteht aufgrund der annähernd konstanten Mächtigkeit sowie der lateralen Ausdehnung und lithologischen Kontinuität des Wirtgesteins eine grosse Flexibilität. Die laterale Ausdehnung des Wirtgesteinskörpers ist bedeutend grösser als die für ein Tiefenlager benötigte Grundfläche. Wegen der leichten Neigung der Wirtgesteinseinheit kann die Tiefenlage den Erfordernissen entsprechend gewählt und optimiert werden.
- **Vermeidung von Störeinflüssen und Robustheit gegenüber Störeinflüssen:** Mit der Wahl eines gering durchlässigen Wirtgesteins in einem tektonisch leicht kompressiven und seismisch ruhigen Gebiet sowie einer Lagertiefe von mehreren hundert Metern unter der Geländeoberfläche können denkbare Störeinflüsse (infolge Vergletscherungen, Bewegungen an Störungszonen, Erdbebeneffekte) vermieden bzw. kleingehalten werden. Ein ausgeprägtes Selbstabdichtungsvermögen des Wirtgesteins sowie stabile, durch das Gestein regulierte geochemische Verhältnisse bewirken, dass die Störeinflüsse durch das Lager selbst (Auflockerungszone, Freisetzung von Korrosions- und Degradationsgasen, chemische Veränderungen) entweder auf das unmittelbare Stollenumfeld beschränkt sind oder die Langzeit-Isolationskapazität des Wirtgesteins nicht signifikant beeinträchtigen. Das Fehlen abbauwürdiger Ressourcen macht zudem einen Nutzungskonflikt oder ein unabsichtliches menschliches Eindringen auch in weiterer Zukunft unwahrscheinlich.
- **Explorierbarkeit:** Der einfache geologische Bau mit tektonisch wenig gestörter subhorizontaler Lagerung der Schichten und die flache Topographie gewähren eine gute Explorierbarkeit der geometrischen Verhältnisse (hohe Auflösung der 3D-Seismik). Die Homogenität des Wirtgesteins und seine geringe lithologische Variabilität ergeben räumlich annähernd konstante Wirtgesteinseigenschaften. Dies erlaubt die Übertragung der Resultate der Bohrung Benken auf das gesamte Untersuchungsgebiet.
- **Prognostizierbarkeit:** Die geologische Entwicklungsgeschichte des Untersuchungsgebiets ist gut bekannt und beruht auf einer grossen Zahl voneinander unabhängiger qualitativer und quantitativer Argumente. Dadurch, und nicht zuletzt auch wegen des einfachen geologischen Baus des Gebiets, wird die Bandbreite verschiedener geologischer Entwicklungsszenarien stark eingeschränkt. Die zukünftige Entwicklung des Wirtgesteins in seinem geologischen Umfeld kann über den für die Beurteilung der Langzeitsicherheit relevanten Zeitraum von einer Million Jahren, und – im Rahmen der angegebenen Ungewissheiten – auch darüber hinaus, plausibel abgeschätzt werden.

Ausdehnung eines geeigneten Wirtgesteinskörpers (Standortnachweis)

Für die Aufnahme eines Tiefenlagers von rund zwei Quadratkilometern Flächenbedarf (Nagra 2002a) im Tiefenbereich zwischen 400 und 900 m stehen im potenziellen Standortgebiet im Zürcher Weinland insgesamt 35 km² als Gebiet mit einer Wirtgesteinsmächtigkeit von mindestens 100 m zur Verfügung; damit besteht eine entsprechende Flexibilität für die Anordnung der unterirdischen Anlagen.

Im Rahmen des Entsorgungsnachweises wurde für die bau- und sicherheitsbezogenen Betrachtungen zum Referenzprojekt (Nagra 2002a) exemplarisch ein Gebiet erster Priorität ausgewählt, das ein Mehrfaches der für ein Lager erforderlichen Fläche umfasst. Die wichtigsten Auswahlkriterien waren: Mindestens 600 m Gesteinsüberdeckung, Maximaltiefe 750 m und kristallines Grundgebirge direkt unter dem Mesozoikum.

Für eine gute Platzierung der benötigten Oberflächenanlagen besteht weitere Flexibilität, da die Linienführung des langen Zugangsstollens entsprechend den raumplanerischen Randbedingungen und unter Berücksichtigung lokaler Anliegen gewählt werden kann.

Für die Langzeitsicherheit relevante Eigenschaften des Wirtgesteins

Die für die Langzeitsicherheit relevanten Eigenschaften des Wirtgesteins können wie folgt zusammengefasst werden:

- Diffusion ist der massgebende Transportprozess, Advektion spielt keine oder nur eine untergeordnete Rolle.
- Störungzonen im Opalinuston bilden keine bevorzugten Fließpfade, was durch eine effiziente Selbstabdichtung erklärt wird.
- Es bestehen stabile reduzierende geochemische Bedingungen.

Das Schlüsselphänomen zum Verständnis der Transportprozesse und -eigenschaften des Opalinustons ist dessen Mikrostruktur. Aufgrund seiner Porosität von rund 12 Volumenprozent enthält das Gestein zwar einen bedeutenden Wasseranteil, wegen der äusserst filigranen Struktur des Porenraums sind das Porenwasser wie auch die gelösten Stoffe aber praktisch immobil. Im weiteren ist die schichtartige Mikrostruktur verantwortlich für die Anisotropie der sehr geringen hydraulischen Durchlässigkeit und der Diffusionskonstanten.

Die hydraulische Charakterisierung des Wirtgesteins in der Sondierbohrung Benken führt zu konsistenten, wenig streuenden hydraulischen Durchlässigkeiten, typischerweise von 2×10^{-14} bis 1×10^{-13} m/s. Verglichen mit der Porositäts-/Durchlässigkeitsbeziehung weltweit untersuchter Tongesteine liegen diese Werte im erwarteten Bereich.

Im Opalinuston wurden hydraulische Überdrücke gemessen, welche als Relikte der Versenkungsgeschichte oder als Resultat der tektonischen, nahezu Nord-Süd gerichteten, kompressiven Gebirgsspannung interpretiert werden können. Modellrechnungen haben gezeigt, dass Überdrücke, wie sie im Zürcher Weinland beobachtet werden, nur dann über geologische Zeiträume erhalten bleiben, wenn die effektive Durchlässigkeit noch geringer ist als die aus hydraulischen Tests abgeleitete.

Alle Untersuchungen in Bohrungen und Tunneln im Opalinuston weisen darauf hin, dass sich die hydraulische Durchlässigkeit von Störungen nicht von derjenigen des ungestörten Gesteins unterscheidet, wenn die Gesteinsüberlagerung mindestens 200 m beträgt. Dies wird auf das Selbstabdichtungsvermögen des Opalinustons zurückgeführt. Weil eine erhöhte Durchlässigkeit

in einer Störung in grösserer Tiefe – obwohl noch nie beobachtet – aber nicht vollständig ausgeschlossen werden kann, wird im Sinne eines pessimistischen *what if*-Szenariums auch ein Datensatz für die Modellierung des Radionuklidtransports in einer hypothetisch durchlässigen Störung bereitgestellt.

Die Schlussfolgerung, dass im Opalinuston eine Selbstabdichtung von Bruchstrukturen (Störungszonen) stattfindet, ist breit abgestützt und basiert auf unterschiedlichen Beobachtungen und Untersuchungen. Das weitgehende Fehlen von Mineraladern und Alterationen zeigt, dass auch in der geologischen Vergangenheit keine bedeutenden Gestein-Wasser-Interaktionen, resp. keine signifikanten Wasserflüsse durch den Opalinuston stattgefunden haben. Selbstabdichtungsprozesse konnten auch im Rahmen von In-situ-Experimenten im Felslabor Mont Terri nachgewiesen werden. Felsmechanische Laborexperimente erlauben zusammen mit dem gewonnenen Systemverständnis sowie konzeptuellen Ansätzen aus der Literatur die Identifikation von zeitabhängiger Deformation im Mikrobereich, Desintegration, Quellung und Spannungsumlagerung als die für die Selbstabdichtung relevanten Prozesse.

Aus dem Vergleich der Diffusionskonstanten des Wirtgesteins mit den geringen hydraulischen Durchlässigkeiten wird ersichtlich, dass die Diffusion der massgebende Transportprozess ist. Ein zusätzliches Argument für die sehr kleine advective Komponente ist die in der Bohrung Benken sowie im Felslabor Mont Terri beobachtete, für Diffusionsprozesse typische bogenförmige Verteilung der Konzentration zahlreicher Elemente sowie der Isotopenverhältnisse im Porenwasser. Die Form der Profile schliesst einen namhaften vertikalen advectiven Fluss aus. Der Wert dieser "Naturexperimente" im Zürcher Weinland und im Mont Terri liegt zudem in der Tatsache, dass sie sich auf grosse Zeiträume (Hunderttausende bis Millionen von Jahren) und bedeutende räumliche Distanzen (hundert Meter und mehr) beziehen. Im Falle der Bohrung Benken sind die Diffusionsprofile nicht nur im Opalinuston ausgebildet, sondern über diesen hinaus, sowohl im Hangenden wie auch im Liegenden. Dies illustriert zusätzlich, dass Diffusion auch in einem bedeutenden Teil der Rahmengesteine der massgebende Transportmechanismus ist. Die Diffusionsparameter sind gut bekannt und liegen im Vergleich mit anderen Tongesteinen im erwarteten Bereich.

Das Porenwasser im Opalinuston – zu Beginn der Ablagerung des Sediments Meerwasser – hat sich in seiner Zusammensetzung während der Versenkung, Kompaktion und Hebung des Opalinustons während 180 Millionen Jahren verändert und besitzt heute noch rund ein Drittel der Meerwassersalinität. Die Zusammensetzung des Porenwassers im Opalinuston wird zu einem bedeutenden Teil durch chemische Gleichgewichte mit dem Gestein (insbesondere mit Tonmineralien und Karbonaten) bestimmt. Die Konzentration der mobilen, von der Gesteinszusammensetzung unabhängigen Komponenten (v.a. Anionen) wird nur beschränkt und sehr langsam verändert, weil Diffusion der massgebliche Stofftransportprozess im Opalinuston ist. Die geochemischen Bedingungen sind insgesamt sehr stabil und reduzierend. Es gibt keine Hinweise, dass die verschiedenen Vergletscherungen einen Einfluss auf die geochemischen Bedingungen gehabt haben.

Barrierenwirkung der Rahmengesteine

Zwischen dem Wirtgestein und den regionalen Aquiferen (Malm, Muschelkalk) befinden sich im ganzen Untersuchungsgebiet mehrheitlich gering durchlässige tonige und evaporitische Gesteine. Diese Rahmengesteine bilden insbesondere in vertikaler, aber auch in lateraler Richtung eine zusätzliche geologische Barriere. Die in den tonigen Rahmengesteinen eingeschalteten, meist nur wenige Meter mächtigen sandigen, kalkigen oder dolomitischen Schichten stellen aufgrund ihrer Lithologie potenziell wasserführende Schichten dar. Die Rahmengesteine bewirken, dass Radionuklide, welche gegebenenfalls nach ihrem Transport durch das Wirtgestein

noch nicht zerfallen wären, nur mit einer beträchtlichen zusätzlichen Verzögerung in die Biosphäre gelangen könnten. Die Radionuklide würden zunächst entweder lateral entlang der durchlässigeren Schichten in den Rahmengesteinen über kilometerlange Transportwege bis zur Exfiltrationszone (zukünftiges Flusstal) transportiert oder gelangten in vertikaler Richtung diffusiv durch die tonigen Rahmengesteine in die regionalen Aquifere. Die Barrierenwirkung der Rahmengesteine wird in der Sicherheitsanalyse (Nagra 2002b) durch Modellrechnungen auf Basis der im vorliegenden Bericht erarbeiteten Datensätze abgeschätzt.

Auswirkungen eines geologischen Tiefenlagers auf das Wirtgestein im Stollenumfeld

Beim Bau der Stollen und Tunnel entwickelt sich infolge von Spannungsumlagerungen eine Auflockerungszone um die Bauwerke herum, deren Auswirkung auf das Wirtgestein und seine Barrierenwirkung aber räumlich und zeitlich sehr beschränkt ist. Die Durchlässigkeit der Auflockerungszone ist in der Bau- und Betriebsphase gegenüber dem ungestörten Wirtgestein um mehrere Grössenordnungen erhöht. Nach Verschluss des Lagers sättigen sich die Auflockerungszone und die Bentonit- bzw. Zementverfüllung auf, und es findet eine Selbstabdichtung der Auflockerungszone statt, welche durch den Quelldruck des Bentonits noch beschleunigt und verstärkt wird. Im Endzustand wird erwartet, dass sich die Auflockerungszone wieder wie ein homogen poröses Medium verhält, das gegenüber dem intakten Gebirge eine leicht erhöhte Porosität und eine effektive axiale Durchlässigkeit aufweist, welche noch etwa eine Grössenordnung über der Durchlässigkeit des intakten Gebirges liegt. Aufgrund von hydrogeologischen Modellrechnungen wird gezeigt, dass der Wasserfluss durch ein Tiefenlager auch bei einer bedeutend höheren Durchlässigkeit der Auflockerungszone nicht wesentlich grösser würde, weil er in erster Linie von der Durchlässigkeit des intakten Wirtgesteins abhängt.

Die geochemischen Veränderungen des Stollenumfelds (v.a. Pyritoxidation) während der Bau- und Betriebsphase eines Tiefenlagers sind insbesondere wegen der kurzen Offenhaltung der Lagerstollen (max. zwei Jahre) praktisch vernachlässigbar. Nach dem Verschluss des Lagers entstehen in den LMA-Tunneln durch die Wechselwirkung mit dem Zementmörtel hochalkalische Porenwässer, welche mit dem Opalinuston über lange Zeiträume hinweg reagieren. Diese Umwandlungszone könnte langfristig eine maximale Ausdehnung von wenigen Metern erreichen. Die zu erwartenden Mineralneubildungen bewirken eine Reduktion der Porosität und eine Erhöhung der Sorptionskapazität. Die geochemischen Veränderungen im Stollenumfeld haben somit keinen negativen Einfluss auf die Radionuklidrückhaltung.

Da die BE/HAA-Abfälle über mehrere Tausend Jahre Wärme erzeugen, wurde die Auswirkung des Wärmepulses auf das Wirtgestein untersucht. Die maximale Temperatur an der Stollenwand ist nach rund tausend Jahren erreicht und beträgt ca. 95 °C. Mineralogische Effekte einer solchen Temperaturerhöhung sind vernachlässigbar, da der Opalinuston während seiner Versenkungsgeschichte schon ähnlich hohe Temperaturen (bis ca. 85 °C) über viel längere Zeiträume erfahren hat. Die Temperaturerhöhung bewirkt neben thermischen Spannungen einen Porenwasser-Überdruck sowie eine Reduktion der mechanischen Festigkeit des Wirtgesteins. Da zu diesem Zeitpunkt die Lagerstollen schon verfüllt sind, führt dies zu keiner signifikanten Vergrösserung der Auflockerungszone, sondern beschleunigt wahrscheinlich die Desintegration des Gesteins und die Homogenisierung des Porenraums in der Auflockerungszone und damit die Selbstabdichtung.

In einem Tiefenlager entstehen aus den Abfällen bzw. den Behältern Korrosions- und Degradationsgase, die in den Lagerstollen und -tunneln akkumulieren. Diffusions- und Advektionsprozesse sind zu wenig effizient, um alle generierten Gase in Lösung abzuführen. Die Gasausbreitung erfolgt als Gasphase vorzugsweise entlang der Schichtung des intakten Wirtgesteins, entlang der Auflockerungszone oder entlang existierender Störungen durch klassischen Zwei-

phasenfluss oder (bei höheren Gasgenerationsraten) durch mikroskopische Rissbildung (dilatanzgesteuerte Gasausbreitung). Für die in den Lagerstollen und -tunneln erwarteten Gasgenerationsraten kann die Entstehung grossräumiger makroskopischer Zugrisse ausgeschlossen werden. Die Bildung von Gas kann in den Lagerstollen zu Überdrücken führen, welche den Wasserfluss im Wirtgestein beeinflussen können. Die mögliche Erhöhung des Wasserflusses beträgt aber auch bei pessimistischen Annahmen höchstens eine Grössenordnung. Auch in diesem Fall bleibt Diffusion der massgebende Transportprozess.

Geologische Langzeitentwicklung

Die geologische Langzeitentwicklung wird über einen Zeitraum von rund einer Million Jahren betrachtet. Die geologische Entwicklung kann in diesem Zeitraum aufgrund einer detaillierten Analyse der geologischen Entwicklungsgeschichte innerhalb vernünftiger Bandbreiten plausibel abgeschätzt werden. Darüber hinausgehende Prognosen sind zwar machbar und werden auch diskutiert; sie sind aber zunehmend mit Ungewissheiten behaftet.

Das Zürcher Weinland gehört zu den seismisch ruhigen Gebieten der Schweiz, liegt allerdings im Bereich des infolge der alpinen Krustenverkürzung kompressiv beanspruchten Vorlands, was sich u.a. in einer Hebung der Erdkruste manifestiert, die stellenweise noch messbar ist. Es ist deshalb naheliegend, bei der Bewertung der Langzeitentwicklung von einem Fortdauern dieser Bewegung auszugehen, zumindest über den betrachteten Zeitraum von einer Million Jahren. Basierend auf Daten und Information aus verschiedenen Quellen (Geomorphologie, Versenkungs- und Hebungsgeschichte, Geodäsie) wird die langfristige Hebungsrate im Zürcher Weinland auf maximal 0.1 mm/a, resp. 100 m/Ma geschätzt. Es wird angenommen, dass die lineare Erosion mit der Hebung Schritt hält, also ebenfalls 0.1 mm/a beträgt. Durch die Tieferlegung der Erosionsbasis des Rheins bis zum Erreichen des Gleichgewichts könnten insgesamt bis zu 100 m zusätzlich erodiert werden. In einer Million Jahre beträgt die Überdeckung eines in 650 m Tiefe angelegten Lagers somit noch mindestens 450 m. Zukünftige Gletschervorstösse werden dem heute existierenden Talnetz folgen; der glaziale Abtrag entlang der Haupttäler hält mit der regionalen und lokalen Hebung Schritt, bewegt sich also in der gleichen Grössenordnung wie die lineare Erosion. Die seitlichen Höhenzüge bleiben weitgehend erhalten und die glaziale Tiefenerosion bleibt auf bereits bestehende übertiefte Rinnen beschränkt. Es ist zu erwarten, dass die Malmkalke aufgrund ihrer Erosionsresistenz einen 'Schutzdeckel' in Form einer topographischen Erhöhung bilden. Dies wird jedoch bei der Abschätzung der Erosionsraten pessimistischerweise nicht berücksichtigt.

Modellrechnungen zur Abschätzung der Effekte einer zusätzliche Eisauflast zeigen, dass die Erhöhung des totalen Wasserflusses vom Wirtgestein in die Rahmengesteine aufgrund von Überdrücken in den Lagerstollen und -tunneln weniger als eine Grössenordnung beträgt. Auch in diesem Fall ist Diffusion der massgebende Transportprozess.

Umfangreiche Beobachtungen belegen, dass eine signifikante Erhöhung der hydraulischen Durchlässigkeit einzelner Störungen im Opalinuston erst dann auftritt, wenn die Überlagerung weniger als 200 m beträgt. Eine drastische Durchlässigkeitserhöhung des Gesamtgesteins findet erst in den obersten wenigen Dekametern statt. Da die Felsüberdeckung des Tiefenlagers (Referenztiefe 650 m) nach einer Million Jahren noch mindestens 450 m beträgt, bleibt die Durchlässigkeit des umgebenden Wirtgesteins praktisch unverändert.

Felsmechanische Eigenschaften des Wirtgesteins und bautechnische Aspekte

Die felsmechanischen Eigenschaften des Opalinuston werden weitgehend durch dessen Mikrostruktur bestimmt. Von grosser Bedeutung ist der Kompaktionsgrad und damit der Wassergehalt des Tonsteins. Makroskopisch äussert sich dieser Zusammenhang u.a. durch die starke Abhängigkeit der Festigkeit vom Wassergehalt. Während das Deformationsverhalten bei hohem Wassergehalt eher plastisch ist, führen geringe Wassergehalte, aber auch Austrocknung (gegebenenfalls durch die Auswirkung von Kapillarspannungen), zu einer wesentlichen Erhöhung der Festigkeit. Aus dieser Perspektive ist die teilweise Austrocknung des Gesteins im Stollenumfeld während der Betriebsphase ein erwünschter Effekt, der zur Stabilisierung des Bauwerks während der Bau- und Betriebsphase beiträgt. Die nach Verschluss des Lagers erfolgende Wiederaufsättigung führt zu zeitabhängigen Deformationen und wahrscheinlich zur Selbstabdichtung des durch die Untertagebauten aufgelockerten Gebirges.

Erfahrungen über mehr als hundert Jahre mit Untertagebauten im Opalinuston zeigen, dass die Tunnel im Opalinuston im Faltenjura meist problemlos realisiert werden konnten, auch bei Überlagerungen von bis zu 800 m und trotz zahlreicher Störungen im Gebirge. Beim Vergleich mit anderen Tunnelbauwerken müssen die unterschiedliche Ausrichtung der Gesteinsanisotropie zur Stollenachse, der Wassergehalt und die lokale Gebirgsspannung berücksichtigt werden. Unter Berücksichtigung dieser Abhängigkeiten sind die Resultate aus anderen Stollen (z.B. Mont Terri) auf den Opalinuston des Zürcher Weinlands übertragbar. Die numerischen Modellierungen, in welchen die felsmechanischen Kennwerte und die Spannungsverhältnisse der Bohrung Benken berücksichtigt sind, zeigen, dass für die verschiedenen Hohlräume eines geologischen Tiefenlagers die Standsicherheit gegeben ist (Nagra 2002a). Die geotechnischen Eigenschaften der Schichten über dem Wirtgestein, welche mit dem Zugangstunnel und dem Schacht durchfahren werden, wurden aus existierenden Datenbanken abgeleitet.

Bewertung des Kenntnisstands und Behandlung der Ungewissheiten

Die Kenntnis der geologischen Verhältnisse im Untersuchungsgebiet ist aufgrund der hohen Qualität der 2D- und 3D-Seismik, der generellen Homogenität des Wirtgesteins ohne grössere laterale Veränderung der Gesteinszusammensetzung, der gekernten und intensiv betesteten Bohrung Benken sowie der langjährigen neotektonischen Beobachtungsprogramme sehr gut. Die laterale Ausdehnung und die Mächtigkeit des Wirtgesteins sowie die Abwesenheit von grösseren Störungen im zentralen Teil des Gebiets sind gut belegt. Der Kenntnisstand über die Eigenschaften des Wirtgesteins hinsichtlich Stofftransport und bautechnischer Eignung ist durch zusätzliche Untersuchungen in weiteren Sondierbohrungen der Nordschweiz sowie im Felslabor Mont Terri relativ breit abgestützt. Im Vergleich mit anderen Tongesteinen liegen die eruierten Parameterwerte im erwarteten Bereich. Die erarbeiteten Kenntnisse über die mögliche Langzeitentwicklung der tektonischen, hydrogeologischen und geochemischen Verhältnisse bilden zudem eine tragfähige Basis für die Beurteilung der Langzeitschutz- und Barrierenfunktion der Geosphäre.

Um bestehenden Ungewissheiten Rechnung zu tragen, wurden für nahezu alle behandelten Aspekte neben Referenzparametern auch Bandbreiten oder pessimistische alternative Werte und in einigen Fällen auch alternative konzeptuelle Modelle angeführt. Die Auswirkung der Ungewissheiten wird im Rahmen der Sicherheitsanalyse bewertet (Nagra 2002b). Es kann davon ausgegangen werden, dass die Ungewissheiten mit zukünftigen Untersuchungen – einige Feld- und Laborexperimente sind bereits im Gang – weiter reduziert werden können.

In ihrer Gesamtheit erfüllt die geologische Situation des Untersuchungsgebiets, einschliesslich der Wirtgesteinseigenschaften, die Anforderungen an ein mögliches Standortgebiet. Es gibt

keine geowissenschaftlichen Erkenntnisse, welche die Realisierung und Sicherheit eines geologischen Tiefenlagers im Zürcher Weinland grundsätzlich in Frage stellen.

Summary

This geosynthesis report forms an integral part of the series of documents produced for the "Entsorgungsnachweis", the aim of which is to demonstrate the basic feasibility of disposing of spent fuel (SF), vitrified high-level waste (HLW) and long-lived intermediate-level waste (ILW) in Switzerland. The geosynthesis shows that the Opalinus Clay host rock has a sufficient extent in a potential siting area in the Zürcher Weinland (demonstration of siting feasibility). It documents the geoscientific basis for assessing the long-term safety of a deep geological repository constructed in the Opalinus Clay (Nagra 2002b) and for evaluating construction feasibility (Nagra 2002a). The past geological evolution of the investigation area and the processes occurring in the geosphere are also documented; from this information, a spectrum of future evolution scenarios for the geological environment is derived. The assessment of long-term safety and of construction feasibility is based on the results of detailed site-related investigations, specific laboratory and field tests, practical experience in underground structures and – where possible – independent checks of consistency and comparisons with other clay rocks (e.g. foreign rock laboratories, experience from the oil industry). In addition, scientific understanding is demonstrated using conceptual models and model calculations. The reference datasets (reference depth of repository 650 m) are supplemented on a case-wise basis by pessimistic values, conservative assumptions or parameter ranges.

A broadly based, stepwise evaluation procedure aimed at narrowing down potential siting options was conducted in close cooperation with, and with the agreement of, the supervisory authorities and their experts. In 1994, the Opalinus Clay (an approximately 180 million year old marine claystone formation) was identified as the first-priority sedimentary host rock option and the Zürcher Weinland as the first-priority area for site-related investigations. Based on safety and engineering criteria, the search was for a geologically simple, tectonically quiet area with Opalinus Clay at a depth between 400 and 900 m. The selection procedure was based on an integrated analysis of investigations carried out by Nagra and the oil industry in Northern Switzerland (deep boreholes, 2D seismic surveys, thematic regional studies), as well as on published geological maps and technical articles. Detailed characterisation of the host rock and the potential siting area followed after 1994. The key elements of this research programme were a 3D seismic campaign in the Zürcher Weinland covering an area of around 50 km², an exploratory borehole (Benken), experiments as part of the international research programme in the Mont Terri Rock Laboratory (Canton Jura), comparative regional studies on the Opalinus Clay and comparisons with clay formations that are under investigation in other countries in connection with geological disposal. Thanks to the wealth of existing knowledge and the homogeneous lithology of the Opalinus Clay, parameters measured at other locations can be transferred reliably to the investigation area in the Zürcher Weinland, taking into account the different local rock-independent boundary conditions (e.g. different overburden of the host rock, different stress field).

Fulfilling the fundamental requirements on the geological environment of a deep repository

Based on a synthesis of regional and local geoscientific investigations, it is shown that the selected area in the Zürcher Weinland fulfils the fundamental requirements placed on a siting area for a deep geological repository (cf. HSK 1999) and that, in terms of the Opalinus Clay host rock option, the geological environment is advantageous. The most important properties are:

- **Long-term geological stability:** The investigation area is located at the edge of the zone influenced by the Alps. Tectonically, it is subject to a slight compressive stress but is not significantly deformed. It also lies within one of the seismically quiet areas of Switzerland, with a small uplift and erosion rate and average heat flow.
- **Favourable host rock properties:** The host rock in the investigation area is sufficiently thick and has a homogeneous lithology. It has a very low hydraulic conductivity, a geochemical environment that is favourable in terms of radionuclide retention and the long-term performance of the engineered barriers, and rock mechanical properties that are suitable for the construction of a deep repository. The formations above and below the Opalinus Clay (upper and lower confining units) mostly have a low hydraulic conductivity and form a supplementary geological barrier between the host rock and the regional aquifers, strengthening the barrier function of the host rock.
- **Sufficient extent of host rock body:** Because of its almost constant thickness, lateral extent and lithological continuity, the host rock offers a large element of flexibility in locating a repository. The lateral extent of the host rock body is significantly larger than the footprint needed for a deep repository. Because of the slight dip of the host rock unit, disposal depth can be selected and optimised according to requirements.
- **Avoidance of, and insensitivity to, detrimental phenomena and perturbations:** With the selection of a low permeability host rock in a tectonically slightly compressive and seismically quiet area, as well as a disposal depth several hundred metres below the surface, conceivable perturbations (as a result of glaciation, movements along fault zones, earthquake effects) can either be avoided or kept to a minimum. The self-sealing capacity of the host rock and the stable geochemical conditions mean that perturbations caused by the repository itself (excavation disturbed zone, release of corrosion and degradation gases, chemical alterations) are either restricted to the immediate tunnel vicinity or do not have a significant impact on the long-term isolation capacity of the rock. The absence of economically viable natural resources makes a conflict of use, and thus unintentional human intrusion, unlikely even in the far future.
- **Explorability:** The simple geological structure, with tectonically quiet sub-horizontal bedding, and the flat topography ensure good explorability of geometric conditions (e.g. with high resolution 3D seismics). The homogeneity of the host rock and the very small lithological variation result in rock properties that are spatially almost constant. This allows certain results from the Benken borehole to be extrapolated over the entire investigation area.
- **Predictability:** The past geological evolution of the investigation area is well known, being based on a large number of independent quantitative and qualitative arguments. Together with the simple geological structure of the area, this means that the range of different geological evolution scenarios is very limited. The future evolution of the host rock in its geological setting can thus be predicted plausibly over the time period of one million years which is relevant for evaluating long-term safety and – with a degree of uncertainty – even beyond this.

Extent of suitable host rock body (demonstration of siting feasibility)

For a deep repository with a required area of around two square kilometres (Nagra 2002a) at a depth between 400 and 900 m, the potential repository area in the Zürcher Weinland is around 35 km² in extent and the host rock is at least 100 m thick. This offers the required degree of flexibility in the layout of the underground facilities.

Based on engineering- and safety-related considerations in the Reference Project in the Ent-sorgungsnachweis (Nagra 2002a), a first-priority area several times larger than that required for the repository was selected as an example. The key selection criteria were: a minimum overburden of 600 m, a maximum depth of 750 m and crystalline basement directly beneath the Mesozoic.

There is also a degree of flexibility in locating the necessary surface facilities as the line of the long access tunnel can be selected to meet regional planning boundary conditions and to take into account local interests.

Host rock properties relevant for long-term safety

The properties of the host rock that are relevant from the viewpoint of long-term safety can be summarised as follows:

- Diffusion is the dominant transport mechanism, with advection playing either only a secondary role or none at all.
- Fault zones in the Opalinus Clay do not represent preferential flow-paths, which can be explained by an efficient self-sealing mechanism.
- Stable, reducing geochemical conditions are present.

The key phenomenon for understanding the transport processes and properties of the Opalinus Clay is its microstructure. With a porosity of around 12 volume percent, the rock does contain a significant component of water but, because of the extreme filigree structure of the pore space, the porewater and dissolved substances are practically immobile. The layer-type microstructure is responsible for the anisotropy of the very low hydraulic conductivity and the diffusion constants.

The hydraulic characterisation of the host rock in the Benken borehole showed consistent hydraulic conductivities with little scatter, typically between 2×10^{-14} and 1×10^{-13} m/s. These values are in the range expected from comparisons with the porosity/conductivity relationship of clays being investigated world-wide.

Hydraulic overpressures were measured in the Opalinus Clay; these can be interpreted as relics of the burial history or as a result of the compressive stress field, which is oriented more or less north-south. Model calculations have shown that overpressures such as those observed in the Zürcher Weinland only remain intact over geological time periods if the effective hydraulic conductivity is smaller than those derived from hydraulic tests.

All the investigations carried out in boreholes and tunnels in the Opalinus Clay indicate that the hydraulic conductivity of fault zones is no different from that of the intact rock when the rock overburden is at least 200 m. This is explained by the self-sealing capability of the Opalinus Clay. However, because enhanced conductivity of a fault zone at greater depth cannot be ruled out completely (although it has never been observed), a dataset for modelling radionuclide transport in a hypothetically conductive fault zone is provided as a pessimistic *what if*-scenario.

The conclusion that self-sealing of discontinuities (fault zones) takes place in the Opalinus Clay is broadly supported by a range of observations and investigations. The absence of mineral veins and alterations is evidence that, in the geological past, there was no significant rock-water interaction or significant water flow through the Opalinus Clay. Self-sealing processes were also observed during in situ experiments at the Mont Terri Rock Laboratory. Together with system

understanding and conceptual approaches documented in the literature, rock mechanics experiments in the laboratory lead to identification of time-dependent deformation in the micro-range, disintegration, swelling and stress changes as being the processes relevant for self-sealing.

A comparison of the diffusion constants for the host rock with the low hydraulic conductivities indicates that diffusion is the dominant transport process. An additional argument for the very small advective component is the curved distribution of the concentration of numerous elements and isotope ratios in the porewater, which is typical for diffusion processes. Such features are observed both in the Benken borehole and in the Mont Terri Rock Laboratory. The form of the profiles rules out any significant vertical advective flow. The value of these "natural experiments" in the Zürcher Weinland and at Mont Terri lies in the fact that they are relevant for long timescales (hundreds of thousands to millions of years) and significant distances (one hundred metres and more). In the case of the Benken borehole, the diffusion profiles are apparent not only in the Opalinus Clay, but also in the underlying and overlying formations. This also shows that diffusion is the dominant transport mechanism in a significant part of the confining units. The diffusion parameters are well known and lie in the range expected from studies of other clay rocks.

The porewater in the Opalinus Clay – which was seawater at the beginning of sedimentation – has changed its composition during burial, compaction and uplift of the Opalinus Clay over the last 180 million years; today its salinity is around one-third that of seawater. The composition of the porewater is determined to a large extent by chemical equilibria with the rock (particularly with clay minerals and carbonates). The concentration of mobile components that are independent of rock composition (mainly anions) will change very slowly, and to a restricted extent, because diffusion is the dominant solute transport process in the Opalinus Clay. Overall, the geochemical conditions are very stable and reducing. There are no indications that the different glaciation events have had any influence on these conditions.

Barrier function of the confining units

In the entire investigation area, generally low permeability argillaceous and evaporitic rocks are found between the host rock and the regional aquifers (Malm, Muschelkalk). Particularly in a vertical (but also in a lateral) direction, these confining units form a supplementary geological barrier. Sandy, calcareous or dolomitic layers intercalated with the argillaceous formations are usually only a few metres thick and, given their lithology, represent potential water-conducting strata. The effect of the confining units is that radionuclides that may not have decayed away following their transport through the host rock will only reach the biosphere after a further considerable time delay. The nuclides would first be transported either laterally along the more permeable layers in the confining units over kilometre-long transport pathways to the discharge zone (future river valley), or would move diffusively in a vertical direction through the confining units into the regional aquifers. The barrier efficiency of the confining units is estimated in the safety assessment (Nagra 2002b) using model calculations based on the datasets contained in this report.

Effects of a repository on the host rock in the tunnel vicinity

During construction of tunnels, stress changes lead to formation of an excavation disturbed zone around the excavated structures. The effect of this zone on the host rock and its barrier function is, however, very restricted in terms of both space and time. During the construction and operation phase, the hydraulic conductivity of the excavation disturbed zone is several orders of magnitude higher than that of the undisturbed host rock. Once the repository has been closed,

the excavation disturbed zone and the bentonite or cement backfill begin to saturate and the excavation disturbed zone undergoes self-sealing; this process is accelerated and enhanced by the swelling pressure of the bentonite. In its final state, it is expected that the excavation disturbed zone will again behave as a homogeneously porous medium, with a slightly increased porosity and an effective axial hydraulic conductivity around one order of magnitude greater than that of the intact rock. Hydrogeological model calculations have shown that water flow through a deep repository will not be significantly greater even in the case of a significantly higher permeability of the excavation disturbed zone, as water flow is dependent in the first instance on the permeability of the intact rock.

The geochemical alterations in the vicinity of the tunnel during construction and operation of a repository (mainly pyrite oxidation) are virtually negligible, mainly because of the short period of time during which the emplacement tunnels remain open (maximum of two years). Once the repository has been closed, highly alkaline porewaters will form in the ILW tunnels as a result of the interaction with the cement mortar, and will react with the Opalinus Clay over long periods of time. The resulting alteration zone could extend to a maximum of a few metres on the long term. The new mineral formation would cause a reduction in the porosity and an increase in sorption capacity. The geochemical changes in the tunnel vicinity would thus have no negative impact on radionuclide retention.

Since the SF/HLW will generate heat for a period of several thousand years, the effect of a heat pulse on the host rock was investigated. The maximum temperature at the tunnel wall (around 95°C) is reached after around one thousand years. The mineralogical effects of such a temperature increase are negligible as the Opalinus Clay was already subject to similar temperatures (around 85°C) over much longer time periods during its burial. Besides thermal stresses, the temperature increase causes a porewater overpressure and a reduction in the mechanical strength of the rock. As the emplacement tunnels are already backfilled at this stage, this does not lead to any significant increase in the excavation disturbed zone, but probably has the effect of accelerating the disintegration of the rock and the homogenisation of the pore space in the excavation disturbed zone, and thus self-sealing.

In a deep repository, corrosion and degradation gases produced by the waste and the canisters accumulate in the emplacement tunnels. Diffusion and advection processes are not efficient enough to transport away all the generated gas in solution. Gas migration thus occurs preferentially as a gas phase along the bedding of the intact host rock, along the excavation disturbed zone or along existing fault zones under classic two-phase flow conditions or (in the case of higher gas generation rates) through microscopic fissure formation (dilatancy-driven gas migration). For the gas generation rates expected in the emplacement tunnels, the formation of extended macroscopic tension cracks can be ruled out. The formation of gas in the emplacement tunnels can lead to overpressures which are capable of influencing the water flow in the host rock. However, even in the case of pessimistic assumptions, the potential increase in water flow will not exceed one order of magnitude. In this case also, diffusion remains the dominant transport process.

Long-term geological evolution

The long-term evolution is considered over a time period of around one million years. Future geological evolution can be predicted plausibly within reasonable limits over such a time period based on a detailed analysis of geological history. Predictions extending beyond this time period are feasible and are discussed, but they contain an increasing element of uncertainty.

The Zürcher Weinland is one of the seismically quiet regions of Switzerland, but it is located in the area of the foreland that underwent compressive stress as a result of Alpine crustal shortening. This is manifested inter alia as an uplift of the earth's crust, which can still be measured at some locations. It is therefore sensible, when evaluating long-term evolution, to assume that this movement will continue, at least over the time period of one million years. Based on data and information from a range of sources (geomorphology, burial and uplift history, geodesy), the long-term uplift rate in the Zürcher Weinland is estimated to be a maximum of 0.1 mm/a, or 100 m/Ma. It is assumed that linear erosion keeps pace with uplift (i.e. is also 0.1 mm/a). Through the lowering of the base level of erosion (the Rhine) until equilibrium is reached, an additional 100 m could be eroded away. This means that, in one million years, the overburden of a repository constructed at a depth of 650 m will still be at least 450 m. Future glacial advances would follow the existing valley network. Glacial erosion along major valleys will keep pace with regional and local uplift and will thus be of the same order of magnitude as linear erosion. The lateral mountain ranges will remain largely intact and gully erosion will be restricted to already existing overdeepened channels. It is to be expected that the Malm limestones will form a protective cover in the form of a topographic elevation because of their resistance to erosion. However, this is pessimistically ignored when estimating erosion rate.

Model calculations carried out to estimate the effects of an additional ice burden show that the increase in total water flow from the host rock into the confining units will be less than one order of magnitude due to overpressures in the emplacement tunnels. In this case, diffusion is still the dominant transport process.

Extensive observations indicate that a significant increase in the hydraulic conductivity of isolated fault zones in the Opalinus Clay will occur only if the overburden is less than 200 m. A drastic increase in permeability would be restricted to the uppermost few decametres. Since the rock overburden of a repository constructed at a depth of 650 m will still be at least 450 m after one million years, the permeability of the surrounding host rock will be practically unaltered.

Geomechanical properties of the host rock and engineering aspects

The geomechanical properties of the Opalinus Clay are determined largely by its microstructure. The degree of compaction, and thus the water content of the rock, is of great significance. Macroscopically, this relationship is expressed as a marked dependence of rock strength on water content. While the deformation process is largely plastic at high water content, lower water contents and also drying out (possibly due to the effect of capillary forces) can lead to a significant increase in strength. From this point of view, partial drying out of the rock in the tunnel vicinity during the operational phase is a desirable phenomenon which contributes to stabilisation of the underground openings. The resaturation that takes place following closure of the repository results in time-dependent deformation and probably self-sealing of the rock that has been disturbed due to excavation of the underground structures.

Experience with underground structures in the Opalinus Clay in the Folded Jura extending over more than a hundred years has shown that tunnels can generally be constructed without problems, even in the case of overburdens up to 800 m and the presence of numerous faults in the rock. When making comparisons with other tunnel construction projects, the different direction of rock anisotropy to the tunnel axis, the water content and the local rock stress regime have to be taken into account. If this is done, the results from other tunnels (e.g. Mont Terri) can be applied to the Opalinus Clay of the Zürcher Weinland. Numerical modelling studies, which take into account rock mechanical parameters and stress conditions in the Benken borehole, show that, for the different cavities of a deep repository, stability can be assured (Nagra 2002a).

The geotechnical properties of the strata above the host rock, which will be penetrated by the access tunnel and the shaft, were derived from existing databases.

Evaluation of existing knowledge and treatment of uncertainties

The understanding of the geological conditions in the investigation area can be considered to be very good, based on the high quality of the 2D and 3D seismic campaigns, the general homogeneity of the host rock without significant lateral variation in rock composition, the cored and intensively tested Benken borehole and neotectonic observation programmes extending over several years. The lateral extent and thickness of the host rock and the absence of large fault zones in the central part of the investigation area are well documented. Understanding of the host rock properties in terms of solute transport and engineering suitability is widely supported by investigations in other boreholes in Northern Switzerland and in the Mont Terri Rock Laboratory. The parameter values measured lie in the range expected from studies of other clay formations. Information on possible long-term evolution of the tectonic, hydrogeological and geochemical conditions forms a sound basis for evaluating the long-term protection and barrier functions of the geosphere.

To take account of existing uncertainties, for nearly all aspects considered parameter ranges or pessimistic alternative values and, in some cases, alternative conceptual models were considered besides reference parameters. The effect of uncertainties is evaluated as part of the safety assessment (Nagra 2002b). It can be assumed that uncertainties will be further reduced with future investigations – some relevant field and laboratory experiments are already underway.

Taken overall, the geological situation in the investigation area (including the host rock properties) meets the requirements placed on a potential siting area. There is no geoscientific information that would, in principle, call the implementation and safety of a deep geological repository in the Zürcher Weinland into question.

Résumé

Le présent rapport (la synthèse des études géologiques) fait partie intégrante de la documentation fournie à l'appui de la "Démonstration de faisabilité du stockage géologique" (projet *Entsorgungsnachweis*), qui vise à démontrer que le stockage en formation géologique profonde des assemblages combustibles usés (AC), des déchets de haute activité vitrifiés (DHA) et des déchets de moyenne activité à vie longue (DMAL) est réalisable en Suisse. Ce rapport établit que la roche d'accueil envisagée, les Argiles à Opalinus, est présente sur une étendue suffisante dans le secteur d'accueil potentiel du Weinland zurichois ("démonstration de l'existence d'un site"); il expose également les bases scientifiques qui permettent d'évaluer, du point de vue géologique, à la fois la sûreté à long terme d'un dépôt en profondeur dans les Argiles à Opalinus (Nagra 2002b) et la faisabilité technique de la construction de ce dépôt (Nagra 2002a). Par ailleurs, il fait le point sur les connaissances scientifiques relatives à la genèse géologique du secteur étudié et aux processus se déroulant dans la géosphère, pour tirer des conclusions quant à l'évolution future de l'environnement géologique. L'évaluation de la sûreté radiologique à long terme et de la faisabilité technique sont basées sur un vaste corpus d'informations: campagne de reconnaissance détaillée dans le secteur envisagé, expériences spécifiques en laboratoire et sur le terrain, expériences pratiques acquises lors de la réalisation d'ouvrages souterrains et, dans la mesure du possible, vérifications et comparaisons indépendantes avec d'autres roches argileuses (par exemple laboratoires souterrains à l'étranger, expérience acquise par l'industrie pétrolière). Par ailleurs, les connaissances géologiques sont utilisées pour l'élaboration des modèles mathématiques. Les bases de données de référence qui en sont déduites (profondeur de référence du dépôt: 650 m) sont pour une part complétées à l'aide de valeurs pessimistes, d'hypothèses conservatrices ou de variations de paramètres.

En 1994, à l'issue d'un vaste processus d'évaluation et de sélection, dont les différentes étapes ont été suivies et approuvées par les autorités de contrôle et de leurs experts, deux options prioritaires ont été définies: les Argiles à Opalinus en tant que roche d'accueil sédimentaire et le Weinland zurichois comme région à étudier du point de vue géologique. Pour des raisons de sécurité aussi bien que de faisabilité technique, les recherches ont porté sur un secteur simple sur le plan géologique, calme du point de vue tectonique, où les Argiles à Opalinus sont situées à une profondeur de 400 à 900 m. La procédure de sélection a reposé sur une évaluation intégrale des recherches effectuées par la Nagra et l'industrie pétrolière dans le nord de la Suisse (forages profonds, sismique 2D, études régionales thématiques), ainsi que sur l'étude des cartes et des publications existantes. Une caractérisation détaillée de la roche d'accueil et du secteur d'accueil potentiel a été effectuée après 1994. Les points forts de ce programme de recherches ont été une campagne de sismique 3D dans le Weinland zurichois sur une superficie d'environ 50 km², un forage profond (Benken), des expériences dans le cadre du programme international de recherche au laboratoire souterrain du Mont Terri (canton du Jura), ainsi que des études comparatives régionales sur les Argiles à Opalinus et des comparaisons avec d'autres formations argileuses à l'étranger, également étudiées en vue du stockage géologique de déchets radioactifs. Grâce aux bonnes connaissances existantes et à l'homogénéité de la lithologie des Argiles à Opalinus, les paramètres obtenus sur d'autres sites peuvent être transférés de manière fiable au Weinland zurichois, pour autant que l'on tienne compte des conditions différentes qui règnent sur ces sites (par exemple épaisseur de la couverture au-dessus de la roche d'accueil, champs de contraintes).

Respect des exigences relatives au milieu géologique d'un dépôt en profondeur

Sur la base de la synthèse des recherches géologiques effectuées au niveau régional et local, on a pu démontrer que le secteur délimité dans le Weinland zurichois remplit les conditions

nécessaires pour l'implantation d'un dépôt géologique profond (cf. HSK 1999) et que les Argiles à Opalinus, en tant que roche d'accueil, constituent un milieu géologique favorable. Les principales caractéristiques de cet environnement sont les suivantes:

- **Stabilité géologique à long terme:** Le secteur étudié, situé à la périphérie de la zone d'influence alpine, fait l'objet d'une légère compression tectonique, mais n'a pas subi de déformations importantes. Par ailleurs, cette région de Suisse est caractérisée par une activité sismique faible, des taux de soulèvement et d'érosion réduits et un flux thermique moyen.
- **Propriétés favorables de la roche d'accueil:** Dans le secteur étudié, l'épaisseur de la roche d'accueil est suffisante et son unité lithologique adéquate. La roche présente une conductivité hydraulique très faible; elle constitue un environnement stable du point de vue géochimique, favorable à la rétention des radionucléides et à la préservation à long terme des barrières ouvragées. Enfin, ses propriétés géomécaniques autorisent la réalisation d'ouvrages souterrains. Les formations, pour la plupart peu perméables, situées au-dessus et en dessous de la roche d'accueil (roches dites "encaissantes" supérieures et inférieures) constituent une barrière supplémentaire entre la zone de dépôt et les aquifères régionaux, et par là renforcent la fonction de sûreté assumée par la roche d'accueil.
- **Extension suffisante de la roche d'accueil:** Pour l'implantation d'un site, l'épaisseur pratiquement constante de la roche d'accueil, ainsi que son extension latérale et la continuité lithologique, sont des conditions qui garantissent une grande flexibilité. L'extension latérale de la formation d'accueil est nettement plus importante que la superficie nécessaire à la construction d'un dépôt. Du fait que la couche est légèrement inclinée, la profondeur peut être choisie et optimisée en conséquence.
- **Absence de perturbations et «robustesse» face aux perturbations:** En choisissant une roche d'accueil peu perméable située dans une zone subissant une légère compression tectonique et calme du point de vue sismique, située à une profondeur de plusieurs centaines de mètres au dessous de la surface du sol, il est possible d'éviter, ou tout au moins de limiter au maximum, les perturbations possibles (consécutives à des glaciations, des mouvements dans des zones de failles, des tremblements de terre). Grâce aux excellentes capacités d'auto-cicatrisation de la roche d'accueil et à la stabilité des conditions géochimiques, régulées par la roche elle-même, les perturbations induites par le dépôt (perturbations mécaniques, dégagement de gaz de corrosion et de dégradation, modifications de la composition chimique du milieu), soit resteront limitées à l'environnement immédiat des galeries, soit n'auront pas d'influence particulière sur les propriétés de la roche d'accueil en tant que barrière de confinement à long terme. De plus, l'absence de ressources minières viables rend improbables un conflit d'utilisation ou une intrusion humaine involontaire, même dans un avenir lointain.
- **Conditions d'exploration:** Une géologie simple, avec des strates sub-horizontales peu perturbées du point de vue tectonique, ainsi qu'une topographie sans relief accentué, constituent de bonnes conditions pour l'exploration des conditions géométriques du milieu (haute résolution de la campagne de sismique 3D). Du fait de l'homogénéité de la roche d'accueil et de sa faible variabilité lithologique, les qualités de la roche demeurent presque constantes sur l'ensemble de la zone, ce qui permet d'extrapoler certains résultats du forage de Benken à l'ensemble du secteur étudié.
- **Prévisibilité:** La genèse géologique du secteur étudié est bien connue et repose sur un grand nombre d'arguments qualitatifs et quantitatifs indépendants les uns des autres. De ce fait, et également en raison de la simplicité de la géologie de la région, les divers scénarios d'évo-

lution géologique envisagés ne diffèrent pas fondamentalement les uns des autres. L'évolution future de la roche d'accueil dans son environnement géologique peut être prévue de manière plausible sur l'échelle de temps d'un million d'années, retenue pour l'évaluation de la sûreté du dépôt, et même au-delà, en tenant compte des incertitudes.

Extension de la formation rocheuse (Démonstration de l'existence d'un site)

Pour l'implantation d'un dépôt qui nécessiterait une superficie d'environ deux km² (Nagra 2002a) à une profondeur située entre 400 et 900 m, il existe dans la région d'accueil potentielle du Weinland zurichois un secteur d'une superficie totale de 35 km² où l'épaisseur de la roche d'accueil est au minimum de 100 m; ceci garantit une grande flexibilité pour la disposition des ouvrages souterrains.

Pour les besoins de la démonstration de la faisabilité technique et de la sûreté du projet de référence (Nagra 2002a), on a défini, à titre d'exemple, un secteur prioritaire qui comprend une zone d'une étendue plusieurs fois supérieure à celle qui serait nécessaire pour l'implantation d'un dépôt. Les critères principaux étaient une couverture rocheuse d'au moins 600 m d'épaisseur, une profondeur maximale de 750 m et le socle cristallin situé directement en dessous du mésozoïque.

Lors du choix d'un emplacement optimal pour les infrastructures de surface, on dispose d'une flexibilité supplémentaire, car le tracé de la longue rampe d'accès peut être déterminé en fonction des conditions d'aménagement du territoire et en respectant les souhaits des populations locales.

Propriétés de la roche d'accueil pertinentes pour la sûreté à long terme

Les propriétés de la roche d'accueil qui sont pertinentes pour la sûreté à long terme du dépôt peuvent être résumées de la façon suivante:

- La migration s'effectue de façon prépondérante par diffusion et l'advection ne joue aucun rôle, ou tout au plus un rôle secondaire.
- Les zones de fissures ne constituent pas des cheminements préférentiels, en raison des bonnes capacités d'auto-cicatrisation des Argiles à Opalinus.
- Du point de vue géochimique, le milieu est stable et réducteur.

La microstructure des Argiles à Opalinus est déterminante pour la compréhension des processus et propriétés de transport. Avec une porosité d'environ 12 %, la roche a une teneur en eau relativement importante, mais en raison de la structure extrêmement longue et fine des pores, l'eau interstitielle et les solutés demeurent pratiquement immobiles. Par ailleurs, l'anisotropie de la très faible conductivité et des constantes de diffusion est la conséquence de la microstructure en feuillets de la roche.

La mesure de la conductivité hydraulique de la roche d'accueil dans le sondage de Benken fournit des valeurs cohérentes, relativement constantes, comprises généralement entre 2×10^{-14} et 1×10^{-13} m/s. En comparaison avec le rapport porosité / conductivité hydraulique obtenu pour d'autres roches argileuses à l'étranger, ces valeurs sont normales.

Dans les Argiles à Opalinus, on a observé des surpressions hydrauliques, qui peuvent être interprétées soit comme des témoins de la genèse de l'enfouissement, soit comme le résultat des contraintes rocheuses tectoniques opérant une compression orientée pratiquement du nord au

sud. Les calculs numériques ont montré que les zones de surpression de ce type ne peuvent subsister sur des périodes géologiques que si la conductivité effective est encore plus faible que celle dérivée des tests hydrauliques.

Lors de la réalisation de forages et de tunnels dans les Argiles à Opalinus, on a constaté que la conductivité hydraulique des failles était identique à celle de la roche non perturbée, lorsque la couverture rocheuse avait une épaisseur d'au moins 200 m. Cette propriété est due à la capacité d'auto-cicatrisation des Argiles à Opalinus. Du fait qu'on ne peut pas totalement exclure une perméabilité accrue dans une faille située à une plus grande profondeur – bien que ceci n'ait jamais été observé –, on a compilé une base de données pour modéliser la migration des radionucléides dans une éventuelle faille perméable, dans le cadre d'un scénario pessimiste.

L'affirmation selon laquelle, dans les Argiles à Opalinus, les fractures (zones de failles) ont la capacité de "s'auto-cicatriser", repose sur une base solide d'observations et d'études. L'absence quasi-totale de veines minéralisées et d'altérations montre que, même dans le passé géologique, aucune interaction fluide-roche, ou aucun mouvement d'eau de quelque importance n'ont eu lieu. Les processus d'auto-cicatrisation ont également pu être démontrés dans le cadre d'expériences *in situ* au laboratoire souterrain du Mont Terri. A partir des essais de géomécanique effectués en laboratoire, de la connaissance du fonctionnement du système et des approches conceptuelles détaillées dans les publications, on peut déduire que le phénomène d'auto-cicatrisation s'explique par une déformation temporaire au niveau de la microstructure en feuillets, la désintégration, le gonflement et la modification des rapports de tension.

La comparaison des constantes de diffusion de la roche d'accueil et des faibles conductivités hydrauliques montre que le transport s'effectue de manière prépondérante par diffusion. La rareté des phénomènes d'advection est confirmée par la répartition en forme d'arc des concentrations de nombreux éléments ainsi que des conditions isotopiques dans l'eau interstitielle, typique des processus de diffusion, observées aussi bien dans le forage de Benken qu'au laboratoire souterrain du Mont Terri. La forme des profils exclut tout flux advectif vertical de quelque importance. Ces "expériences sur le terrain" dans le Weinland zurichois et au Mont Terri sont particulièrement intéressantes du fait qu'elles portent sur de très longues périodes (de plusieurs centaines de milliers à plusieurs millions d'années) et sur des distances importantes (cent mètres et plus). Dans le cas du forage de Benken, les profils de diffusion ne sont pas seulement apparents dans les Argiles à Opalinus, mais également dans les formations situées au-dessus et en dessous. Ceci démontre, en outre, que dans une part importante des roches encaissantes, le transport s'effectue principalement par diffusion. Les paramètres de diffusion sont bien connus et correspondent aux valeurs prévues par comparaison avec d'autres types d'argiles.

La composition de l'eau interstitielle des Argiles à Opalinus – de l'eau de mer au début de la sédimentation – s'est modifiée au cours des processus d'enfouissement, de compaction et de soulèvement qui ont eu lieu pendant les derniers 180 millions d'années: sa salinité actuelle correspond à environ un tiers de celle de l'eau de mer. La composition de l'eau interstitielle dépend pour une grande part des équilibres chimiques avec la roche elle-même (en particulier avec les minéraux argileux et carbonates). La concentration des composants mobiles, indépendants de la composition de la roche (en particulier les anions), ne se modifie que très peu et à un rythme très lent, du fait que dans les Argiles à Opalinus, le transfert de solutés s'opère en majorité par diffusion. Le milieu géochimique est d'une façon générale très stable et réducteur. On n'a pas trouvé de traces de l'influence d'une glaciation sur ce milieu.

Efficacité des roches encaissantes en tant que barrière de confinement

Dans l'ensemble du secteur étudié, entre la roche d'accueil et les aquifère régionaux (Malm, Muschelkalk), se trouvent en majorité des roches argileuses et évaporitiques peu perméables, que l'on désigne sous le terme de roches encaissantes. Elles constituent, principalement dans le sens vertical, mais également à l'horizontale, une barrière de confinement géologique supplémentaire. Dans les roches encaissantes argileuses, on trouve des couches sableuses, calcaires ou dolomitiques, dont l'épaisseur ne dépasse souvent pas quelques mètres, et qui du fait de leur lithologie constituent des cheminements d'eau potentiels. Les radionucléides qui n'auraient pas complètement achevé leur désintégration au cours de leur migration au travers de la roche d'accueil rencontrent dans les roches encaissantes un milieu susceptible de retarder encore leur transfert vers la biosphère. Les radionucléides seraient tout d'abord, soit transportés latéralement sur plusieurs kilomètres le long des couches perméables au travers des roches encaissantes jusqu'à l'exutoire (future vallée fluviale), soit parviendraient dans les aquifères régionaux par diffusion verticale au travers des roches encaissantes argileuses. La capacité de confinement des roches encaissantes est analysée dans le rapport sur l'évaluation de la sûreté (Nagra 2002b) par le biais de calculs numériques basés sur les données présentées ici.

Impact d'un dépôt géologique sur la roche d'accueil dans le voisinage des galeries

La construction de galeries et de tunnels provoque des modifications des champs de contraintes, ce qui entraîne la formation d'une zone perturbée (ou zone endommagée) autour des ouvrages souterrains. L'impact de cette zone sur la roche d'accueil et les capacités de confinement du milieu reste toutefois très limité dans l'espace et dans le temps. Au cours de la phase de construction et d'exploitation, la conductivité de la zone perturbée augmente de plusieurs ordres de grandeur par rapport à celle de la roche d'accueil intacte. Après la fermeture du dépôt, on assiste à une resaturation à la fois de la zone perturbée et du remblayage de bentonite et de ciment, puis à une auto-cicatrisation de la zone perturbée, accélérée et amplifiée par la pression de gonflement de la bentonite. A l'issue de ce processus, la zone perturbée devrait se comporter à nouveau comme un milieu homogène poreux, avec une porosité légèrement plus élevée que la roche non perturbée et une conductivité axiale effective supérieure d'environ un ordre de grandeur à celle de la roche intacte. Sur la base des modèles hydrogéologiques, on a montré que, même si la perméabilité de la zone perturbée augmentait fortement, ceci n'aurait que peu d'incidence sur les mouvements d'eau dans un dépôt profond, car celui-ci dépend en premier lieu de la conductivité de la roche d'accueil non perturbée.

Les modifications géochimiques du voisinage des galeries (en particulier l'oxydation des pyrites) durant la phase de construction et d'exploitation du dépôt sont pratiquement négligeables, notamment du fait que les galeries ne resteront ouvertes que très peu de temps (deux ans au maximum). Après la fermeture du dépôt, dans les galeries pour déchets de moyenne activité à vie longue, l'interaction avec le mortier de ciment utilisé pour le remblayage produira des eaux interstitielles hyperalcalines, qui vont réagir sur de longues périodes avec les Argiles à Opalinus. Cette zone altérée pourrait, à long terme, atteindre une extension maximale de quelques mètres. Les minéraux qui se formeraient auraient pour effet de réduire la porosité et d'augmenter la capacité de sorption. Les modifications géochimiques dans le voisinage des galeries n'auront par conséquent pas d'impact négatif sur le confinement des radionucléides.

Du fait que les assemblages combustibles et les déchets de haute activité dégagent de la chaleur pendant plusieurs milliers d'années, il était nécessaire d'étudier les réactions de la roche d'accueil à l'échauffement. La température maximale sur les parois des galeries, atteinte au bout d'un millier d'années, s'élèvera à environ 95 °C. L'impact de cette augmentation de température est négligeable sur le plan minéralogique, car les Argiles à Opalinus ont déjà, au cours de leur

enfouissement, été soumises à des températures comparables (jusqu'à environ 85 °C) sur des périodes beaucoup plus longues. L'élévation de la température induit, outre des contraintes thermiques, une surpression de l'eau interstitielle ainsi qu'une réduction de la résistance mécanique de la roche d'accueil. Du fait qu'à ce moment les galeries du dépôt seront déjà remblayées, ceci ne conduira pas à un accroissement significatif de la zone perturbée, mais accélèrera vraisemblablement la désintégration de la roche et l'homogénéisation de l'espace interstitiel dans la zone perturbée et favorisera ainsi les processus d'auto-cicatrisation.

Dans un dépôt profond, la corrosion et la dégradation des déchets et des conteneurs génèrent des gaz, qui s'accumulent ensuite dans les galeries et les tunnels. Les processus de diffusion et d'advection ne sont pas suffisamment efficaces pour transporter l'ensemble des gaz sous forme soluble. La migration des gaz s'effectuera par conséquent en phase gazeuse, en priorité le long des couches de la roche d'accueil non perturbée, le long de la zone perturbée ou le long de fissures existantes, par écoulement biphasé classique ou encore (en présence d'une importante production de gaz) par la formation de fissures microscopiques (par dilatation). Pour les taux de production de gaz prévus dans les galeries et tunnels du dépôt, on peut exclure la formation de fissures (de tension) macroscopiques de quelque envergure. La formation de gaz peut induire des surpressions dans les galeries, susceptibles d'avoir une influence sur les mouvements d'eau dans la roche d'accueil. Toutefois, même dans le cadre de scénarios pessimistes, l'écoulement d'eau n'augmenterait au maximum que d'un ordre de grandeur. Dans ce cas également, la migration s'effectuerait de manière préférentielle par diffusion.

Evolution géologique à long terme

L'évolution géologique à long terme étudiée ici porte sur une période d'un million d'années. Pour cette durée, en se basant sur une analyse détaillée de la genèse géologique, il est possible d'effectuer des prédictions avec un taux de probabilité raisonnable. Pour des périodes plus longues, on peut faire des pronostics et certains ont déjà été avancés, mais l'incertitude augmente au fur et à mesure que la durée s'allonge.

Le Weinland zurichois compte parmi les régions de Suisse les moins actives du point de vue sismique. Toutefois, la région est située dans la zone péri-alpine qui, en raison du raccourcissement de la croûte terrestre dû à la tectonique alpine, subit une compression. Ceci se manifeste entre autres par un soulèvement qui est, par endroits, encore mesurable. Pour l'étude de l'évolution géologique à long terme, on peut logiquement supposer que ce mouvement va se poursuivre, tout au moins sur la période d'un million d'années prise en compte. Des données et informations émanant de sources diverses (géomorphologie, historique de l'enfouissement et des soulèvements, géodésie) permettent d'estimer la vitesse de soulèvement dans le Weinland zurichois à 0.1 mm par an au maximum, c'est-à-dire à 100 m par million d'années. On suppose que l'érosion linéaire suit le même rythme que le soulèvement et correspond donc également à 0.1 mm par an. Avec l'abaissement de la base d'érosion du Rhin jusqu'au point d'équilibre, on estime qu'une épaisseur supplémentaire pouvant atteindre 100 m pourrait être érodée. De ce fait, la couverture d'un dépôt situé à une profondeur de 650 m atteindrait encore au minimum 450 m au bout d'un million d'années. Les poussées glaciaires futures suivront le réseau de vallées qui existe aujourd'hui; l'ablation glaciaire le long des vallées principales suivra le même rythme que le soulèvement régional et local, et par conséquent se situera dans le même ordre de grandeur que l'érosion linéaire. Les chaînes de collines subsisteront pour une grande part et l'érosion glaciaire restera limitée aux vallées surcreusées existantes. On peut supposer que le calcaire du Jurassique supérieur (Malm), en raison de sa résistance à l'érosion, formera une sorte de "couverture de protection" sous la forme d'un relief topographique. Lors de l'estimation des taux d'érosion, cet aspect n'a toutefois pas été envisagé afin de ne retenir que le scénario le plus pessimiste.

La modélisation de l'impact d'une charge de glace supplémentaire montre que l'augmentation de l'écoulement d'eau total de la roche d'accueil vers les roches encaissantes, due à l'apparition de zones de surpressions dans les galeries et les tunnels, représente moins d'un ordre de grandeur. Dans ce cas également, la migration s'effectuera en priorité par diffusion.

De nombreuses observations attestent que la conductivité hydraulique des fissures dans les Argiles à Opalinus n'augmente de façon significative que lorsque la couverture a une épaisseur inférieure à 200 m. Une augmentation importante de la perméabilité de la roche dans son ensemble ne se produit que sur les quelques dizaines de mètres supérieurs. Du fait que la couverture rocheuse du dépôt (profondeur de référence: 650 m) sera encore d'au moins 450 m au bout d'un million d'années, on peut estimer que la conductivité de la roche d'accueil restera pratiquement constante.

Propriétés mécaniques de la roche d'accueil et aspects techniques de la construction

Le comportement géomécanique des Argiles à Opalinus découle en grande partie de leur micro-structure. Le degré de compaction de la roche argileuse, et par conséquent sa teneur en eau, sont ici décisifs. A l'échelle macroscopique, cette relation s'exprime notamment par le fait que la résistance est fortement dépendante de la teneur en eau. Alors que le processus de déformation est plutôt de type plastique lorsque la teneur en eau est élevée, de faibles teneurs en eau, mais aussi un assèchement (éventuellement dû à l'effet de tensions capillaires) induisent une forte augmentation de la résistance. Dans cette perspective, l'assèchement partiel de la roche dans le voisinage des galeries au cours de la phase d'exploitation est une conséquence souhaitable, qui contribue à la stabilisation des ouvrages pendant la phase de construction et d'exploitation. La resaturation qui intervient après la fermeture du dépôt produira des déformations temporaires et vraisemblablement une auto-cicatrisation de la roche perturbée par le creusement des ouvrages souterrains.

Pour l'aménagement d'infrastructures souterraines dans les Argiles à Opalinus, on dispose d'une expérience couvrant plus d'un siècle. Il s'avère que les tunnels percés dans les Argiles à Opalinus du Jura plissé ont généralement pu être réalisés sans problèmes, même lorsque la couverture atteignait 800 m d'épaisseur, et malgré les nombreuses failles présentes dans la roche. Lorsque l'on effectue une comparaison avec d'autres projets de construction, il convient de prendre en compte la direction différente de l'anisotropie de la roche par rapport à l'axe du tunnel, la teneur en eau et les champs de contraintes des roches locales. Si l'on tient compte de ces spécificités, il est possible d'extrapoler les résultats obtenus lors du creusement d'autres galeries (p. ex. au Mont Terri) aux Argiles à Opalinus du Weinland zurichois. Les calculs numériques qui incluent les paramètres géomécaniques et les champs de contraintes spécifiques du forage de Benken montrent que la sûreté est garantie pour les différentes cavités d'un dépôt géologique profond (Nagra 2002a). Les propriétés géotechniques des couches situées au-dessus de la roche d'accueil, traversées par la rampe d'accès et le puits, ont été dérivées de banques de données existantes.

Evaluation de l'état des connaissances et traitement des incertitudes

On peut estimer que la connaissance géologique du secteur étudié est très bonne, pour des raisons multiples, notamment la haute résolution des campagnes de sismique 2D et 3D, la grande homogénéité de la roche d'accueil dont la composition demeure pratiquement constante sur l'ensemble de la zone, les carottages et les tests effectués dans le forage de Benken, ainsi que les programmes d'observations néotectoniques mis en place sur plusieurs années. L'extension latérale et l'épaisseur de la roche d'accueil, de même que l'absence de grandes failles dans la

partie centrale du secteur, ont pu être démontrées. Les connaissances des propriétés de la roche d'accueil en ce qui concerne le transfert de solutés et la faisabilité technique sont relativement bien étayées, grâce à des recherches complémentaires dans d'autres sondages du nord de la Suisse et au laboratoire souterrain du Mont Terri. Si l'on effectue une comparaison avec d'autres roches argileuses, les paramètres obtenus correspondent aux valeurs prévues. Les connaissances rassemblées sur l'évolution à long terme des conditions tectoniques, hydrogéologiques et géochimiques constituent de plus une base solide pour l'évaluation de la géosphère en tant que barrière de confinement et de protection à long terme.

Afin de tenir compte des incertitudes existantes, pour une grande majorité des aspects traités, des variations ou des valeurs alternatives pessimistes, et dans certains cas des modèles conceptuels alternatifs, sont venus compléter les paramètres de référence. L'impact des incertitudes est évalué dans le cadre de l'analyse de la sûreté (Nagra 2002b). On peut estimer que les recherches effectuées dans les années à venir permettront de réduire encore ces incertitudes – plusieurs expériences étant déjà en cours sur le terrain et en laboratoire.

Dans son ensemble, la situation géologique du secteur étudié, y compris les propriétés de la roche d'accueil, remplit les conditions nécessaires pour un site d'accueil potentiel. Aucune donnée géologique ne remet fondamentalement en question la réalisation et la sûreté d'un dépôt géologique profond dans le Weinland zurichois.

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung.....	I
Summary	IX
Résumé	XVII
Inhaltsverzeichnis.....	XXV
Tabellenverzeichnis.....	XXXVII
Figurenverzeichnis	XLI
Beilagenverzeichnis	L
Autorenverzeichnis	LI
1 Einleitung und Grundsätze.....	1
1.1 Zielsetzung und Stellung des Berichts im Programm zur Entsorgung der hochaktiven Abfälle.....	1
1.1.1 Konsens bezüglich geologischer Endlagerung und der Verwendung eines geologischen Tiefenlagers	1
1.1.2 Erdwissenschaftliche Untersuchungen in der Schweiz	1
1.1.3 Der Entsorgungsnachweis	2
1.1.4 Qualitätssicherungsmassnahmen	3
1.2 Aufbau des Berichts.....	3
1.3 Komponenten und allgemeine zeitliche Entwicklung eines geologischen Tiefenlagers	4
1.3.1 Elemente des Sicherheitskonzepts eines geologischen Tiefenlagers.....	4
1.3.2 Zeitliche Entwicklung des Tiefenlagers	7
1.3.3 Grundanforderungen an ein potenzielles Standortgebiet und an das Wirtgestein	9
1.4 Langzeitabdichtungs- und Isolationskapazität von Tongesteinen	10
1.4.1 Allgemeine Aspekte	10
1.4.2 Natürliche Analoga.....	11
2 Regionale geologische Untersuchungen im Rahmen des Entsorgungsprogramms für hochaktive Abfälle	13
2.1 Geologische Kriterien für die Wahl der Untersuchungsregion Nordschweiz.....	13
2.2 Regionale erdwissenschaftliche Untersuchungen in der Nordschweiz	13
2.3 Untersuchungsprogramm Sedimentgesteine (1988–2000).....	14
2.3.1 Sedimentstudie 1988.....	14
2.3.2 Regionale Untersuchungen und Studien von 1989 bis 1993 in der Unteren Süsswassermolasse und im Opalinuston	15

2.3.3	Konsens über Priorität und Konzept für die lokale Erkundung des Opalinustons (1994)	20
2.3.4	Allgemeine und lokale Untersuchungen im Opalinuston (1995 bis 2000).....	20
2.4	Definition des Wirtgesteins und der Rahmengesteine.....	22
2.5	Erdwissenschaftliche Grundlagen der Geosynthese für den Entsorgungsnachweis	22
2.6	Vorgehenskonzept für die erdwissenschaftliche Evaluation geeigneter Optionen für ein geologisches Tiefenlager BE/HAA/LMA: Zusammenfassung	26
3	Ergebnisse der erdwissenschaftlichen Untersuchungen in der Nordostschweiz	27
3.1	Einleitung.....	27
3.2	Geologische und paläogeographische Entwicklung der Nordostschweiz	28
3.2.1	Kristallines Grundgebirge und Permokarbon	30
3.2.2	Trias	31
3.2.3	Jura	39
3.2.4	Kreide und Alttertiär.....	49
3.2.5	Molasseablagerungen	51
3.2.6	Postmolassische Zeit (Pliozän und Quartär).....	53
3.2.7	Geologische und paläogeographische Entwicklung der Nordostschweiz: Zusammenfassung der wichtigsten Erkenntnisse	55
3.3	Versenkungs- und Temperaturgeschichte.....	56
3.3.1	Zielsetzung, Datenbasis	56
3.3.2	Stratigraphie.....	578
3.3.3	Diagenese: Zementation und Aderbildung	599
3.3.4	Fluideinschlüsse.....	59
3.3.5	Tonmineralogie.....	60
3.3.6	Vitrinit-Reflexion	62
3.3.7	Organische Geochemie.....	63
3.3.8	Apatit-Spaltpuranalysen.....	67
3.3.9	<i>Shale compaction</i> -Analyse	69
3.3.10	Beckenmodellierung.....	72
3.3.11	Abhängigkeit der Gesteinsdichte von der maximalen und der heutigen Versenkung.....	77
3.3.12	Vergleich mit dem Opalinuston des Felslabors Mont Terri	78
3.3.13	Versenkungs- und Temperaturgeschichte: Zusammenfassung der wichtigsten Erkenntnisse	78

3.4	Struktureller Aufbau	79
3.4.1	Übersicht der tektonischen Baueinheiten der Nord- und Nordostschweiz	79
3.4.2	Die Bedeutung des Sockels	81
3.4.3	Das autochthone Deckgebirge (Mesoeuropa).....	83
3.4.4	Das kompressiv überprägte Deckgebirge (Neoeuropa)	85
3.4.5	Struktureller Aufbau: Zusammenfassung der wichtigsten Erkenntnisse	86
3.5	Junge Erdkrustenbewegungen (Neotektonik).....	88
3.5.1	Geologie und Tektonik des Neogens	88
3.5.2	Geomorphologie	90
3.5.3	Geodäsie	93
3.5.4	Seismologie	95
3.5.5	Spannungsmessungen	97
3.5.6	Geodynamisches Konzept Nordschweiz	99
3.5.7	Junge Erdkrustenbewegungen (Neotektonik): Zusammenfassung der wichtigsten Erkenntnisse	100
3.6	Regionale hydrogeologische Verhältnisse.....	101
3.6.1	Einleitung und Zielsetzung	101
3.6.2	Allgemeiner hydrogeologischer Überblick.....	102
3.6.3	Generelle hydrogeologische Charakterisierung der Schichtreihe in der Nordostschweiz	107
3.6.4	Quartär.....	107
3.6.5	Tertiär (Molasse)	109
3.6.6	Malm-Aquifer	111
3.6.7	Obere Rahmengesteine (Unterer Malm bis Mittlerer Dogger, z.T. Unterer Dogger).....	112
3.6.8	Wirtgestein (Opalinuston und Murchisonae-Schichten in Opalinustonfazies).....	113
3.6.9	Untere Rahmengesteine (Lias und Keuper).....	114
3.6.10	Muschelkalk-Aquifer	117
3.6.11	Buntsandstein, Permokarbon, Kristallin	119
3.6.12	Regionale hydrogeologische Verhältnisse: Zusammenfassung der wichtigsten Erkenntnisse	120
3.7	Regionale hydrochemische Verhältnisse	121
3.7.1	Malm-Aquifer	121
3.7.2	Obere Rahmengesteine	127
3.7.3	Wirtgestein.....	127
3.7.4	Untere Rahmengesteine: Lias und Keuper	127
3.7.5	Muschelkalk-Aquifer	133

3.7.6	Buntsandstein, Perm und Kristallin	138
3.7.7	Regionale hydrochemische Verhältnisse: Zusammenfassung der wichtigsten Erkenntnisse	138
3.8	Regionale geothermische Verhältnisse	139
3.8.1	Datengrundlage	139
3.8.2	Interpretation der Wärmeflusskarte	141
3.8.3	Regionale geothermische Verhältnisse: Zusammenfassung der wichtigsten Erkenntnisse	142
3.9	Rohstoffvorkommen	142
3.9.1	Kohle und Kohlegas	142
3.9.2	Kohlenwasserstoffe	143
3.9.3	Salz	143
3.9.4	Mineral- und Thermalwasser, Geothermie	144
3.9.5	Rohstoffvorkommen: Zusammenfassung der wichtigsten Erkenntnisse	144
3.10	Geologische Entwicklungsgeschichte und heutige geologische Verhältnisse in der Nordostschweiz: Zusammenfassung der wichtigsten generellen Erkenntnisse	145
4	Geologische und hydrogeologische Verhältnisse im Untersuchungsgebiet Zürcher Weinland	147
4.1	Einleitung	147
4.2	Struktureller Aufbau	147
4.2.1	Überblick	147
4.2.2	Strukturanalysen aufgrund der 3D-Seismik	150
4.2.3	Strukturkarten des Zürcher Weinlands	155
4.2.4	Strukturelemente des Zürcher Weinlands	162
4.2.5	Geodynamische Interpretation	166
4.2.6	Struktureller Aufbau: Zusammenfassung der wichtigsten Erkenntnisse	170
4.3	Lithostratigraphische Verhältnisse des Wirtgesteins und der Rahmengesteine ...	171
4.3.1	Ausdehnung und fazielle Verhältnisse des Wirtgesteins und der Rahmengesteine	171
4.3.2	Lithostratigraphische Verhältnisse des Wirtgesteins und der Rahmengesteine: Zusammenfassung der wichtigsten Erkenntnisse	177
4.4	In-situ-Spannungsverhältnisse	177
4.4.1	Interpretation der Felddaten	178
4.4.2	In-situ-Spannungsverhältnisse: Zusammenfassung der wichtigsten Erkenntnisse	180
4.5	Temperaturverhältnisse	180

4.5.1	Interpretation der Daten.....	180
4.5.2	Temperaturverhältnisse: Zusammenfassung der wichtigsten Erkenntnisse	181
4.6	Definition und Eigenschaften von hydrogeologischen Einheiten.....	182
4.6.1	Hydrogeologische Einheiten.....	182
4.6.2	Hydrogeologische Eigenschaften der Rahmengesteine und regionalen Aquifere	190
4.6.3	Definition und Eigenschaften von hydrogeologischen Einheiten: Zusammenfassung der wichtigsten Erkenntnisse	194
4.7	Hydrochemische und isotopengeochemische Charakterisierung der Grund- und Porenwässer	195
4.7.1	Grundwässer der regionalen Aquifere und des Sandsteinkeupers im Untersuchungsgebiet Zürcher Weinland	195
4.7.2	Porenwasserprofile im Wirtgestein und in den Rahmengesteinen	199
4.7.3	Diffusionsprofile in anderen Tonformationen	210
4.7.4	Hydrochemische und isotopengeochemische Charakterisierung der Grund- und Porenwässer: Zusammenfassung der wichtigsten Erkenntnisse	211
4.8	Paläohydrogeologische Entwicklung.....	212
4.8.1	Abhängigkeit der paläohydrogeologischen Entwicklung von geologischen, tektonischen und klimatischen Ereignissen und Prozessen	212
4.8.2	Die paläohydrogeologische Entwicklung der Porenwässer im Opalinuston	216
4.8.3	Paläohydrogeologische Entwicklung: Zusammenfassung der wichtigsten Erkenntnisse	216
4.9	Geologische und hydrogeologische Verhältnisse im Untersuchungsgebiet Zürcher Weinland: Zusammenfassung der wichtigsten generellen Erkenntnisse	217
5	Eigenschaften des Wirtgesteins	219
5.1	Einleitung.....	219
5.2	Der Opalinuston im Überblick: Eigenschaften, relevante Prozesse und deren Kopplungen	219
5.2.1	Der Opalinuston in der Nordschweiz	219
5.2.2	Struktur und Gefüge des Opalinustons in verschiedenen Massstäben.....	221
5.2.3	Relevante Prozesse und deren Kopplung.....	225
5.3	Lithologie und Mineralogie des Wirtgesteins.....	227
5.3.1	Lithologische Gliederung	228
5.3.2	Sedimentstrukturen	228
5.3.3	Mineralogie der Gesteinsmatrix	230
5.3.4	Mineralogie von Adern und Kluffüllungen	234
5.3.5	Mineralogie von Störungen	234

5.3.6	Lithologie und Mineralogie des Wirtgesteins: Zusammenfassung der wichtigsten Erkenntnisse	235
5.4	Porosität, Porenstruktur und Zustand des Porenwassers im Wirtgestein.....	235
5.4.1	Zielsetzungen.....	235
5.4.2	Wasser und gelöste Stoffe in tonigen Sedimentgesteinen: Konzepte.....	236
5.4.3	Nomenklatur und Methodik der Porositätsbestimmung im Wirtgestein	240
5.4.4	Methodik der Bestimmung von Porengrößenverteilung, spezifischer Oberfläche und dem Anteil an gebundenem Wasser.....	242
5.4.5	Porosität: Resultate und Diskussion	243
5.4.6	Porenstruktur und Zustand des Porenwassers im Wirtgestein der Bohrung Benken: Resultate und Diskussion	249
5.4.7	Porosität, Porenstruktur und Zustand des Porenwassers im Wirtgestein: Zusammenfassung der wichtigsten Erkenntnisse	255
5.5	Deformationsstrukturen im Wirtgestein	256
5.5.1	Strukturelles Inventar	256
5.5.2	Anatomie von Störungen	259
5.5.3	Mineralogie von Sprödstrukturen	260
5.5.4	Konzeptualisierung von Sprödstrukturen im Wirtgestein	260
5.5.5	Kleinräumige und mikroskopische Strukturen	265
5.5.6	Oberflächennahe Strukturen	265
5.5.7	Deformationsstrukturen im Wirtgestein: Zusammenfassung der wichtigsten Erkenntnisse	265
5.6	Petrophysikalische Eigenschaften des Wirtgesteins	266
5.6.1	Charakterisierung der Gesteine.....	266
5.6.2	Methodik und Resultate.....	267
5.6.3	Petrophysikalische Eigenschaften des Wirtgesteins: Zusammenfassung der wichtigsten Erkenntnisse	270
5.7	Deformationsverhalten des Wirtgesteins.....	270
5.7.1	Einführung konzeptueller Ansätze	271
5.7.2	Beschreibung der Konzepte mit mikro-mechanischen Modellen.....	280
5.7.3	Daten.....	286
5.7.4	Materialgesetz für bautechnische Fragestellungen	297
5.7.5	Materialgesetz zur Beschreibung des Langzeitverhaltens	305
5.7.6	Deformationsverhalten des Wirtgesteins: Zusammenfassung der wichtigsten Erkenntnisse	307
5.8	Hydraulische Eigenschaften des Wirtgesteins.....	308
5.8.1	Grundlagen zur Porenwasserbewegung im Wirtgestein.....	309
5.8.2	Hydrogeologische Datenbasis im Überblick	314

5.8.3	Vertiefte Interpretation ausgewählter Packertests in der Bohrung Benken	314
5.8.4	Hydraulische Eigenschaften des Wirtgesteins: Resultate	320
5.8.5	Porositäts-Permeabilitätsbeziehungen und Selbstabdichtung: Modellkonzepte	324
5.8.6	Empirische Befunde zur Selbstabdichtung	330
5.8.7	Konsistenz der Untersuchungsergebnisse mit anderen Befunden	332
5.8.8	Hydraulische Eigenschaften des Wirtgesteins: Zusammenfassung der wichtigsten Erkenntnisse	335
5.9	Gastransport im Wirtgestein	336
5.9.1	Gasausbreitungsmechanismen	336
5.9.2	Standortbezogene Datengrundlage	342
5.9.3	Konsistenz der standortbezogenen Untersuchungen mit anderen Befunden	350
5.9.4	Gastransportkapazität des Wirtgesteins und potenzielle Ausbreitungspfade	352
5.9.5	Gastransport im Wirtgestein: Zusammenfassung der wichtigsten Erkenntnisse	356
5.10	Diffusionseigenschaften	357
5.10.1	Untersuchungsmethoden	357
5.10.2	Ergebnisse aus dem Felslabor Mont Terri	358
5.10.3	Bohrung Benken: Diffusionseigenschaften des Wirtgesteins	361
5.10.4	Vergleich des Opalinustons mit anderen Tongesteinen	362
5.10.5	Weiterführende Untersuchungen	363
5.10.6	Migration von Kolloiden	364
5.10.7	Diffusionseigenschaften des Wirtgesteins: Zusammenfassung der wichtigsten Erkenntnisse	364
5.11	Osmotische Prozesse im Wirtgestein	365
5.11.1	Grundlagen	365
5.11.2	Experimentelle Bestimmung der osmotischen Effizienz	366
5.11.3	Abschätzung natürlicher osmotischer Effekte im Opalinuston	367
5.11.4	Abschätzung möglicher Artefakte bei hydraulischen Tests im Opalinuston	367
5.11.5	Osmotische Prozesse im Wirtgestein: Zusammenfassung der wichtigsten Erkenntnisse	368
5.12	Geochemie des Porenwassers im Wirtgestein	368
5.12.1	Methodische Aspekte	369
5.12.2	Datengrundlage	369
5.12.3	Berechnung der In-situ-Porenwasserchemie	374
5.12.5	Geochemie des Porenwassers im Wirtgestein: Zusammenfassung der wichtigsten Erkenntnisse	379

5.13	Eigenschaften des Wirtgesteins: Zusammenfassung der wichtigsten generellen Erkenntnisse	380
6	Darstellung der hydrogeologischen Verhältnisse im Zürcher Weinland und hydrogeologische Barrierenwirkung von Wirtgestein und Rahmengesteinen	381
6.1	Einleitung.....	381
6.2	Wirtgestein und Rahmengesteine als geologische Barrieren.....	381
6.3	Porenwasserdrücke im Wirtgestein und in den Rahmengesteinen	384
6.3.1	Untersuchungsschwerpunkte und Vorgehen	384
6.3.2	Porenwasser-Überdrücke in Tonformationen: Ursachen und Prozesse.....	384
6.3.3	Hydro-mechanische Prozesse zur Deutung der Porenwasser-Überdrücke	387
6.3.4	Kompaktions-Modellierungen zur Untersuchung der Porenwasser-Überdrücke	390
6.3.5	Porenwasserdrücke im Wirtgestein und in den Rahmengesteinen: Zusammenfassung der wichtigsten Erkenntnisse	397
6.4	Grundwasserflüsse und Fliesspfade im Wirtgestein und in den Rahmengesteinen.....	398
6.4.1	Zweck des lokalen hydrodynamischen Modells	398
6.4.2	Modellaufbau und Rechenfälle.....	399
6.4.3	Ergebnisse der hydrodynamischen Modellrechnungen	405
6.4.4	Interpretation der Modellierungsergebnisse	410
6.4.5	Grundwasserflüsse und Fliesspfade im Wirtgestein und in den Rahmengesteinen: Zusammenfassung der wichtigsten Erkenntnisse	418
6.5	Konzeptualisierung der möglichen Freisetzungspfade	419
6.5.1	Bedeutung der Freisetzungspfade.....	419
6.5.2	Konzeptualisierung und Charakterisierung der möglichen Freisetzungspfade	420
6.5.3	Konzeptualisierung der möglichen Freisetzungspfade: Zusammenfassung der wichtigsten Erkenntnisse	424
6.6	Hydrogeologische Verhältnisse im Zürcher Weinland und hydrogeologische Barrierenwirkung von Wirtgestein und Rahmengesteinen: Zusammenfassung der wichtigsten generellen Erkenntnisse	425
7	Auswirkungen eines geologischen Tiefenlagers auf das Wirtgestein und die Entwicklung des Stollenumfelds.....	427
7.1	Einleitung.....	427
7.1.1	Auslegung des geologischen Tiefenlagers.....	427
7.1.2	Zeitliche Entwicklung des Tiefenlagers	429
7.2	Bautechnische Betrachtungen zur generellen Tunnelstabilität.....	431

7.2.1	Erfahrungen aus Tunneln im Opalinuston.....	432
7.2.2	Bohrungen in Tonsteinen bzw. Tonschiefern.....	434
7.2.3	Bautechnische Betrachtungen zur generellen Tunnelstabilität: Zusammenfassung der wichtigsten Erkenntnisse	435
7.3	Entwicklung der Auflockerungszone während der Bau- und Betriebsphase.....	436
7.3.1	Struktur der Auflockerungszone im Felslabor Mont Terri	436
7.3.2	Hydrogeologische Veränderungen im Stollennahfeld im Mont Terri	439
7.3.3	Hydro-mechanische Modellierungen im Mont Terri (Modellkalibrierung)	440
7.3.4	Hydro-mechanische Modellierung Zürcher Weinland (Prognoserechnung).....	445
7.3.5	Diskussion der Modellierungsergebnisse.....	455
7.3.6	Entwicklung der Auflockerungszone während der Bau- und Betriebsphase: Zusammenfassung der wichtigsten Erkenntnisse	459
7.4	Langzeitentwicklung der Auflockerungszone nach dem Verschluss des Lagers	460
7.4.1	Aufsättigung	460
7.4.2	Felsmechanisches Langzeitverhalten.....	466
7.4.3	Selbstabdichtung und hydraulisches Langzeitverhalten	472
7.4.4	Langzeitentwicklung der Auflockerungszone nach dem Verschluss des Lagers: Zusammenfassung der wichtigsten Erkenntnisse	476
7.5	Geochemische Effekte im Umfeld des Tiefenlagers	477
7.5.1	Oxidationseffekte und Salzanreicherung während der Bau- und Betriebsphase.....	477
7.5.2	Langzeiteffekte von Zementporenwässern im Umfeld von LMA-Tunneln	481
7.5.3	Geochemische Effekte im Umfeld des Tiefenlagers: Zusammenfassung der wichtigsten Erkenntnisse	487
7.6	Temperatureffekte durch die Einlagerung wärmeproduzierender Abfälle	488
7.6.1	Konzept.....	489
7.6.2	Daten und Interpretationen	491
7.6.3	Systemanalyse	495
7.6.4	Temperatureffekte durch die Einlagerung wärmeproduzierender Abfälle: Zusammenfassung der wichtigsten Erkenntnisse	500
7.7	Akkumulation und Ausbreitung von Korrosions- und Degradationsgasen	501
7.7.1	Gasfliesspfade.....	502
7.7.2	Modellrechnungen zum Gasdruckaufbau in den LMA- und BE/HAA- Lagerbereichen	507
7.7.3	Bewertung des Kenntnisstands zur Gasausbreitung	511
7.7.4	Akkumulation und Ausbreitung von Korrosions- und Degradationsgasen: Zusammenfassung der wichtigsten Erkenntnisse	516

7.8	Einfluss des Tiefenlagers auf die Porenwasserbewegung im Wirtgestein.....	517
7.8.1	Relevanz und Zielsetzungen	517
7.8.2	Modellaufbau und Rechenfälle.....	517
7.8.3	Ergebnisse und Interpretation der Modellrechnungen.....	523
7.8.4	Bewertung der hydraulischen Situation im Umfeld des Tiefenlagers	528
7.8.5	Einfluss des Tiefenlagers auf die Porenwasserbewegung im Wirtgestein: Zusammenfassung der wichtigsten Erkenntnisse	529
7.9	Auswirkungen eines geologischen Tiefenlagers auf das Wirtgestein und die Entwicklung des Stollenumfelds: Zusammenfassung der wichtigsten generellen Erkenntnisse.....	530
8	Geologische Langzeitentwicklung	531
8.1	Einleitung.....	531
8.2	Grundannahmen und Konzepte	531
8.2.1	Methodik, Konzepte und Prozessverständnis.....	531
8.2.2	Erdgeschichtlicher Rahmen und geodynamisches Konzept	535
8.2.3	Zukünftige Klimaentwicklungen	536
8.2.4	Grundannahmen und Konzepte: Zusammenfassung der wichtigsten Erkenntnisse	540
8.3	Hebung, Erosion und Morphologie	541
8.3.1	Methodische Rahmenbedingungen.....	541
8.3.2	Hebung und Hebungsraten	542
8.3.3	Abtrag, Erosion.....	544
8.3.4	Die regionale Erosionsbasis und das Ausgleichslängenprofil des Rheins.....	547
8.3.5	Entwicklung des lokalen Reliefs und der Tiefenlage des Wirtgesteins.....	550
8.3.6	Entwicklung der Oberflächenverhältnisse (Hydro- und Biosphäre).....	554
8.3.7	Hebung, Erosion und Morphologie: Zusammenfassung der wichtigsten Erkenntnisse	557
8.4	Tektonische Störungen, Erdbeben, Magmatismus	558
8.4.1	Bestehende Störungen	558
8.4.2	Bildung neuer Störungen	559
8.4.3	Erdbeben und ihre Auswirkungen	560
8.4.4	Magmatische Prozesse.....	563
8.4.5	Tektonische Störungen, Erdbeben, Magmatismus: Zusammenfassung der wichtigsten Erkenntnisse	563
8.5	Hydrogeologische Langzeitentwicklung	564
8.5.1	Bedeutung, Zielsetzung und Abgrenzung.....	564

8.5.2	Veränderungen von Formationseigenschaften und potenziellen Freisetzungspfaden	565
8.5.3	Veränderungen von hydraulischem Systemzustand und Randbedingungen	569
8.5.4	Eisauflast während periodischer Vergletscherungen	570
8.5.5	Hydrogeologische Langzeitentwicklung: Zusammenfassung der wichtigsten Erkenntnisse	571
8.6	Langzeitentwicklung der geochemischen Verhältnisse im Wirtgestein	572
8.6.1	Stabilität der geochemischen Bedingungen	572
8.6.2	Modellrechnungen zur Entwicklung des Chloridgehalts im Wirtgestein	572
8.6.3	Langzeitentwicklung der geochemischen Verhältnisse im Wirtgestein: Zusammenfassung der wichtigsten Erkenntnisse	573
8.7	Geologische Langzeitentwicklung: Zusammenfassung der wichtigsten generellen Erkenntnisse	574
9	Geologischer Datensatz für den Standortnachweis, den Nachweis der Langzeitsicherheit und der bautechnischen Machbarkeit eines geologischen Tiefenlagers	577
9.1	Einleitung	577
9.1.1	Datensatz für den Standortnachweis: Ausdehnung eines geeigneten Wirtgesteinskörpers (Kap. 9.3)	577
9.1.2	Geologischer Datensatz für den Nachweis der Langzeitsicherheit (Kap. 9.4)	577
9.1.3	Geologischer Datensatz für den Nachweis der bautechnischen Machbarkeit (Kap. 9.5)	578
9.2	Qualität der Datengrundlage: Variabilität der Eigenschaften des Wirtgesteins und Übertragbarkeit der Untersuchungsergebnisse auf das Untersuchungsgebiet Zürcher Weinland	578
9.3	Datensatz für den Standortnachweis: Ausdehnung eines geeigneten Wirtgesteinskörpers im Untersuchungsgebiet Zürcher Weinland	579
9.3.1	Lagerung, Mächtigkeit und Lithologie	579
9.3.2	Verfügbare Fläche für ein geologisches Tiefenlager im Untersuchungsgebiet Zürcher Weinland	580
9.4	Geologischer Datensatz für den Nachweis der Langzeitsicherheit	583
9.4.1	Eigenschaften des ungestörten Wirtgesteins hinsichtlich Radionuklid-Transport	583
9.4.2	Transporteigenschaften potenziell wasserführender Systeme (Störungen) im Wirtgestein	586
9.4.3	Freisetzungspfade und Parameter für die Modellierung des Radionuklid-Transports im Wirtgestein und in den Rahmengesteinen	588
9.4.4	Geologische Information für die Biosphärenmodellierung	594
9.4.5	Geometrie und Eigenschaften der Auflockerungszone verschiedener Untertagebauwerke	594

9.4.6	Wasserflüsse im Umfeld des Tiefenlagers.....	597
9.4.7	Parameter für die Modellierung des Gastransports (Korrosions- und Degradationsgase, volatile Radionuklide)	597
9.4.8	Langzeitentwicklung des Wirtgesteins mit dem eingeschlossenen Tiefenlager.....	603
9.5	Geologischer Datensatz für den Nachweis der bautechnischen Machbarkeit	604
9.5.1	Diskussion der wichtigsten Parameter	604
9.5.2	Datensatz Wirtgestein.....	605
9.5.3	Geotechnische Beurteilung der geologischen Verhältnisse im Untersuchungsgebiet Zürcher Weinland	609
10	Zusammenfassung, projektbezogene Schlussfolgerungen und Bewertung des Kenntnisstands	611
10.1	Zielsetzung und Inhalt des Berichts.....	611
10.2	Schritte zur Auswahl und Charakterisierung eines Wirtgesteins und eines potenziellen Standortgebiets erster Priorität	611
10.3	Übertragbarkeit von Untersuchungsergebnissen aus verschiedenen Lokalitäten	612
10.4	Erfüllung der Grundanforderungen an das geologische Umfeld eines Tiefenlagers	612
10.5	Ausdehnung eines geeigneten Wirtgesteinskörpers (Standortnachweis)	613
10.6	Geologischer Datensatz für den Nachweis der Langzeitsicherheit.....	614
10.6.1	Eigenschaften des Wirtgesteins	614
10.6.2	Barrierenwirkung der Rahmengesteine	616
10.6.3	Auswirkungen eines geologischen Tiefenlagers auf das Wirtgestein im Stollenumfeld.....	617
10.6.4	Geologische Langzeitentwicklung.....	619
10.7	Geologischer Datensatz für den Nachweis der bautechnischen Machbarkeit	620
10.7.1	Felsmechanische Eigenschaften des Wirtgesteins	620
10.7.2	Bautechnische Aspekte.....	620
10.8	Bewertung des Kenntnisstands	621
10.8.1	Allgemeine Bewertung	621
10.8.2	Identifizierte Ungewissheiten	621
10.9	Abschliessende Bewertung.....	623
	Literaturverzeichnis.....	625

Tabellenverzeichnis

Tab. 2.4-1: Gliederung der mesozoischen Sedimentgesteine in der Nordostschweiz im Hinblick auf ihre Funktion für die Langzeitsicherheit: Terminologie, Definitionen.	23
Tab. 2.5-1: Übersicht über die Herkunft der wichtigsten erdwissenschaftlichen Grundlagen für den Entsorgungsnachweis.	24
Tab. 3.3-1: Für die Charakterisierung der Versenkungs- und Temperaturgeschichte des Opalinustons angewandte Methoden.	577
Tab. 3.3-2: Maximale Temperaturen während der mesozoischen und der jungtertiären Versenkung in der Bohrung Benken, berechnet durch Modellierung von Apatit-Spaltspurenmessungen.	68
Tab. 3.3-3: Aufgrund der Beckenmodellierung berechnete Versenkung, heutige Tiefenlage und petrophysikalische Parameter des Opalinustons.	74
Tab. 3.7-1: Zusammenfassung von Infiltrationsbedingungen und Verweilzeiten der Grundwasserproben aus dem Malm-Aquifer.	125
Tab. 3.7-2: Zusammenfassung von Infiltrationsbedingungen und mittleren Verweilzeiten von ausgewählten Grundwasserproben aus dem Keuper (Sandsteinkeuper).	132
Tab. 3.7-3: Übersicht über Infiltrationsbedingungen und Verweilzeiten von ausgewählten Proben aus dem Muschelkalk-Aquifer.	136
Tab. 4.2.1: Tektonische Bewegungen an den Strukturelementen des Zürcher Weinlands.	167
Tab. 4.4-1: Primärspannungszustand für eine Teufe von 650 m im Opalinuston.	179
Tab. 4.5-1: Tabelle der Gleichgewichtstemperatur in 100 m-Schritten.	181
Tab. 4.6-1: Durchlässigkeiten und hydraulische Süswasser-Druckhöhen aus Packertests der Bohrung Benken.	183
Tab. 4.6-2: Gliederung der Schichtreihe der Bohrung Benken in hydrogeologische Einheiten.	192
Tab. 4.7-1: Zusammensetzung der beprobaren Grundwässer aus Malm, Stubensandstein-Formation (Sandsteinkeuper), Muschelkalk und Buntsandstein in der Bohrung Benken.	197
Tab. 4.7-2: Anfangs- und Randbedingungen für die Diffusion im Opalinuston der Bohrung Benken.	201
Tab. 5.3-1: Mineralogische Zusammensetzung des Wirtgesteins in der Bohrung Benken sowie des Opalinustons des Felslabors Mont Terri.	230
Tab. 5.3-2: Vergleich von mineralogischen Laboranalysen mit Daten aus Geophysik-Logs der Bohrung Benken.	231
Tab. 5.4-1: Definitionen wichtiger Begriffe.	237
Tab. 5.4-2: Überblick über gemessene Porositäts- und Dichtewerte des Wirtgesteins der Bohrung Benken.	244

Tab. 5.4-3: Zusammenfassung von Literaturdaten bezüglich Dichte und Porosität von Opalinuston der Nordschweiz.....	247
Tab. 5.4-4: Überblick über Werte der spezifischen Oberflächen von Opalinuston in der Bohrung Benken.....	250
Tab. 5.4-5: Prozentuale Anteile der verschiedenen Porenklassen.....	250
Tab. 5.4-6: Schätzungen des Anteils an gebundenem Wasser für das Wirtgestein in der Bohrung Benken.....	253
Tab. 5.4-7: Vergleich der Daten zur Porenstruktur von Proben aus der Bohrung Benken und dem Felslabor Mont Terri.....	254
Tab. 5.6-1: Charakteristische petrophysikalische Parameter des Opalinustons aus der Bohrung Benken.....	268
Tab. 5.6-2: Wärmeleitfähigkeiten des Opalinustons (Nagra 2001).....	269
Tab. 5.7-1: Relevanz der felsmechanischen Materialparameter für den Opalinuston.....	271
Tab. 5.7-2: Deformationsparameter des Opalinustons aus Proben der Bohrung Benken.....	289
Tab. 5.7-3: Vergleichende Zusammenstellung der Mittelwerte für die gemessenen und aus den Triaxialtests extrapolierten einaxialen Druckfestigkeiten.....	292
Tab. 5.7-4: Abgeleitete Parameter für den Opalinuston (Datensatz Benken) für ein bilineares bzw. ein vereinfachtes lineares Mohr-Coulomb-Modell für die bautechnische Machbarkeitsstudie.....	300
Tab. 5.7-5: Parameter zum Langzeit-Deformationsmodell.....	307
Tab. 5.8-1: Nachweisführung zur Gültigkeit des Darcy-Gesetzes und Abschätzung des Anfangsgradienten.....	311
Tab. 5.8-2: Hydrogeologische Datenbasis zur Charakterisierung des Wirtgesteins.....	315
Tab. 5.8-3: Übersicht über relevante Packertestergebnisse der Bohrung Benken, des Felslabors Mont Terri und der Nagra-Sondierbohrungen Weiach, Riniken und Schafisheim.....	321
Tab. 5.8-4: Zusammenfassung der Ergebnisse aus Permeametertests und aus Strukturuntersuchungen.....	322
Tab. 5.8-5: Zusammenfassung der empirischen Befunde zur Selbstabdichtung von Sprödstrukturen im Opalinuston.....	332
Tab. 5.9-1: Übersicht zum Spektrum der möglichen Gasausbreitungsmechanismen.....	3377
Tab. 5.9-2: Zweiphasenfluss-Parameter aus Laborexperimenten an Opalinustonkernen aus der Bohrung Benken und aus dem Felslabor Mont Terri.....	345
Tab. 5.9-3: Auswertung der In-situ-Gasinjektionstests im Felslabor Mont Terri und in der Bohrung Benken.....	346
Tab. 5.10-1: Diffusionsdaten für den Opalinuston aus dem Felslabor Mont Terri.....	360
Tab. 5.10-2: Diffusionsdaten für den Opalinuston aus der Bohrung Benken.....	361
Tab. 5.10-3: Diffusionsdaten für verschiedene Tongesteine.....	362
Tab. 5.12-1: Summe der austauschbaren Kationen und In-situ-Kationenpopulationen.....	371
Tab. 5.12-2: Zusammenstellung der Parameter, Herkunft der Daten, deren Behandlung und die Eingabewerte für die Modellierung des Referenzwassers.....	375

Tab. 5.12-3: Zusammensetzung der Referenzwässer.....	377
Tab. 5.12-4: Sättigungsindices und Gaspartialdrücke für die Zusammensetzung des Referenzwassers.....	378
Tab. 6.3-1: Übersicht über die NEWBAS-Rechenfälle mit Eingangsparametern und Ergebnissen.....	393
Tab. 6.4-1: Übersicht über die im Referenzfall RF0 verwendeten Modellparameter.....	402
Tab. 6.4-2: Übersicht über die in den Rechenfällen RF1–RF8 verwendeten Modellparameter.....	405
Tab. 6.4-3: Arbeitshypothesen im Rahmen der hydrodynamischen Modellierungen.....	415
Tab. 6.4-4: Hydraulische Druckhöhen und Betrag des spezifischen Vertikalfusses in der Wirtgesteinseinheit für die Rechenfälle RF0–RF8 (Bohrung Benken).....	417
Tab. 7.3-1: Gliederung der Auflockerungszone der <i>Galerie de Secours</i> im Mont Terri.....	438
Tab. 7.3-2: Felsmechanisches Parametermodell Opalinuston Mont Terri.....	441
Tab. 7.3-3: Berechnungsfälle für die Untersuchung der Auflockerungszone.....	448
Tab. 7.3-4: Berechnete Auflockerungszone (AUZ) für verschiedene Untertagebauwerke.....	458
Tab. 7.4-1: Pessimistische Abschätzung der Porositäts- und Permeabilitätsänderungen (gemäss der Kozeny-Carman-Gleichung) in der inneren Auflockerungszone.....	474
Tab. 7.5-1: Massenbilanzen und Volumenbilanzen der Pyritoxidation.....	479
Tab. 7.6-1: Geochemische Prozesse aufgrund des Wärmepulses und mögliche Konsequenzen.....	489
Tab. 7.6-2: Hydro-mechanische Prozesse aufgrund des Wärmepulses und mögliche Konsequenzen.....	491
Tab. 7.6-3: Thermische Parameter für die THM-gekoppelten Berechnungen.....	497
Tab. 7.6-4: Thermische Leistung der BE-Behälter bezogen auf den Zeitpunkt der Einlagerung.....	498
Tab. 7.7-1: Potenzielle Gasfliesspfade und ihre Bedeutung für die Ausbreitung der in den Lagerstollen generierten Korrosions- und Degradationsgase.....	504
Tab. 7.7-2: Simulation des Gasdruckaufbaus in den LMA-Lagertunneln und BE/HAA-Lagerstollen: Spektrum der Modellparameter für die Sensitivitätsanalysen.....	508
Tab. 7.7-3: Gasausbreitungsvarianten für das in den Lagerstollen produzierte Gas.....	514
Tab. 7.8-1: Geometrie und hydraulische Eigenschaften der Lagereinbauten inklusive der zweischaligen Auflockerungszone.....	521
Tab. 7.8-2: Übersicht über die in den Rechenfällen RLU0–RLU52 verwendeten Modellparameter.....	522
Tab. 7.8-3: Spezifische Flüsse und Fliessweglängen in der Wirtgesteinseinheit für die Rechenfälle RLU0–RLU52.....	524
Tab. 9.4-1: Referenzwerte für das ungestörte Wirtgestein.....	584
Tab. 9.4-2: Hydraulische Parameter für das Wirtgestein.....	585

Tab. 9.4-3: Diffusionsparameter für das Wirtgestein.....	587
Tab. 9.4-4a: Hydrogeologische Parameter der möglichen Freisetzungspfade in Wirt- und Rahmengesteinen.....	590
Tab. 9.4-4b: Hydrogeologische Parameter der möglichen Freisetzungspfade in Wirt- und Rahmengesteinen.....	592
Tab. 9.4-4c: Hydrogeologische Parameter der möglichen Freisetzungspfade in Wirt- und Rahmengesteinen.....	593
Tab. 9.4-5: Geometrie und Eigenschaften der inneren Auflockerungszone der Untertagebauten.....	595
Tab. 9.4-6: Wasserflüsse (Darcy-Flüsse) im Umfeld des Tiefenlagers: Auswirkung des Lagers mit und ohne Überdrücke.	599
Tab. 9.4-7: Relevante gesteinspezifische Parameter für die Modellierung der Gasausbreitung im Wirtgestein, im Wedelsandstein, in der Neuhauser Störung und im Malm-Aquifer.	600
Tab. 9.5-1: Felsmechanische Parameter.....	606
Tab. 9.5-2: Parameterempfehlung für ein lineares Mohr-Coulomb-Materialgesetz für Opalinuston.....	607
Tab. 9.5-3: Parameterempfehlung für ein bi-lineares Mohr-Coulomb-Materialgesetz für Opalinuston.....	608
Tab. 9.5-4: Gebirgsverhältnisse entlang dem geologischen Profil der Bohrung Benken.....	610

Figurenverzeichnis

Fig. 1.2-1: Aufbau des Geosynthese-Berichts, genereller Informations- und Datenfluss.	5
Fig. 1.3-1: Anlagenkonzept eines geologischen Tiefenlagers für HAA, BE und LMA.	8
Fig. 1.4-1: Fossiles Holz in oberpliozänem Ton. Dunarobba, Italien.	12
Fig. 2.3-1: Untersuchungsgebiete für die Sedimentgesteine Opalinuston und Untere Süsswassermolasse.	17
Fig. 2.3-2: Regionale strukturgeologische Übersicht der Nordostschweiz auf dem Niveau "Basis Opalinuston".	18
Fig. 3.2-1: Überblick über die geologische Entwicklung der Nordschweiz.	29
Fig. 3.2-2: Stratigraphie Nordostschweiz. Paläogeographie: Stubensandstein-Formation.	37
Fig. 3.2-3: Paläogeographische Situation zu Beginn der Ablagerung des Opalinustons.	41
Fig. 3.2-4: Gliederung und Korrelation des Opalinustons von Weiach, Benken und Mont Terri aufgrund der Lithologie und der mineralogischen Zusammensetzung.	42
Fig. 3.2-5: Paläogeographie und Isopachen: Opalinuston sowie Murchisonae-Schichten in toniger Fazies.	44
Fig. 3.2-6: Paläogeographie: Wedelsandstein-Formation/Dogger γ /Sowerbyi-Sauzei-Schichten.	47
Fig. 3.2-7: Chronostratigraphischer Querschnitt durch das Ostschweizer Molassebecken.	50
Fig. 3.2-8: Relative Reichweite der verschiedenen Gletschervorstösse während des Quartärs in der Nordostschweiz, kalt- und warmzeitliche Beleglokalitäten.	54
Fig. 3.2-9: Morphostratigraphisches Schema der quartären Ablagerungen in der Nordostschweiz.	55
Fig. 3.3-1: Resultate der Vitrinit-Reflexions-Messungen an Kern- und <i>Cutting</i> -Material der Bohrungen Benken, Weiach und Herdern-1.	61
Fig. 3.3-2: Zusammensetzung der Chloroform-Extrakte an Kernmaterial der Bohrung Benken und des Felslabors Mont Terri.	64
Fig. 3.3-3: Beispiele von Isomerisationsverhältnissen von Biomarkern an Material aus der Bohrung Benken und aus dem Felslabor Mont Terri.	65
Fig. 3.3-4: Zusammenhang zwischen Zeit und Versenkungstemperatur, berechnet aufgrund von experimentell bestimmten Zeit-Temperatur-Integralen für Biomarker.	67
Fig. 3.3-5: <i>Shale compaction</i> -Analyse an Opalinuston verschiedener Bohrungen in der Nordschweiz.	71
Fig. 3.3-6: Rekonstruierte Versenkungsgeschichte der Sedimente im Bereich der Bohrungen Benken, Weiach und Herdern-1.	75
Fig. 3.3-7: Modellierte Temperaturgeschichte der Basis des Opalinustons in den Bohrungen Benken, Weiach und Herdern-1.	76

Fig. 3.3-8: Beziehung zwischen Gesteinsdichte, Maximalversenkung und heutiger Tiefenlage des Opalinustons an verschiedenen Lokalitäten der Nordschweiz.	77
Fig. 3.4-1: Schematische geologische Profile durch die zentrale (A) und die östliche (B) Nordschweiz.	80
Fig. 3.5-1: Hebungsraten in m/Ma nach geomorphologischen und geologischen Kriterien (Zeitraum: Spätes Miozän bis Pleistozän).	93
Fig. 3.5-2: Epizentren der instrumentell erfassten Erdbeben seit der Inbetriebnahme des Nagra-Stationsnetzes.	96
Fig. 3.5-3: Überblick über die Orientierung des rezenten Spannungsfelds in der Nordschweiz.	97
Fig. 3.5-4: Geodynamisches Konzept Nordschweiz.	98
Fig. 3.6-1: Schematische hydrostratigraphische Gliederung der Schichtreihe in der Nordostschweiz und im angrenzenden Gebiet westlich der Aare.	103
Fig. 3.6-2: Übersicht über wichtige Nutzungen von Tiefengrundwässern in der Nordostschweiz und angrenzenden Gebieten.	105
Fig. 3.6-3: Durchlässigkeits- und Druckhöhenprofile Malm–Muschelkalk aus Tiefbohrungen der Nagra und der Erdölindustrie in der Nordschweiz.	106
Fig. 3.6-4: W–E-Profile von hydraulischen Durchlässigkeiten aus potenziell durchlässigen Formationen in Bohrungen der Nordschweiz und Baden-Württembergs.	108
Fig. 3.6-5: Druckhöhenverteilung im Malm-Aquifer.	110
Fig. 3.6-6: Druckhöhenverteilung im Sandsteinkeuper.	116
Fig. 3.6-7: Druckhöhenverteilung im Muschelkalk-Aquifer.	118
Fig. 3.7-1: Regionale Verteilung der Grundwasserproben aus dem Malm-Aquifer.	122
Fig. 3.7-2: Na/Cl-Verhältnis und Mineralisation der drei verschiedenen Typen von Malm-Grundwässern.	123
Fig. 3.7-3: Werte der stabilen Isotope von Wasser in den Proben aus dem Malm-Aquifer.	124
Fig. 3.7-4: Regionale Verteilung der Grundwasserproben aus dem Keuper (Sandsteinkeuper).	128
Fig. 3.7-5: Br/Cl- und Na/Cl-Verhältnisse in den Grundwasserproben aus dem Keuper (Sandsteinkeuper).	129
Fig. 3.7-6: Werte der stabilen Isotope von Wasser in den Grundwasserproben aus dem Keuper (Sandsteinkeuper).	130
Fig. 3.7-7: Regionale Verteilung der Grundwasserproben aus dem Muschelkalk-Aquifer.	133
Fig. 3.7-8: Na- und Cl-Gehalte in den Grundwasserproben aus dem Muschelkalk-Aquifer.	134
Fig. 3.7-9: Werte der stabilen Isotope von Wasser in den Proben aus dem Muschelkalk-Aquifer.	135
Fig. 3.8-1: Wärmeflusskarte der Nordschweiz; detaillierter Datensatz mit Identifikation der Bohrungen.	140

Fig. 4.2-1: Tektonische Übersichtskarte des Zürcher Weinlands und seiner Umgebung (ohne Quartär).....	149
Fig. 4.2-2: Perspektivische Darstellung der interpretierten 3D-seismischen Daten im zentralen Bereich des Untersuchungsgebiets Zürcher Weinland.....	151
Fig. 4.2-3: Lokales geologisches Modell Zürcher Weinland.	152
Fig. 4.2-4: Horizontscheibe der Amplituden im Bereich des Markerhorizonts "Basis Mesozoikum".....	153
Fig. 4.2-5: Dip-Attributkarten verschiedener Markerhorizonte der 3D-Seismik.	154
Fig. 4.2-6: Attributkarten des Top Lias (= Basis Opalinuston) ohne (links) und mit (rechts) Subtraktion der regionalen Schichtneigung.....	155
Fig. 4.2-7: Strukturkarte Basis Mesozoikum, Massstab 1:100'000.....	157
Fig. 4.2-8: Strukturkarte Top Muschelkalk (3D-Marker Unterer Gipskeuper), Massstab 1:100'000.	158
Fig. 4.2-9: Strukturkarte Top Lias (Basis Opalinuston), Massstab 1:100'000.	159
Fig. 4.2-10: Strukturkarte Top Malm, Massstab 1:100'000.....	160
Fig. 4.2-11: Crossline 1415 aus dem Süden des 3D-Seismikgebiets.	161
Fig. 4.2-12: Beispiel einer kompressiven Struktur im Südteil des 3D-Seismikgebiets.....	166
Fig. 4.3-1: Lithostratigraphisches Profil der Bohrung Benken.	172
Fig. 4.3-2: Korrelation der bohrlochgeophysikalischen und lithostratigraphischen Daten der Bohrung Benken mit dem 3D-seismischen Datensatz.....	173
Fig. 4.3-3: Räumliche Extrapolation der lithostratigraphischen Verhältnisse ausgehend von der Bohrung Benken auf das Messgebiet der 3D-Seismik (Wirtgestein und Rahmengesteine).	174
Fig. 4.3-4: Isopachenkarte Wirtgestein (Opalinuston einschliesslich Murchisonae-Schichten).	176
Fig. 4.4-1: Ergebnisse der Spannungsmessungen nach der <i>Hydraulic-Fracturing</i> -Methode. Die vertikale Hauptspannung wurde aus der Auflast berechnet.....	178
Fig. 4.6-1: Bohrung Benken: Lithologisches Profil mit hydraulischen Durchlässigkeiten und Druckhöhen aus Packertests und Langzeitbeobachtung.....	185
Fig. 4.6-2: Gliederung der Schichtfolge Malm bis Muschelkalk in hydrogeologische Einheiten.....	186
Fig. 4.6-3: Wasserführende Systeme in den Rahmengesteinen.....	187
Fig. 4.7-1: Beziehung zwischen $\delta^{18}\text{O}$ und $\delta^2\text{H}$ von beprobten Grundwässern und Porenwässern aus den gering durchlässigen Lithologien des Doggers, Lias und Keupers in der Bohrung Benken im Vergleich zum Bereich rezenter Grundwässer.....	199
Fig. 4.7-2: Variation von $\delta^2\text{H}$ und $\delta^{18}\text{O}$ in Grund- und Porenwässern als Funktion der Entnahmetiefe in der Bohrung Benken.....	202
Fig. 4.7-3: Für verschiedene Zeiten berechnete Diffusionsprofile von $\delta^2\text{H}$ und $\delta^{18}\text{O}$ bei In-situ-Temperatur (gestrichelte Linien) im Vergleich zu den Messdaten aus der Bohrung Benken.....	204

Fig. 4.7-4:	Variation von Chlorid und $\delta^{37}\text{Cl}$ in Grund- und Porenwässern als Funktion der Entnahmetiefe in der Bohrung Benken.....	206
Fig. 4.7-5:	Für verschiedene Aufbauzeiten berechnete Diffusionsprofile von Chlorid und $\delta^{37}\text{Cl}$ im Vergleich zu den Messdaten aus der Bohrung Benken.	207
Fig. 4.7-6:	Variation von He-Gehalt in Grund- und Porenwässern und $^3\text{He}/^4\text{He}$ -Verhältnis in Grund-, Porenwässern und Gestein als Funktion der Entnahmetiefe in der Bohrung Benken.....	208
Fig. 4.7-7:	Variation des $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ -Verhältnisses in Grund- und Porenwässern als Funktion der Entnahmetiefe in der Bohrung Benken.	210
Fig. 5.2-1:	Gehäusereste des Opalinuston-Leitfossils <i>Leioceras opalinum</i>	220
Fig. 5.2-2:	Aufschluss des Opalinustons in der Tongrube Siblingen.	221
Fig. 5.2-3:	Illustration des Opalinustons in verschiedenen Massstäben.....	222
Fig. 5.2-4:	Konzeptuell vereinfachte Struktur des Opalinustons in verschiedenen Massstäben.	223
Fig. 5.2-5:	Kopplung zwischen Gesteinsstruktur, Deformationsverhalten und Stofftransporteigenschaften im Opalinuston.	226
Fig. 5.3-1:	Kernfotos des Wirtgesteins aus der Bohrung Benken.	229
Fig. 5.3-2:	Mineralogische Zusammensetzung des Opalinustons in der Nordschweiz.....	232
Fig. 5.3-3:	Aufgrund von geophysikalischen Logs bestimmter Tongehalt im Bereich des Wirtgesteins in der Bohrung Benken.....	232
Fig. 5.3-4:	Mineralogische Zusammensetzung des Opalinustons im Vergleich mit anderen ebenfalls gut untersuchten tonreichen Formationen.....	233
Fig. 5.4-1:	Konzeptuelle Vorstellungen zur Struktur von Wasser in der Nähe von Tonmineraloberflächen im Subnanometerbereich.....	238
Fig. 5.4-2:	Gefüge des Opalinustons im Raster-Elektronenmikroskop.....	245
Fig. 5.4-3:	Porosität des Opalinustons an verschiedenen Lokalitäten.....	246
Fig. 5.4-4:	Vergleich von Gesteinsdichte des getrockneten Gesteins und der Porosität von Opalinuston des Felslabors Mont Terri mit Opalinuston der Bohrung Benken.....	248
Fig. 5.4-5:	Porosität von <i>Fault gouges</i> im <i>Main fault</i> des Felslabors Mont Terri im Vergleich zur undeformierten Gesteinsmatrix.....	249
Fig. 5.4-6:	Porengrößenverteilungen im Bereich der Mesoporen von Opalinuston aus der Bohrung Benken und aus dem Felslabor Mont Terri, abgeleitet aus Ad- und Desorptionsisothermen von Stickstoff.....	251
Fig. 5.4-7:	Porengrößenverteilungen im Bereich der Mesoporen von Opalinuston aus der Bohrung Benken und aus dem Felslabor Mont Terri, abgeleitet aus Ad- und Desorptionsisothermen von Wasser.	252
Fig. 5.5-1:	Kleine Störung im Opalinuston der Bohrung Benken (601.82–601.95 m).	257
Fig. 5.5-2:	Strukturelle Karte einer Störung in der Tongrube Siblingen.....	258
Fig. 5.5-3:	Karte des <i>Main fault</i> im Felslabor Mont Terri (vertikaler Schnitt).	259

Fig. 5.5-4:	Typen von Brucharchitekturen (nach Caine et al. 1996).....	261
Fig. 5.5-5:	Vereinfachte konzeptuelle Darstellung von beobachteten Brucharchitekturen im Opalinuston.	263
Fig. 5.5-6:	Zusammenfassende Darstellung der Herleitung der geometrischen konzeptuellen Modelle von Störungen im Opalinuston an einem Beispiel aus der Tongrube Siblingen.	264
Fig. 5.7-1:	Volumetrische Deformation eines porösen Mediums bei einer angelegten anisotropen Spannung.....	273
Fig. 5.7-2:	Konzeptuelle Darstellung der Kompaktion und Dekompaktion poröser Medien.....	274
Fig. 5.7-3:	Schematische Darstellung der Grenzzustandsbedingungen des modifizierten <i>Cam-Clay</i> Modells.....	275
Fig. 5.7-4:	Dreidimensional-Darstellung der Grenzzustandsbedingungen aus Figur 5.7-3a als Funktion der Porenzahl e	276
Fig. 5.7-5:	Schematische Darstellung der generellen Bruchtypen und ihre Eingliederung gemäss Ingram & Urai (1999).	277
Fig. 5.7-6:	Versagensbedingungen nach dem Mohr-Coulomb-Modell für zwei unterschiedliche Materialien.....	278
Fig. 5.7-7:	Unterschiedliche Kriechphasen unter konstanter Last.....	279
Fig. 5.7-8:	Prinzipskizze zur Erläuterung des Kompaktionsverhaltens mariner Sedimente.	281
Fig. 5.7-9:	Kontakttypen zwischen den Tonpartikeln (a) und das charakteristische Spannungs-/Deformationsverhalten der einzelnen Kontakttypen (b).....	282
Fig. 5.7-10:	Orientierung der Tonpartikel im numerischen PFC-Modell als Funktion der Kompaktion.	283
Fig. 5.7-11:	Modell für die numerische Berechnung des prinzipiellen Deformationsverhaltens für anisotrope Tonsteine/Tonschiefer.....	284
Fig. 5.7-12:	Spannungs-/Deformationskurven für den Opalinuston im Langzeitversuch.....	286
Fig. 5.7-13:	E-Modul als Funktion des Wassergehalts gemessen parallel zur Schichtung.	287
Fig. 5.7-14:	Vergleich der einaxialen Druckfestigkeiten verschiedener Tone in Beziehung zum Wassergehalt.....	290
Fig. 5.7-15:	Resultate von Triaxialversuchen an Opalinuston.	291
Fig. 5.7-16:	Ergebnisse von Labor- und In-situ-Kriechversuchen (Felslabor Mont Terri).....	294
Fig. 5.7-17:	Resultate des Langzeit-Permeametertests bei isostatischer Belastung.	295
Fig. 5.7-18:	Schematische Darstellung des verwendeten Materialgesetzes.	298
Fig. 5.7-19:	Modellkalibrierung mit den Labordaten (Benken) für die Festigkeit der isotropen Gesteinsmatrix (lineares und bi-lineares Modell).....	301
Fig. 5.7-20:	Modellkalibrierung mit den Labordaten (Benken) für die Festigkeit der Schichtung.	301

Fig. 5.7-21: Vergleich der beobachteten (a) und der berechneten (b) Spannungs-Deformationsbeziehung für Triaxialtests bei unterschiedlichen Manteldrücken.	303
Fig. 5.7-22: Exemplarische Darstellung des Spannungs-Deformationsverhaltens von vier Be- und Entlastungszyklen während eines Triaxialversuches für eine gesättigte Z-Probe mit 40 MPa Manteldruck.	303
Fig. 5.7-23: Axiale Deformation als Funktion der Kriechzeit für Proben unter Verwendung des Salzer-Modells (Salzer et al. 1998) im Vergleich mit Laboraten.	304
Fig. 5.8-1: Gültigkeitsbereich des erweiterten Darcy-Gesetzes.	311
Fig. 5.8-2: Analyse von Testartefakten im Rahmen der Re-Interpretation der Packertests in der Bohrung Benken.	316
Fig. 5.8-3: Überprüfung möglicher Testartefakte am Beispiel des Packertests O4.	317
Fig. 5.8-4: Permeametertest an einer Opalinustonprobe aus Benken.	323
Fig. 5.8-5: Langzeitentwicklung der hydraulischen Durchlässigkeit des überkonsolidierten Opalinustons relativ zur heutigen hydraulischen Durchlässigkeit.	326
Fig. 5.8-6: Mögliche Spannungspfade im Rahmen der geologischen Langzeitentwicklung auf der Grundlage des in Kapitel 5.7.4 diskutierten <i>Cam-Clay</i> -Modells.	327
Fig. 5.8-7: Abhängigkeit der Rissstransmissivität von der Normalspannung auf die Rissfläche.	329
Fig. 5.8-8: Kompilation von Porositäts- und Permeabilitätsdaten von Tongesteinen verschiedener Kompaktionsgrade.	334
Fig. 5.9-1: Mechanismen zum Transport der in den Lagerstollen und -tunneln akkumulierten Korrosions- und Degradationsgase:	337
Fig. 5.9-2: Spannungs- und Bruchverhalten des Gebirges bei schneller bzw. langsamer Belastung am Beispiel eines <i>Hydrofrac</i> -Tests.	342
Fig. 5.9-3: Langzeit-Gaspermeabilitätstest an einer Opalinuston-Probe aus der Bohrung Benken.	344
Fig. 5.9-4: Kapillardruck-Sättigungsbeziehung (Bohrung Benken und Felslabor Mont Terri).	348
Fig. 5.9-5: Labor- und In-situ-Daten von Davies (1991) und Horseman (2000) zur Korrelation zwischen Gaseintrittsdruck und intrinsischer Permeabilität.	351
Fig. 5.9-6: Gastransportmechanismen zur Abführung der Korrosions- und Degradationsgase.	353
Fig. 5.10-1: Diffusionskonstante und -porosität für Tritium.	363
Fig. 5.12-1: Chloridgehalt des Referenzwassers für das Wirtgestein im Vergleich zu Wässern aus der Bohrung Benken.	370
Fig. 5.12-2: Nominaler pCO ₂ -Wert (Zentralwert) und Wertebereich für das Referenzwasser aus der Bohrung Benken, aufgetragen gegen die Chloridkonzentration.	373

Fig. 6.1-1: Konzept der möglichen Freisetzung/Verdünnung von Radionukliden aus dem Wirtgestein durch wasserführende Formationen der Rahmengesteine und/oder regionale Aquifere.....	382
Fig. 6.3-1: Entstehung von Porenwasser-Überdrücken in leicht überkonsolidierten Tongesteinen.....	386
Fig. 6.3-2: Konzeptuelle Ansätze zur Deutung der Porenwasser-Überdrücke im Opalinuston.....	389
Fig. 6.3-3: Im NEWBAS-Modell verwendete Beziehungen zwischen mittlerer Effektivspannung und Porosität/Speicherkoeffizient.....	3922
Fig. 6.3-4a: Basis-Rechenfall.....	394
Fig. 6.3-4b: Profile von Porosität und Porenwasserdrücken in der modellierten Gesteinsabfolge.....	395
Fig. 6.3-4c: Entwicklung der Porenwasserdrücke im Wirtgestein.....	395
Fig. 6.3-4d: Entwicklung der Porenwasserdrücke im Wirtgestein.....	395
Fig. 6.3-4e: Entwicklung von Gesamtspannung (Überlagerung), Effektivspannung, In-situ-Porenwasserdruck und Porenwasser-Überdruck im Wirtgestein.....	396
Fig. 6.4-1: Hydrodynamisches Lokalmodell.....	400
Fig. 6.4-2: Hypothetische Druckhöhenverteilung im Wedelsandstein.....	403
Fig. 6.4-3: Hypothetische Druckhöhenverteilung im Sandsteinkeuper.....	404
Fig. 6.4-4: Verteilung der Druckhöhen für den Referenzfall RF0 in den Vertikalschnitten D und I.....	406
Fig. 6.4-5: Partikelbahnen durch den Wedelsandstein in der Umgebung der Bohrung Benken.....	407
Fig. 6.4-6: Druckhöhenverteilung für den Sensitivitäts-Rechenfall RF4 im Vertikalschnitt D.....	408
Fig. 6.4-7: Druckhöhenverteilung für den Sensitivitäts-Rechenfall RF7 im Horizontalschnitt Top Sandsteinkeuper und im Vertikalschnitt I.....	409
Fig. 6.4-8: Druckhöhenverteilung für den Sensitivitäts-Rechenfall RF8 im Vertikalschnitt I.....	410
Fig. 6.4-9: Modellierungsprodukte der Rechenfälle RF0 bis RF8 am Bohrstandort Benken: Profile der Druckhöhen und des vertikalen Flusses.....	411
Fig. 6.4-10: Histogrammdarstellung zur Herkunft der Partikel an der Lokation Benken im Tiefenniveau des Wedelsandsteins.....	412
Fig. 6.4-11: Profil der hydraulischen Druckhöhe im Opalinuston entsprechend Rechenfall RF4 (Bohrung Benken) sowie Unsicherheitsbandbreiten.....	412
Fig. 6.5-1: Szenarien von Freisetzungspfaden für Radionuklide.....	420
Fig. 6.5-2: <i>what if</i> -Szenarien von Freisetzungspfaden für Radionuklide.....	421
Fig. 7.1-1: Auslegung des geologischen Tiefenlagers.....	429
Fig. 7.1-2: Prinzipskizze zur Illustration der Prozesse im Bereich eines verfüllten BE/HAA-Lagerstollens (ohne geochemische Prozesse).....	431

Fig. 7.2-1: Bruchversagen eines überkonsolidierten Tonschiefers.....	434
Fig. 7.2-2: Ergebnisse von Triaxialversuchen an Opalinuston mit einer Innenbohrung parallel zur Schichtung.	435
Fig. 7.3-1: Häufigkeit von Entlastungsklüften, beobachtet in Nischen des Felslabors Mont Terri, als Funktion des Abstands zur Stollenwand.....	437
Fig. 7.3-2: Geometrisches konzeptuelles Modell der Auflockerungszone des Felslabors Mont Terri.	439
Fig. 7.3-3: Gemessene hydraulische Durchlässigkeit in der Auflockerungszone des Laborstollens im Mont Terri.....	440
Fig. 7.3-4: Plastifizierungszustand für den Laborstollen (ED-B Stollen) im Mont Terri.....	443
Fig. 7.3-5: Beobachtete und berechnete Konvergenzen im Laborstollen im Mont Terri.....	443
Fig. 7.3-6: Deformationsverhalten von Hohlräumen im Mont Terri.....	444
Fig. 7.3-7: Vergleich der beobachteten und berechneten Porenwasserdrücke im Mont Terri entlang eines horizontalen Profils vom Laborstollen aus.	446
Fig. 7.3-8: Auflockerungszone um einen BE/HAA-Lagerstollen.	449
Fig. 7.3-9: Vergleich der Auflockerungszone ohne und mit Berücksichtigung des komplizierten Spannungspfads beim Auffahren des Stollens.	450
Fig. 7.3-10: Entwicklung von minimaler und maximaler Spannung (effektive Spannungen) für verschiedene Punkte während des Auffahrens des Stollens.	451
Fig. 7.3-11: Berechnete Auflockerungszone um einen BE/HAA-Lagerstollen (Fall T20/3).....	452
Fig. 7.3-12: Berechnete Entwicklung von Scherzonen im Bereich der Auflockerungszone und Vergleich mit Laborergebnissen.....	453
Fig. 7.3-13: Vergleich der berechneten volumetrischen Deformation in der Auflockerungszone bei zugelassener Entfestigung mit den Laborergebnissen....	454
Fig. 7.3-14: Vergleich der Ergebnisse für die initiale Konvergenz bzw. Verschiebung bei verschiedenen Modellansätzen.	456
Fig. 7.4-1: Erwartete Aufsättigungsdauer und Porenwasserdruckentwicklung für LMA-Lagertunnel und BE/HAA-Lagerstollen.....	463
Fig. 7.4-2: Porenwasserdruckentwicklung des Lagerumfelds nach Verschluss des Tiefenlagers.	465
Fig. 7.4-3: Vergleich der Sohlhebung im Eisenbahntunnel Bözberg mit den beobachteten vertikalen Konvergenzen im Felslabor Mont Terri.	467
Fig. 7.4-4: Ergebnisse der geoelektrischen Untersuchungen im ED-B Stollen des Felslabors Mont Terri.	468
Fig. 7.4-5: Stark deformierte Auflockerungszone bei einer Bohrung im Mont Terri.	470
Fig. 7.4-6: Schematische Darstellung der erwarteten Auflockerungszone der Lagerstollen und entsprechende Beobachtungen am Mont Terri.	471
Fig. 7.4-7: Änderungen der hydraulischen Transmissivität.	473
Fig. 7.4-8: Entwicklung der plastischen Zone (Auflockerungszone) nach dem Ausräumen der initialen Auflockerungszone.	476

Fig. 7.5-1:	Raster-Elektronenmikroskop-Aufnahmen von Pyrit und dessen Alteration in Opalinuston.....	479
Fig. 7.5-2:	Schematische Darstellung der Ausbreitung einer Hoch-pH-Fahne.....	482
Fig. 7.5-3:	Raster-Elektronenmikroskop-Aufnahmen von Mineralneubildungen.....	483
Fig. 7.6-1:	Prinzipielle Darstellung des Einflusses thermischer Spannungen und des Porenwasserdrucks auf die Stabilität des Opalinustons.....	490
Fig. 7.6-2:	Schematischer Aufbau des zweidimensionalen THM-Modells, das für die numerischen Abschätzungen der Auswirkung des thermischen Pulses genutzt wurde.....	498
Fig. 7.6-3:	Normal-/Scherspannungsdiagramm für den Zeitpunkt von 100 Jahren nach Einbringen der Abfallbehälter im Vergleich mit der Festigkeit des Opalinustons (Spitzen- und Restfestigkeit).....	499
Fig. 7.7-1:	Potenzielle Ausbreitungspfade der in den BE/HAA-Lagerstollen bzw. in den LMA-Lagertunneln akkumulierten Degradations- und Korrosionsgase.....	503
Fig. 7.7-2:	Zweiphasenflussmodellierungen des Gasdruckaufbaus in den LMA- und BE/HAA-Lagerbereichen.....	510
Fig. 7.8-1:	Hydrodynamisches Modell zur Modellierung der hydraulischen Verhältnisse im Umfeld des Tiefenlagers.....	519
Fig. 7.8-2:	Referenzfall RLU0.....	523
Fig. 7.8-3:	Rechenfall RLU1.....	525
Fig. 7.8-4:	Rechenfall RLU1.....	526
Fig. 7.8-5:	Rechenfall RLU1.....	527
Fig. 7.8-6:	Rechenfall RLU2.....	528
Fig. 8.2-1:	Sauerstoffisotope und Klimaentwicklung im Plio–Pleistozän.....	538
Fig. 8.3-1:	Verlauf des Talniveaus des Rheins, 1000-fach überhöht (oben), Beziehung des Deckenschotterniveaus zur heutigen Erosionsbasis im Gebiet des Hochrheins (unten).....	548
Fig. 8.3-2:	Darstellung der Erosionsszenarien am Beispiel eines NW–SE-Profiles vom Rhein- zum Thurtal.....	551
Fig. 8.3-3:	Erosionsszenarien für die Nordostschweiz.....	552
Fig. 8.5-1:	Varianten zur Entwicklung der Gebirgsspannung im Zentrum des Wirtgesteins als Folge von Hebungs- und Erosionsprozessen.....	567
Fig. 8.5-2:	Langzeit-Deformationsverhalten des Wirtgesteins infolge von Hebung und Erosion.....	568
Fig. 8.5-3:	Änderung der vertikalen Spannungskomponente als Folge periodischer Vergletscherung (schematisch).....	571
Fig. 8.6-1:	Berechnete Chlorid-Profile heute sowie in einer halben und in einer Million Jahren für konstante Konzentrationen in den Aquiferen.....	573
Fig. 9.3-1:	Potenzielles Lagergebiet im Zürcher Weinland.....	581

Beilagenverzeichnis

Beilage 3.2-1: Tektonische Übersichtskarte der Nordschweiz und angrenzender Gebiete.

Beilage 3.2-2: Geologische Profile im Fallen.

Beilage 3.2-3: Geologische Profile im Streichen.

Beilage 3.2-4: Stratigraphie: Korrelationstabelle Weiach–Benken–Randen–Schwäbischer Jura.

Beilage 3.2-5: Mächtigkeit der mesozoischen Formationen zwischen Riniken und dem Bodensee.

Beilage 3.5-1: Geodätischer Datensatz auf tektonischer Übersichtskarte.

Beilage 9.5-1: Geotechnische Verhältnisse in den Festgesteinen im geologischen Profil der Sondierbohrung Benken.

Autorenverzeichnis

Autoren der verschiedenen Kapitel

Zfsg.	A. Gautschi	5.7	P. Blümling
1	A. Gautschi, A. Lambert, P. Zuidema	5.8	P. Marschall, T. Küpfer, M. Mazurek
2.1	A. Lambert	5.9	P. Marschall, T. Gimmi
2.2	A. Lambert	5.10	P. Wersin, A. Gautschi
2.3	A. Lambert	5.11	P. Marschall, A. Gautschi
2.4	A. Gautschi	5.12	F.J. Pearson, H.N. Waber
2.5	A. Gautschi	5.13	A. Gautschi
2.6	A. Lambert	6.1	P. Marschall
3.1	A. Lambert	6.2	P. Marschall, T. Küpfer
3.2	H.-R. Bläsi, H. Naef	6.3	T. Küpfer, P. Marschall
3.3	M. Mazurek, W. Leu	6.4	P. Marschall, T. Küpfer, U. Kuhlmann
3.4	H. Naef, W.H. Müller	6.5	T. Küpfer, P. Marschall, A. Gautschi
3.5	W.H. Müller, H. Naef,	6.6	P. Marschall
3.6	T. Küpfer, P. Blaser	7.1	P. Blümling
3.7	D. Traber, H.N. Waber, L. Eichinger, M. Heidinger	7.2	P. Blümling
3.8	W. H. Müller	7.3	P. Blümling, M. Mazurek
3.9	A. Lambert	7.4	P. Blümling, P. Marschall
3.10	A. Gautschi	7.5	U. Mäder, A. Gautschi, B. Schwyn
4.1	A. Lambert	7.6	P. Blümling, M. Mazurek, P. Marschall
4.2	H. Naef, W.H. Müller,	7.7	P. Marschall
4.3	A. Lambert, Ph. Birkhäuser	7.8	P. Marschall
4.4	P. Blümling	7.9	P. Blümling, P. Marschall
4.5	P. Blümling	8.1	A. Lambert, H. Naef
4.6	T. Küpfer, P. Marschall	8.2	H. Naef, W.H. Müller, A. Lambert
4.7	H.N. Waber, T. Gimmi, F.J. Pearson, A. Gautschi	8.3	H. Naef, W.H. Müller, A. Lambert
4.8	A. Gautschi, H.N. Waber, M. Mazurek, H.-R. Bläsi	8.4	W.H. Müller, H. Naef, A. Gautschi
4.9	A. Lambert	8.5	T. Küpfer, P. Marschall
5.1	A. Gautschi	8.6	A. Gautschi, T. Gimmi, H.N. Waber
5.2	M. Mazurek, P. Marschall, A. Gautschi	8.7	A. Lambert
5.3	M. Mazurek	9.1	A. Gautschi
5.4	M. Mazurek, T. Gimmi	9.2	A. Gautschi
5.5	M. Mazurek	9.3	A. Gautschi
5.6	P. Blümling	9.4	A. Gautschi, P. Marschall, P. Blümling, T. Küpfer
		9.5	P. Blümling, W.H. Müller
		10	A. Gautschi, P. Zuidema

Anschrift der Autoren

Philip Birkhäuser, Peter Blümling, Theo Küpfer, Andreas Gautschi, André Lambert, Paul Marschall, Walter Müller, Bernhard Schwyn, Paul Wersin, Piet Zuidema: *Nagra, Wettingen* – Hansruedi Bläsi, Thomas Gimmi, Urs Mäder, Martin Mazurek, Daniel Traber, Niklaus Waber: *Institut für Geologie, Universität Bern* – Werner Leu: *Geoform Ltd., Minusio* – Heinrich Naef: *Büro für angew. Geologie, St. Gallen* – Lorenz Eichinger, Michael Heidinger: *Hydroisotop GmbH, D-Schweitenkirchen* – Joe Pearson: *Ground Water Geochemistry, New Bern, USA* – Uli Kuhlmann: *TK Consult AG, Zürich* – Petra Blaser: *Petraconsult, Arni* – Alfred Gubeli: *Dr. Gubeli AG, Jona*

Projektleitung & Koordination:	Andreas Gautschi & André Lambert
Redaktion:	André Lambert & Andreas Gautschi, mit Unterstützung von Alfred Gubeli, Petra Blaser, Hans Weibel, Marie-Rose Gmür
Zeichnerarbeiten, Layout:	Bruno Kunz, Claudia Frei
Übersetzungen:	Linda McKinley (Summary), Anne Claudel (Résumé)

