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

Sachplan Geologische Tiefenlager (SGT)
Etappe 2

Fachbericht vom 11. Januar 2016
zum «2×2-Vorschlag» der Nagra

Beilage 3:

Zu erwartende Erosionsprozesse in den drei möglichen Standortgebieten für hochradioaktive Abfälle (Jura Ost, Nördlich Lägern und Zürich Nordost)

Erich Müller & Stefan Schmid

Januar 2016

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

Zusammenfassung

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

Zielsetzung des vorliegenden Expertenberichts ist die Beurteilung der Frage, inwieweit die zu erwartenden Erosionsprozesse das Wirtgestein Opalinuston in seinen abschirmenden Eigenschaften negativ beeinflussen oder dieses gar freilegen könnten. Der Bericht fokussiert auf die drei möglichen Standortgebiete für hochradioaktive Abfälle (HAA) Jura Ost (JO), Nördlich Lägern (NL) und Zürich Nordost (ZNO). Einerseits geht es um die Überprüfung der Bereiche innerhalb jedes Standortgebiets ohne ausreichenden Schutz des Opalinustons gegen künftige Erosion (mit Folgen für das Platzangebot), anderseits wird aufgrund einer eigenen neuen Einschätzung der Unsicherheiten in der Erosionsgeschichte ein Vergleich der drei Standortgebiete bezüglich belastbarer Vor- und Nachteile vorgenommen (Tabelle 1).

Eingangs wird auf drei grundsätzliche Probleme aufmerksam gemacht: 1. Eine gesonderte Betrachtung der Indikatoren (wie sie die Nagra vornimmt) lässt ausser Acht, dass diese voneinander abhängig sind und sich in ihren Auswirkungen und deren Bewertung überlagern können (zum Beispiel Absenkung der Erosionsbasis und glaziale Übertiefung, siehe Kapitel 4). 2. Grundlage der Projektion von Erosionsszenarien über einen Zeitraum von einer Million Jahren ist die sorgfältige Analyse der jüngsten geologischen Vergangenheit, also etwa der letzten 2 Millionen Jahre. Diese Analyse ist aber äusserst schwierig. Folglich ist auch in der nächsten Million Jahre eine unstetige Landschaftsentwicklung anzunehmen. Den Vor- und Nachteilen der einzelnen Standorte bezüglich zu erwartender Erosionsprozesse ist bereits heute grösste Aufmerksamkeit zu schenken, denn es ist kaum zu erwarten, dass sich die diesbezüglichen Kenntnisse im Verlauf des Sachplanverfahrens wesentlich verbessern. 3. Im Bericht verzichten wir auf die von der Nagra verwendeten wertenden Prädikate «sehr günstig», «günstig», «bedingt günstig» oder gar auf die entsprechenden Zahlenwerte von 0 bis 5 für die entscheidrelevanten Kriterien, da wir diese Wertskalen nicht als sinnvoll erachten.

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

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

randlichen Gebiete sowie die Bereiche entlang der Taleinschnitte weisen zu geringe Schutzabstände auf. Sie sind demzufolge zur Anlage eines Tiefenlagers nicht geeignet.

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

Für ZNO ist eine bis 300 m unter die heutige lokale Erosionsfläche reichende Rinne durchaus plausibel. Für ZNO sollte daher gelten, dass die Oberfläche des Wirtgesteins mindestens 300 m unterhalb der in 1 Million Jahre abgesenkten Erosionsbasis anstehen muss. Die in der Figur 8 gezeigten Konsequenzen würden das Platzangebot im Standortgebiet ZNO drastisch einschränken. Mit grösseren Einschränkungen des Platzangebots ist auch im Standortgebiet JO zu rechnen (Figur 9). In NL kann infolge der tiefen Lage unter der heutigen Erosionsbasis eine das Tiefenlager gefährdende glaziale Tiefenerosion ausgeschlossen werden.

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

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

Insgesamt betrachtet bestehen zurzeit noch viele grundsätzliche und wesentliche offene Fragen, die es in Etappe 3 soweit wie möglich zu klären gilt (Zeitpunkt, ab dem die Höheren Deckenschotter eingeschnitten werden konnten, Festsetzen der anzuwendenden Tiefenlage der abgesenkten Erosionsbasis in 1 Million Jahre; Verkleinern der Schwankungsbereiche der Höhenlagen der Oberfläche des Wirtgesteins Opalinuston; Klären der Frage, inwieweit in JO glaziale Tiefenerosion überhaupt möglich ist; Bestimmen der maximal zu berücksichtigenden Tiefe für eine glaziale Tiefenerosion in ZNO). Solange diese Fragen offen bleiben, ist aufgrund der Erosionsbetrachtung eine Einengung von drei auf zwei HAA-Standorte verfrüht und daher abzulehnen.

Inhaltsverzeichnis

1 Ausgangslage 5
2 Zielsetzung 5
3 Grundsätzliche Überlegungen zu massgeblichen Prozessen in Erosionsszenarien 6
4 Massgebliche Prozesse in Erosionsszenarien 7
4.1 Erosion im Betrachtungszeitraum 7
4.2 Gesteinsdekompaktion 7
4.3 Bildung neuer Rinnen (Fluviatile Erosion, Absenkung der Erosionsbasis) 8
4.3.1 Von der Nagra definierte Szenarien «Basisfall» und «pessimistischer Fall» 8
4.3.2. Auswirkungen der Szenarien «Basisfall» und «pessimistischer Fall» gemäss unserer Einschätzung 14
4.4 Durchbruchsrinnen («neue Rinnen») 17
4.5 Glaziale Tiefenerosion 20
4.6 Modellvorstellungen zur Langzeitentwicklung 24
5 Massgebende Erosionsszenarien 25
6 Folgerungen 27
Beigezogene Unterlagen 29

1 Ausgangslage

Die Nagra legte mit den Technischen Berichten NTB 14-01 (Nagra 2014a) und NTB 14-02, Dossier III (Nagra 2014b) die Ergebnisse ihrer Untersuchungen zum Fragenkreis «Zu erwartende Erosionsprozesse» dar, ebenso ihre Folgerungen für die Einengung auf mindestens zwei Standorte für je ein HAA- und ein SMA-Tiefenlager[1]. Der Betrachtungszeitraum bezüglich erwarteter Erosionsprozesse von 1 Million Jahren für die HAA-Standorte entspricht den Vorgaben des ENSI (2009, ENSI 2010) und wird im vorliegenden Bericht als sinnvoll erachtet. Die beiden NTBs stützen sich vor allem auf die in den Nagra-Arbeitsberichten NAB 09-23, NAB 10-34, NAB 12-48, NAB 14-02 und NAB 14-25 dargestellten Untersuchungsergebnisse.

Zu berücksichtigende Erosionsszenarien umfassen alle Arten von Erosionsprozessen:

– flächenhafter Abtrag der Erdoberfläche (Denudation), der zu einer Auflockerung (Dekompaktion) des Wirtgesteins Opalinuston und seiner Rahmengesteine, letztlich gar zu seiner Freilegung führen kann,
– fluviatile Eintiefungen und glaziale Übertiefungen,
– Schaffung neuer Durchbruchsrinnen (z. B. infolge einer Flussumlenkung bei einer Vergletscherung) und
– glaziale Übertiefungen neuer Durchbruchsrinnen.

2 Zielsetzung

Der vorliegende Expertenbericht dient als Argumentationsgrundlage (Beilage 3) für den kurzgehaltenen Fachbericht vom 11. Januar 2016 der AG SiKa/KES zum «2×2-Vorschlag» der Nagra. Dieser ist seinerseits sicherheitstechnische Grundlage für die Stellungnahme des Ausschusses der Kantone (AdK) im Rahmen der Vernehmlassung (Anhörung) zu Etappe 2. Aufgabe der AG SiKa/KES ist unter anderem die Prüfung der Nachvollziehbarkeit und der Plausibilität der in den einzelnen Nagra-Berichten beschriebenen massgebenden Prozesse sowie die grobe Beurteilung deren Eintretenswahrscheinlichkeiten[2].

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

[1] HAA: hoch- und langlebige mittelradioaktive Abfälle einschl. abgebrannte Brennelemente, SMA: kürzerlebige mittel- und schwachradioaktive Abfälle.
[2] Es ist uns bewusst, dass der Gebrauch des Wahrscheinlichkeitskonzepts im Zusammenhang mit geologischen Zeiträumen heikel ist. Ausserdem lassen die extremen Unsicherheiten der künftigen Klimaentwicklung keine Quantifizierung der Eintretenswahrscheinlichkeit zu.

3 Grundsätzliche Überlegungen zu massgeblichen Prozessen in Erosionsszenarien

Die Langzeitstabilität der geologischen Barriere wird durch eine Reihe von Prozessen beeinflusst, welche von der Nagra, aber auch in diesem Bericht, zunächst gesondert und als «entscheidrelevante Indikatoren» behandelt werden: 1. «Erosion im Betrachtungszeitraum», 2. «Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf Gesteinsdekompaktion», 3. «Tiefenlage unter lokaler Erosionsbasis im Hinblick auf die Bildung neuer Rinnen», 4. «Tiefenlage unter Fels im Hinblick auf glaziale Tiefenerosion» und 5. «Modellvorstellungen zur Langzeitentwicklung (Geodynamik und Neotektonik; weitere Prozesse)».

Bevor wir auf die einzelnen Indikatoren eingehen, machen wir auf drei grundsätzliche Probleme aufmerksam:

1. Eine gesonderte Betrachtung der Indikatoren lässt ausser Acht, dass die oben definierten erosionsbezogenen Indikatoren eigentlich voneinander abhängig sind und sich in ihren Auswirkungen und deren Bewertung überlagern können (zum Beispiel Absenkung der Erosionsbasis und glaziale Übertiefung, siehe Kapitel 4). Unter Umständen können sich einerseits die Auswirkungen von Erosionsprozessen, die in zwei oder mehreren Indikatoren abgehandelt werden «negativ» (das heisst in Richtung pessimistische Voraussage) kumulieren, anderseits können sie sich auch gegenseitig aufheben (oder «positiv» kumulieren).
2. Grundlage der Projektion von Erosionsszenarien über einen Zeitraum von einer Million Jahren ist die sorgfältige Analyse der Erosionsprozesse, die in der jüngsten geologischen Vergangenheit abgelaufen sind, also etwa während der letzten 2 Millionen Jahre. Diese Analyse der Erosionsprozesse in der geologischen Vergangenheit ist aber äusserst schwierig. Wir sind unter anderem nach wie vor weit von einer zuverlässigen Datierung der glazialen Terrassen entfernt. Die aus der geologischen Vergangenheit abgeleitete Prognose künftiger Eintiefungsraten ist demzufolge ebenfalls höchst ungenau. Zusätzlich erschwerend für eine Extrapolation ist die Tatsache, dass die Erosionsprozesse der letzten 2 Millionen Jahre durch einen Wechsel von Glazial- und Warmzeiten geprägt waren, also durch eine ausgesprochen unstetige Landschaftsentwicklung. Folglich ist auch in der nächsten Million Jahre eine unstetige Landschaftsentwicklung anzunehmen. Da Erosion ausgesprochen exogen getrieben, also klimaabhängig ist, schränken künftige Klimabeeinflussungen des Menschen die an sich schon schwierige Prognostizierbarkeit weiter ein. Den Vor- und Nachteilen der einzelnen Standorte bezüglich zu erwartender Erosionsprozesse ist bereits heute grösste Aufmerksamkeit zu schenken, denn es ist kaum zu erwarten, dass sich unsere diesbezüglichen Kenntnisse im restlichen Verlauf des Sachplanverfahrens wesentlich verbessern. Erosionsprozesse können aber auch massgeblich durch endogene Vorgänge mitgesteuert werden, zum Beispiel durch Neotektonik, Dynamik des Oberrheingrabens, Hebungen oder Senkungen relativ zum Geoid. Damit nehmen die Unsicherheiten der Extrapolation auf die kommende 1 Million Jahre weiter zu.
3. In unserem Bericht verzichten wir auf die in Nagra 2014a verwendeten bewertenden Prädikate «sehr günstig», «günstig», «bedingt günstig» oder gar auf die entsprechenden Zahlenwerte von 0 bis 5 für die entscheidrelevanten Kriterien, da wir diese Bewertungsskalen als nicht sinnvoll erachten. Ihre Verwendung führt auch insofern nicht weiter, als sich die einzelnen entscheidrelevanten Kriterien, wie unter 1. gezeigt, überlagern können.

4 Massgebliche Prozesse in Erosionsszenarien

4.1 Erosion im Betrachtungszeitraum

Laut Nagra 2014c werden mit dem Indikator «Erosion im Betrachtungszeitraum» grossräumige Unterschiede zwischen den Standortgebieten betreffend Erosion betrachtet: sowohl lineare Eintiefung als auch flächenhafter Abtrag der Erdoberfläche. Dieser Indikator analysiert lediglich grossräumige Unterscheide zwischen den Standortgebieten aufgrund der heutigen Kenntnisse der grossräumigen Hebungsgeschichte der Alpen und ihres Vorlandes. Er nimmt laut Nagra vorerst noch keinen Bezug auf die Lagertiefe des Wirtgesteins. Wir teilen die Schlussfolgerung der Nagra, dass infolge der durch Geodäsie nachgewiesenen grossräumigen Kippbewegung des Alpenvorlandes einerseits der Standort Wellenberg entscheidende Nachteile aufweist und dass sich anderseits die drei potenziellen Standortgebiete bezüglich Eignung vorerst nicht voneinander unterscheiden. Wir wissen allerdings nicht, wie weit nördlich der Alpen der Nullpunkt dieser Kippachse mit Null vertikaler Hebungsrate relativ zum Geoid liegt, das heisst wir wissen nicht, wie stark sich der schweizerische Referenzpunkt Laufenburg hebt.

4.2 Gesteinsdekompaktion

Mit dem Indikator «Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf Gesteinsdekompaktion» wird laut Nagra die totale Überdeckung des Wirtgesteins und der oberen Rahmengesteine bezüglich der Terrainoberfläche vorerst zum heutigen Zeitpunkt betrachtet. In Hinblick auf zukünftige Erosion wird davon ausgegangen, dass die lokale Topographie flächenhaft abgetragen wird, was in etwa Schritt hält mit der Einschneidung der Hauptflüsse (die unten beim Indikator «Tiefenlage unter lokaler Erosionsbasis» behandelt wird). Hier zeigt sich anschaulich, dass sich die einzelnen Indikatoren in Prozessabfolgen überlagern, also nicht (nur) getrennt betrachtet werden sollten.

Damit das Wirtgestein Opalinuston während der massgebenden Zeit seine Dichtigkeit bzw. Undurchlässigkeit beibehält, darf es durch Dekompaktionserscheinungen nicht aufgelockert werden. Deshalb muss laut Nagra für ein HAA-Lager die Oberfläche des Opalinustons (= Top Opalinuston) tiefer als ca. 400 m unter dem heutigen Terrain liegen (vgl. Nagra 2008, A1.2 und Nagra 2014a, Seiten 167 und 240, Tab. 4.4-1). Dieser Wert ergibt sich aus der zur Vermeidung von Dekompaktionseffekten notwendigen Überdeckung der Rahmengesteine von mindestens 300 m plus einem Zuschlag von 100 m für Erosion. Dieser Zuschlag deckt allerdings nicht den gesamten Wert von 125 m für die Absenkung der Erosionsbasis in 1 Million Jahren laut «Basisfall» der Nagra ab.

In den Standortgebieten ZNO und NL liegt Top Opalinuston weitestgehend tiefer als 400 m unter heutigem Terrain. In beiden Standortgebieten lassen sich praktisch nur Arealflächen finden, welche die Minimalanforderung für ein HAA-Lager hinsichtlich Schutz vor Dekompaktion erfüllen. Somit ist dieses Schutzkriterium in beiden Gebieten erfüllt.

Im zentraleren Bereich des Standortgebiets JO findet sich die Oberfläche des Wirtgesteins Opalinuston zwar ebenfalls, vor allem in den Hochlagen, oft tiefer als 400 m unter Terrain (vgl. Fig. 1), doch die randlichen Gebiete sowie die Bereiche entlang der

Taleinschnitte weisen zu geringe Schutzabstände auf. Sie sind demzufolge zur Anlage eines Tiefenlagers nicht geeignet.

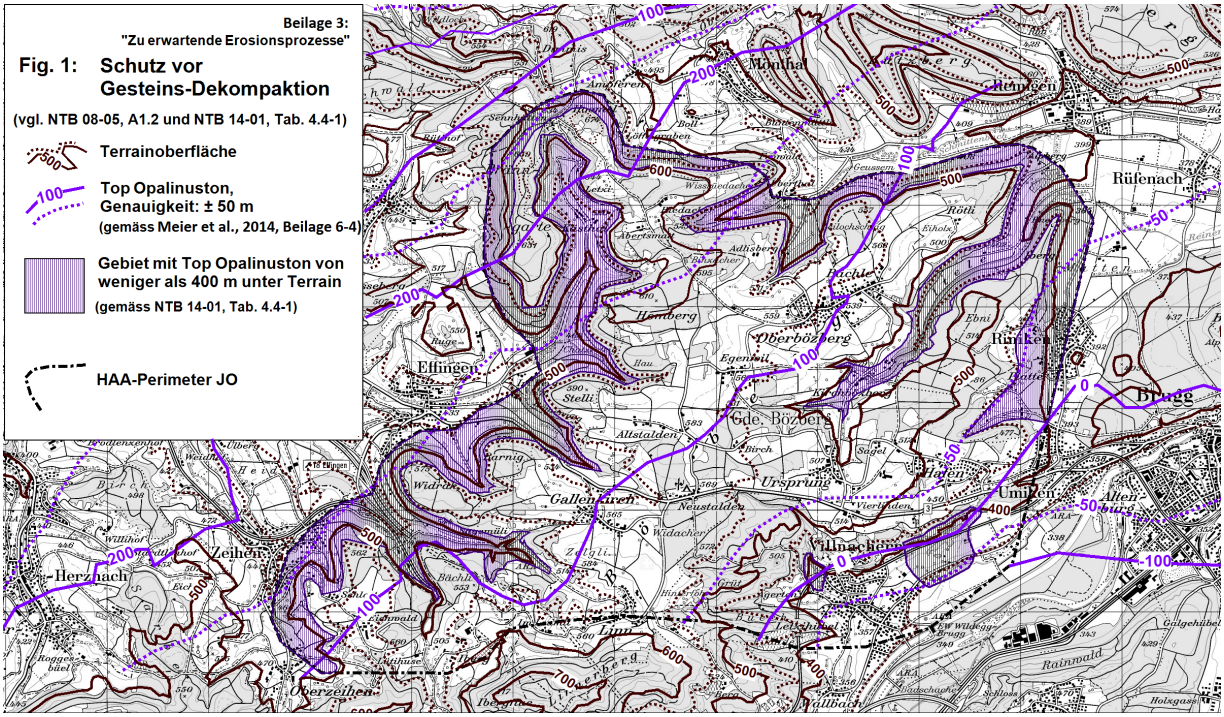


Fig. 1: Tiefenlage der Obergrenze des Wirtgesteins (Top Opalinuston, violette Kurve, m über Meer) im Standortgebiet Jura Ost, bezogen auf die Lage unter der heutigen Erdoberfläche (violette Fläche, <400 m unter Terrain) und damit hinsichtlich Schutz vor Auflockerung und flächenhaftem Abtrag. Quelle: eigene Darstellung.

Man beachte, dass die oben genannten Schlussfolgerungen nur für einen von 125 m auf 100 m reduzierten, von der Nagra definierten «Basisfall» für die unter Indikator «Tiefenlage unter lokaler Erosionsbasis» abgehandelte künftige Erosion gilt, nicht aber für unsererseits als möglich erachtete pessimistischere Szenarien. Die Bewertung der Nagra von JO bezüglich dieses Kriteriums ist deshalb losgelöst von weiteren Überlegungen zum Indikator «Tiefenlage unter lokaler Erosionsbasis» mit pessimistischeren Szenarien (siehe unten) wenig aussagekräftig.

4.3 Bildung neuer Rinnen (Fluviatile Erosion, Absenkung der Erosionsbasis)

4.3.1 Von der Nagra definierte Szenarien «Basisfall» und «pessimistischer Fall»

Hier wird davon ausgegangen, dass die von der Nagra definierte Einschätzung des «Basisfalls» respektive ihres «pessimistischen» Falls aufgrund der derzeitigen wissenschaftlichen Kenntnisse korrekt ist. Erst in einem nächsten Schritt (siehe Kapitel 4.3.2) werden wir diese Einschätzung in Frage stellen.

Laut Nagra (Nagra 2014c, Seite 46) untersucht der Indikator «Tiefenlage unter lokaler Erosionsbasis im Hinblick auf die Bildung neuer Rinnen» erstens die Auswirkung der Erosionsbasis auf die Bildung neuer Täler (siehe Kapitel 4.4) und zweitens den Effekt hinsichtlich neu angelegter glazialer Übertiefungen (siehe Kapitel 4.5). In beiden Fällen wird davon ausgegangen, dass die Topographie bis auf das Niveau der abgesenkten lokalen Erosionsbasis am Ende des Betrachtungszeitraums eingeschnitten wird. Zuverlässige Prognosen der Absenkung der Erosionsbasis sind deshalb zentral

nicht nur für den Indikator «Tiefenlage unter lokaler Erosionsbasis im Hinblick auf die Bildung neuer Rinnen», sondern auch für den weiter unten zu diskutierenden Indikator «Tiefenlage unter Fels im Hinblick auf glaziale Tiefenerosion». Wie schon unter 3.2 dargestellt, fliessen die Resultate der Abschätzung der Absenkung der lokalen Erosionsbasis zusätzlich in den Indikator «Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf Gesteinsdekompaktion» ein. Diese Tatsache illustriert aufs Neue, wie wichtig es ist, voneinander abhängige Prozessabfolgen zu betrachten. Die von der Nagra vorgenommene separate Bewertung der oben erwähnten drei einzelnen Indikatoren ist deshalb von beschränktem Aussagewert.

Die Beurteilung der im massgebenden Zeitraum (1 Million Jahre) wirkenden Erosionsprozesse erfolgt zu grossen Teilen anhand der zu erwartenden Entwicklung der lokalen Erosionsbasis, wie sie aufgrund der vorliegenden, lückenhaften Daten aus der jüngeren geologischen Vergangenheit abzuschätzen ist. Hierbei stellen sich zwei grundsätzliche Probleme:

a) Die komplexe Entwicklung der abgesenkten Erosionsbasis in der Vergangenheit (ca. 2 Million Jahre) hängt von verschiedensten Prozessen und Parametern ab. Da sich diese naturgemäss nicht genau erfassen lassen, untersteht das Bestimmen der resultierenden, abgesenkten Höhenlage der Erosionsbasis in der Vergangenheit beachtlichen Ungewissheiten. Dazu zählen die Faktoren, die den Ablauf der fluviatilen Erosion bestimmen, so beispielsweise endogene Eigenschaften wie vertikale Krustenbewegungen und exogene Faktoren wie die hydrologischen und klimatischen Verhältnisse, mitgeführte Feststoffe usw.
   Wie unten noch zu diskutieren ist, sind wir noch weit von einer ausreichenden Altersdatierung der glazialen Terrassen entfernt. Dies wirkt sich aus auf die Quantifizierung der Absenkung der lokalen Erosionsbasis in der nächsten Million Jahre.
b) Die Prognose auf eine Million Jahre hinaus ist auch deshalb unsicher, weil es unmöglich ist, die Anzahl künftiger Vereisungen verlässlich abzuschätzen. Mit dem Einfluss der Menschheit auf das Klima sind die Unsicherheiten noch grösser.

Die Nagra hat alles in ihren Möglichkeiten Stehende und dem Stand der Wissenschaft Entsprechende unternommen, um die Absenkung der lokalen Erosionsbasis in den letzten ca. 2 Millionen Jahren abzuschätzen. Wir haben aber erhebliche Zweifel bezüglich der Datierung der Terrassenbildungen.

Ohne auf Datierungsprobleme einzugehen, soll zunächst die Fig. 4.4-8 aus Nagra 2014c (unsere Fig. 2a, b) diskutiert werden. Sie zeigt die Absenkung der lokalen Erosionsbasis während der letzten 2 bis 2.5 Millionen Jahre nach Einschätzung der Nagra (links) und eine Reihe möglicher extrapolierter Absenkungen für die nächste Million Jahre (unten rechts). Die Vergangenheit ist gekennzeichnet durch eine unstetige Entwicklung mit schnellen Absenkungen, die von längeren Stillstandsperioden unterbrochen werden. Aus diesen Daten lässt sich mit gutem Willen herauslesen, dass sich die Entwicklung im Standortgebiet JO (Unteres Aaretal) von den Standortgebieten NL und ZNO abhebt (Fig. 2a).

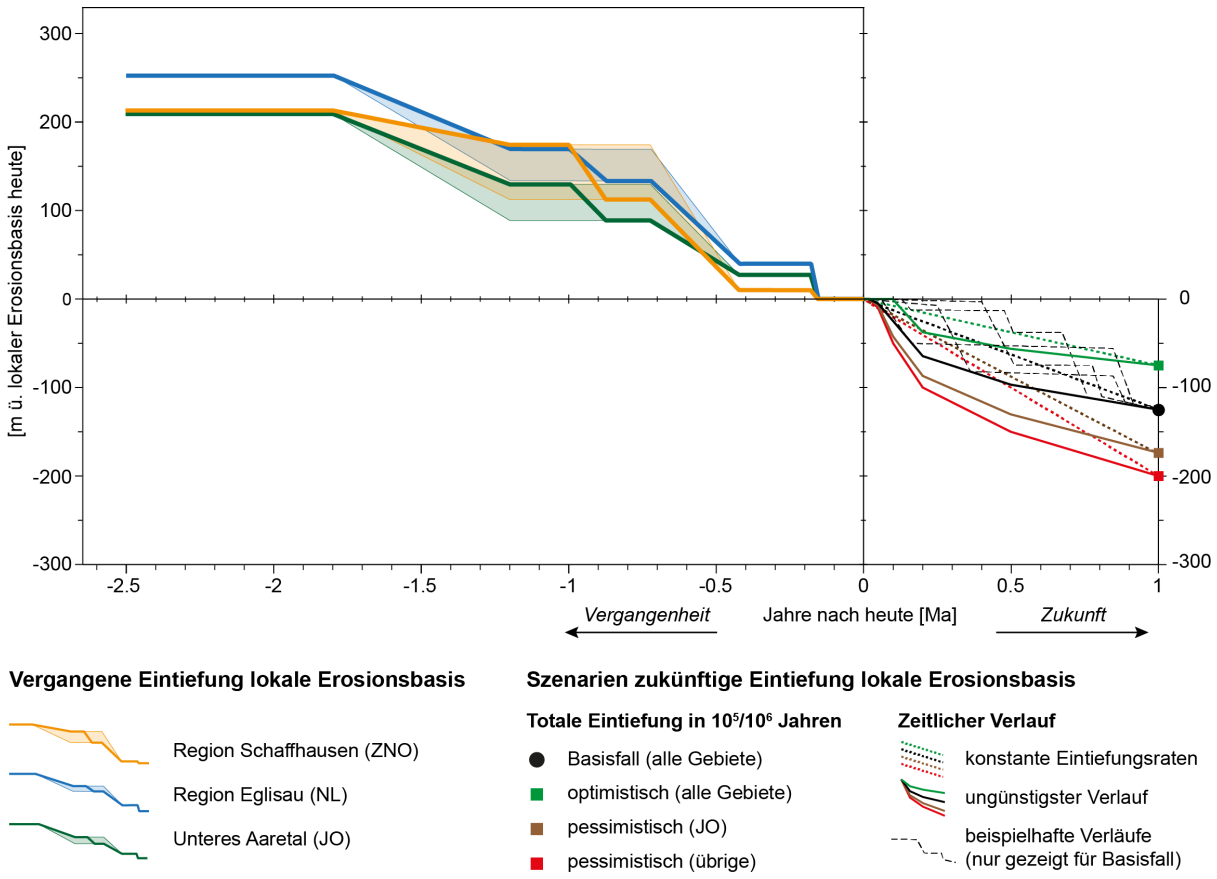


Fig. 2a: Entwicklung der lokalen Erosionsbasis relativ zur heutigen lokalen Erosionsbasis (links) und deren Extrapolation auf eine Million Jahre (unten rechts). Quelle: Nagra 2014c, Fig. 4.4-8, Seite 67.

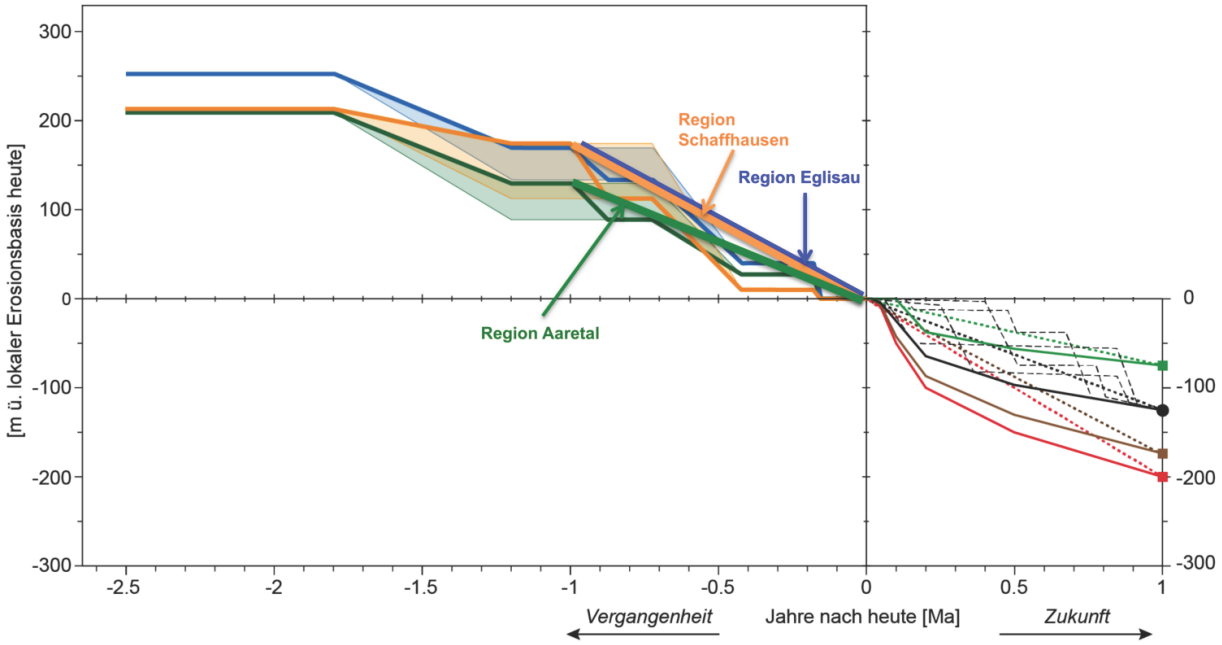


Fig. 2b: Angebliche Unterschiede in der Entwicklung der lokalen Erosionsbasis im Vergleich zu heute zwischen NL (Region Eglisau, blaue Gerade), ZNO (Schaffhausen, orange Gerade) und JO (Unteres Aaretal, grüne Gerade). Die drei von uns angebrachten fetten Geraden verbinden die Höhenlage bei 1 Million Jahre vor heute (-1) mit der von heute (0) in der Originalgrafik. Laut Nagra soll der Unterschied in der Hebungsrate während der letzten 0.5 Million Jahre zwischen NL/ZNO und JO bedeutend sein, was eine unterschiedliche Bewertung des pessimistischen Zukunftsszenarios rechtfertigen soll. Quelle: Nagra 2014c, abgeändert.

In der jüngsten 0.5 Million Jahre soll sich die Erosionsbasis in JO (grüne Gerade in Fig. 2b) weniger schnell als in ZNO und NL (blaue und orange Geraden) abgesenkt haben. Dies ist laut Auskunft der Nagra der Grund dafür, dass sie die «pessimistische» Prognose für die Absenkung von JO weniger «pessimistisch» (175 m, braune Kurve in Fig. 2a, b, unten rechts) einschätzt als von ZNO und NL (200 m, rote Kurve in Fig. 2a, b unten rechts). Die Einschätzung der Absenkung im Basisfall durch die Nagra ist nachvollziehbar (die Absenkung beträgt 125 m, schwarze Kurve in Fig. 2a, b unten rechts). Hingegen ist die postulierte geringfügige Differenz in der «pessimistischen» Prognose (175 m in JO vs. 200 m in NL und ZNO) und damit die relative Besserstellung von JO unseres Erachtens nicht haltbar.

Das auf Fig. 2a basierende und in umseitiger Fig. 3a, b abgebildete Diagramm aus Nagra 2014c kann insofern als eigentliches «Schlüsseldiagramm» bezeichnet werden, als es die additive Wirkung pessimistischer Prognosen verschiedener Erosionsprozesse illustriert. Es zeigt die Konsequenzen der vermuteten Absenkung der lokalen Erosionsbasis («Basisfall» und «pessimistische» Szenarien laut Nagra) kombiniert mit Prognosen zum Kriterium «Tiefenlage unter Fels im Hinblick auf glaziale Tiefenerosion» (siehe unten).

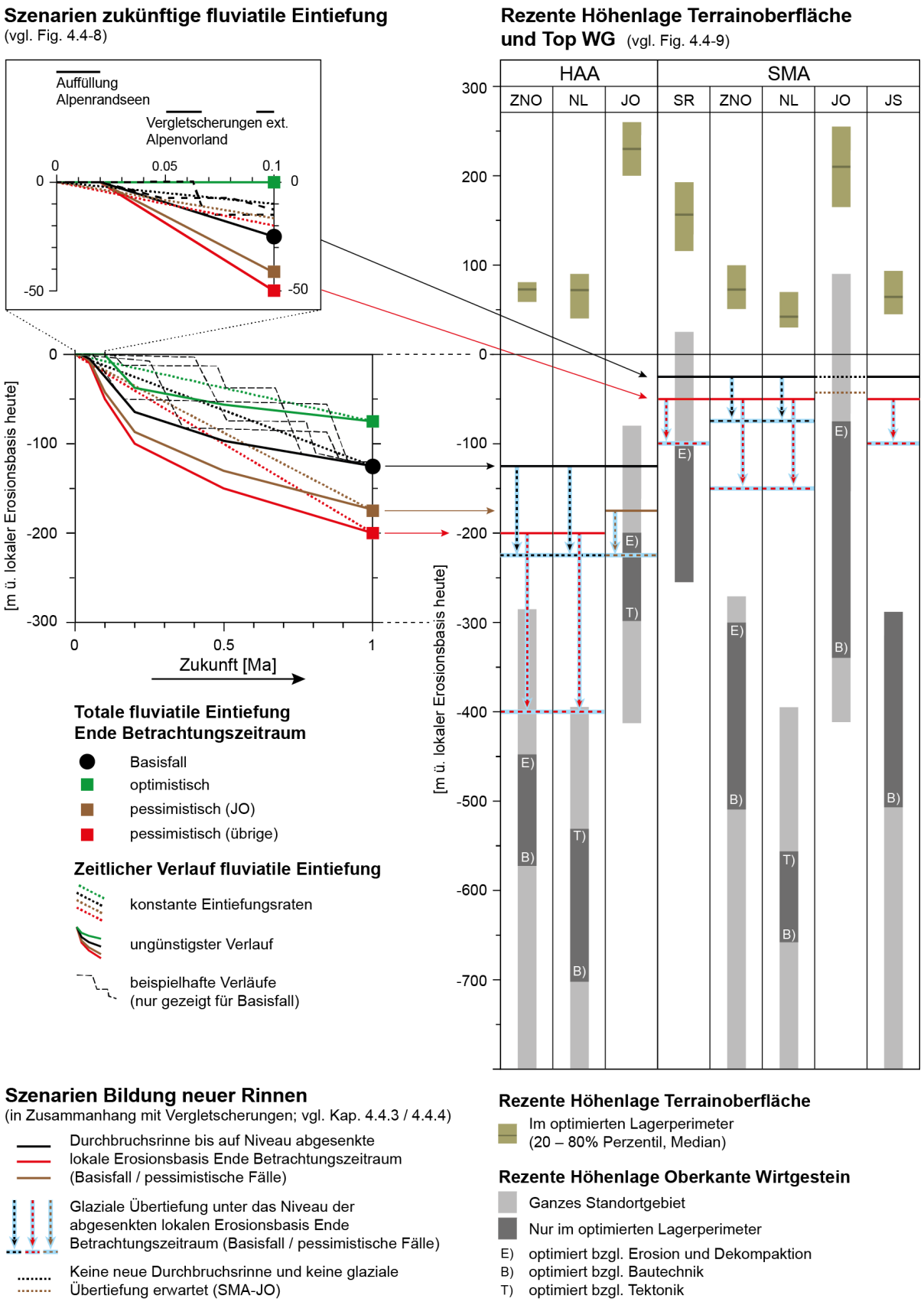


Fig. 3a: Bandbreiten von Erosionsbasis, fluviatilen Rinnen und glazialer Übertiefung. Quelle Nagra 2014c, Fig. 4.4-12, S. 80, unverändert.

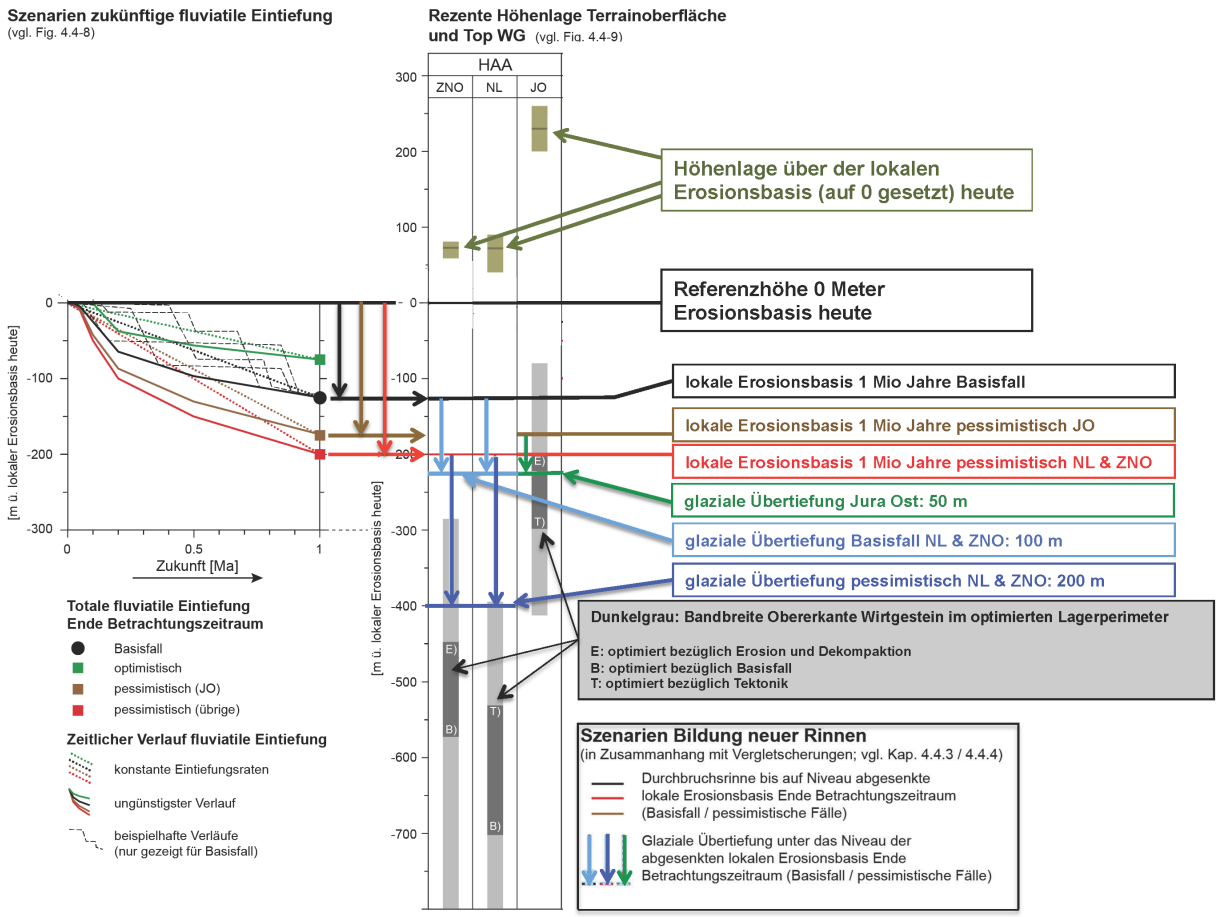


Fig. 3b: Bandbreiten von Erosionsbasis, fluviatilen Rinnen und glazialer Übertiefung (Ausschnitt aus Figur 4.4-12 aus NTB 14-02, Dossier III, S. 80, ergänzt). Die Figur zeigt die nicht auszuschliessende additive Wirkung pessimistischer Szenarien. «Basisfall» und «pessimistische» Prognose sind Einschätzungen der Nagra und weichen von unseren ab (siehe weiter unten). Quelle: Nagra 2014c, Seite 80, abgeändert.

Die geringere Absenkung der lokalen Erosionsbasis im «pessimistischen» Fall von JO im Unterschied zu NL und ZNO können wir, wie bei der Besprechung von Fig. 2a, b ausgeführt, nicht nachvollziehen. Man beachte, dass in JO die Oberkante des Wirtgesteins (optimiert bezüglich Erosion und Dekompaktion, («E)» bei -200 m liegend) bereits ohne Berücksichtigung glazialer Übertiefung erreicht wird, wenn JO also noch keine Sonderbehandlung erfährt bezüglich des «pessimistischen» Szenarios und die Erosionsbasis wie in den Fällen ZNO und NL ebenfalls um 200 m gesenkt wird.

Zieht man die additive Wirkung pessimistischer Szenarien bezüglich Absenkung der lokalen Erosionsbasis und glazialer Übertiefung in JO (nämlich 50 m) in Betracht, erscheint die Situation für JO äusserst kritisch, endet man doch bei -250 m unterhalb der heutigen lokalen Erosionsbasis (Mitte des dunkelgrauen Balkens für JO in Fig. 3a).

In Anbetracht der grossen Unsicherheiten bezüglich der vergangenen und prognostizierten Absenkung der lokalen Erosionsbasis ist für uns nicht nachvollziehbar, wie die Nagra JO hinsichtlich des Kriteriums «Absenkung der lokalen Erosionsbasis in Hinblick auf die Bildung neuer Rinnen» bewertet. Wir weisen zudem darauf hin, dass die Einschätzung der künftigen Absenkung der lokalen Erosionsbasis selbstverständlich

nicht nur für die Bildung neuer Rinnen wichtig ist, sondern auch für das schon besprochene Kriterium «Gesteinsdekompaktion» und die noch zu besprechende Bildung «neuer Rinnen» und das entscheidrelevante Kriterium «glaziale Übertiefung».

4.3.2. Auswirkungen der Szenarien «Basisfall» und «pessimistischer Fall» gemäss unserer Einschätzung

Im Folgenden basieren wir unsere weiteren Überlegungen auf den Resultaten eigener Recherchen, welche zu einer alternativen Einschätzung des Betrags der Absenkung im «Basisfall» (im Folgenden «Basisfall neu» genannt) und im «pessimistischen Fall» («pessimistischer Fall neu») führen.

Zur näherungsweisen Einschätzung der sehr komplex verlaufenden endogenen und exogenen Prozesse erscheint es auch uns sinnvoll, eine Analogiebetrachtung zur Entwicklung der Erosionsbasis auszuführen, wie sie während der letzten 1 Million Jahre ablief. Entsprechende Anhaltspunkte bieten die Einschneidungsprozesse des Hochrheins seit der Ablagerung der Höheren Deckenschotter (HDS). Die dazu gehörenden Beschreibungen in Schnellmann et al. 2014 und Nagra 2014c basieren grossenteils auf den Beobachtungen und Folgerungen, wie sie in Kuhlemann & Rahn 2013 dargestellt sind. Die Erkenntnisse von Akçar et al. 2014 waren bei der Drucklegung von Nagra 2014a und Nagra 2014c noch nicht veröffentlicht. Dennoch werden sie in Nagra 2014c auf Seite 57 unter Fussnote [23)] erwähnt. Hier wird, allerdings ohne weitere Begründung, festgehalten, dass es sich beim von Akçar et al. 2014 bestimmten Alter nicht um «ein Ablagerungsalter für die HDS handeln» dürfte. Die Erkenntnisse von Akçar et al. 2014 liefern, falls zutreffend, für den anzunehmenden Zeitablauf des Einschneidungsprozesses völlig neue Grundlagen, aufgrund welcher das zu erwartende Erosionsmass unter Umständen völlig neu beurteilt werden muss. Mit Sicherheit weisen diese neuen Erkenntnisse auf wesentliche noch existierende Wissenslücken betreffend die Datierung der Schottervorkommen hin.

Die Arbeit von Akçar et al. 2014 präsentiert neueste Messungen kosmogener Nuklide, welche die Bestimmung von Expositionsaltern erlauben. Die Autoren stellen fest, dass die Ablagerung der HDS im Raum Mandach nicht – wie bis anhin aufgrund paläontologischer Datierungen am Irchel angenommen – bis vor 2 Millionen Jahre (siehe Fig. 2a, b), sondern bis etwa vor 1 Million Jahre andauerte. Infolgedessen konnten die betroffenen Schottervorkommen bei Mandach, sofern sie den HDS zugerechnet werden können, auch erst ab diesem Zeitpunkt abgetragen werden. Dies heisst wiederum, dass die HDS erst ab diesem Zeitpunkt eingeschnitten werden konnten. Würde sich diese Beobachtung anhand weiterer Überprüfungen an anderen Vorkommen, wie zum Beispiel am Irchel, als richtig erweisen, wäre der massgebende, tiefreichende Prozess in nur halb so langer Zeit erfolgt, als dies bis anhin angenommen worden ist. Dies hätte eine Verdoppelung der in Nagra 2014c zu Grunde gelegten Erosionsrate zur Folge. Akçar et al. 2014 weisen aber darauf hin, dass ihre Resultate mit weiteren Abklärungen zu überprüfen seien. In der erwähnten Fussnote [23)] in Nagra 2014c auf Seite 57 wird denn auch vermerkt, dass drei Mitautoren von Akçar et al. 2014 – teils in Kuhlemann & Rahn 2013 und teils in einer persönlichen Mitteilung vom 24.11.2014 – sich dahingehend äussert haben sollen, dass es sich bei dem Referenzstandort HDS bei Mandach nicht um ein Ablagerungsalter für die HDS handeln dürfte. Es ist uns nicht möglich, die Zuverlässigkeit dieser Aussage in dieser Fussnote abschliessend zu beurteilen.

In Anbetracht der existierenden Unsicherheiten gehen wir im Folgenden, abweichend von den in den Fig. 2 und 3 illustrierten Annahmen der Nagra, von einer erhöhten Erosionsrate aus: von einem «Basisfall neu» (Absenkung der lokalen Erosionsbasis um 175 m) und einem «pessimistischen Fall neu» (Absenkung der Erosionsbasis um 250 m) an allen Standorten (siehe Fig. 4 und 5). Man beachte, dass diese Neueinschätzung optimistischer ist als ein Szenario, welchem eine Verdoppelung der von der Nagra abgeschätzten Erosionsrate zu Grunde liegen würde (250 m im Basisfall der Nagra und 350 m in deren pessimistischem Fall).

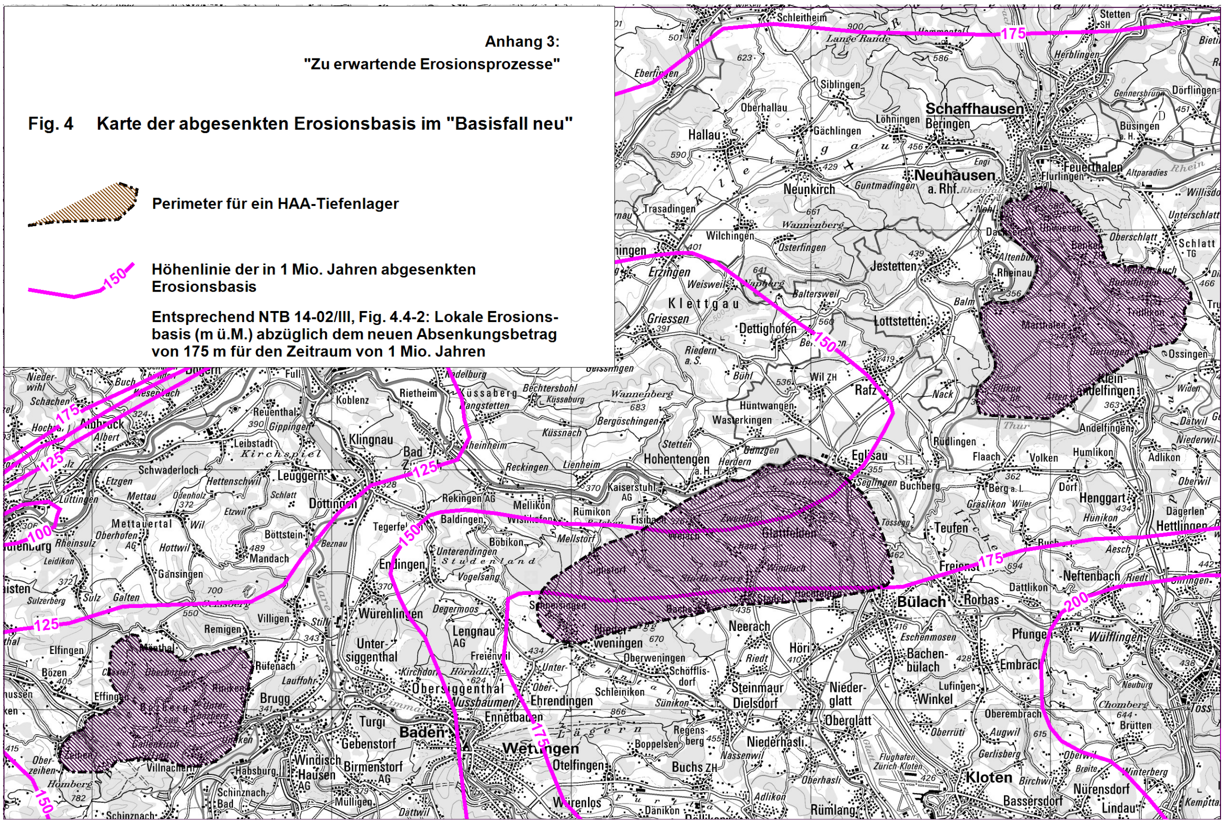


Fig. 4: Abgesenkte Erosionsbasis (in m über Meer) im von uns vorgeschlagenen «Basisfall neu» mit einem Absenkungsbetrag von 175 m (an Stelle von 125 m). Quelle: eigene Darstellung.

Aus den oben geschilderten Details lässt sich ableiten, dass zurzeit zumindest noch wesentliche Differenzen hinsichtlich der Altersbestimmung der Deckenschotterablagerungen (Höhere und Tiefere Deckenschotter) bestehen. Dies ist umso mehr von Bedeutung, als diese Datierungen die Grundlage zur Abschätzung der in der letzten 1 Million Jahre stattgefundenen Erosionsrate und damit das Hauptmass der Entwicklung der abgesenkten Erosionsbasis im massgebenden Betrachtungszeitraum (die zukünftige 1 Million Jahre) bilden. Selbstverständlich können die in Akçar et al. 2014 aufgeführten Beobachtungen und Folgerungen noch nicht als genügend gesichert gelten. Trotzdem erscheint es sehr wohl möglich, dass anhand künftiger, besser abgesicherter Erkenntnisse die in Nagra 2014c dargestellten Diagramme von Fig. 4.4-8 (unsere Fig. 2b) und Fig. 4.4-12 (unsere Fig. 3b) zu revidieren sind.

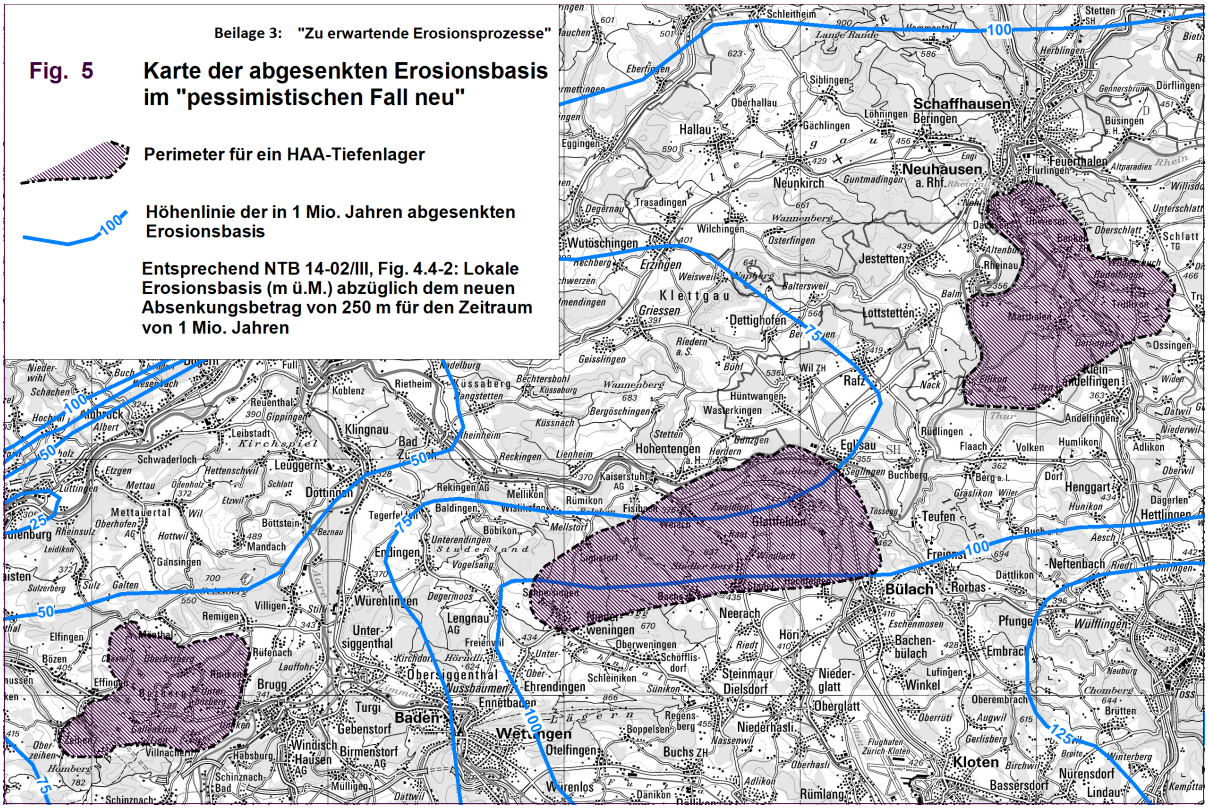


Fig. 5: Abgesenkte Erosionsbasis (in m über Meer) im von uns vorgeschlagenen alternativen «pessimistischen Fall neu» mit einem Absenkungsbetrag von 250 m in allen Standortgebieten. Quelle: eigene Darstellung.

Wegen dieser am Ende von Etappe 2 noch bestehenden Ungewissheiten und um in der Prognose konservativ zu sein, sollte zur Abschätzung der in einem Standortgebiet zu erwartenden, abgesenkten Erosionsbasis mit einer gegenüber Nagra 2014c erhöhten Erosionsrate gerechnet werden. Dadurch lassen sich die genannten neuen Ergebnisse von Akçar et al. 2014 zumindest partiell berücksichtigen. Bis abschliessende Kenntnisse über den bisherigen Einschneidungsprozess vorliegen, sollte somit in allen drei Standortgebieten der Absenkungsbetrag der in 1 Million Jahre zu erwartenden Lage der Erosionsbasis im «Basisfall» der Nagra von 125 m auf 175 m erhöht werden. Im «pessimistischen Fall» sollte die Absenkung in allen drei Standortgebieten bei ca. 250 m unter der heutigen lokalen Erosionsbasis angesetzt werden (siehe Fig. 4 und 5).

Die folgende Fig. 6 zeigt die Konsequenzen für das verbleibende Platzangebot im Standortgebiet JO, welches ohne Zweifel bezüglich der Erosionsszenarien am exponiertesten ist. Sie kombiniert die in Fig. 4 und 5 illustrierten und hier neu vorgeschlagenen Absenkungen der lokalen Erosionsbasis mit der heutigen Lage des Top Opalinuston.

In Kapitel 4 wird gesamthaft und im Vergleich aller drei Standorte auf die Konsequenzen dieser neuen Einschätzung («Basisfall neu» und «pessimistischer Fall neu») eingegangen.

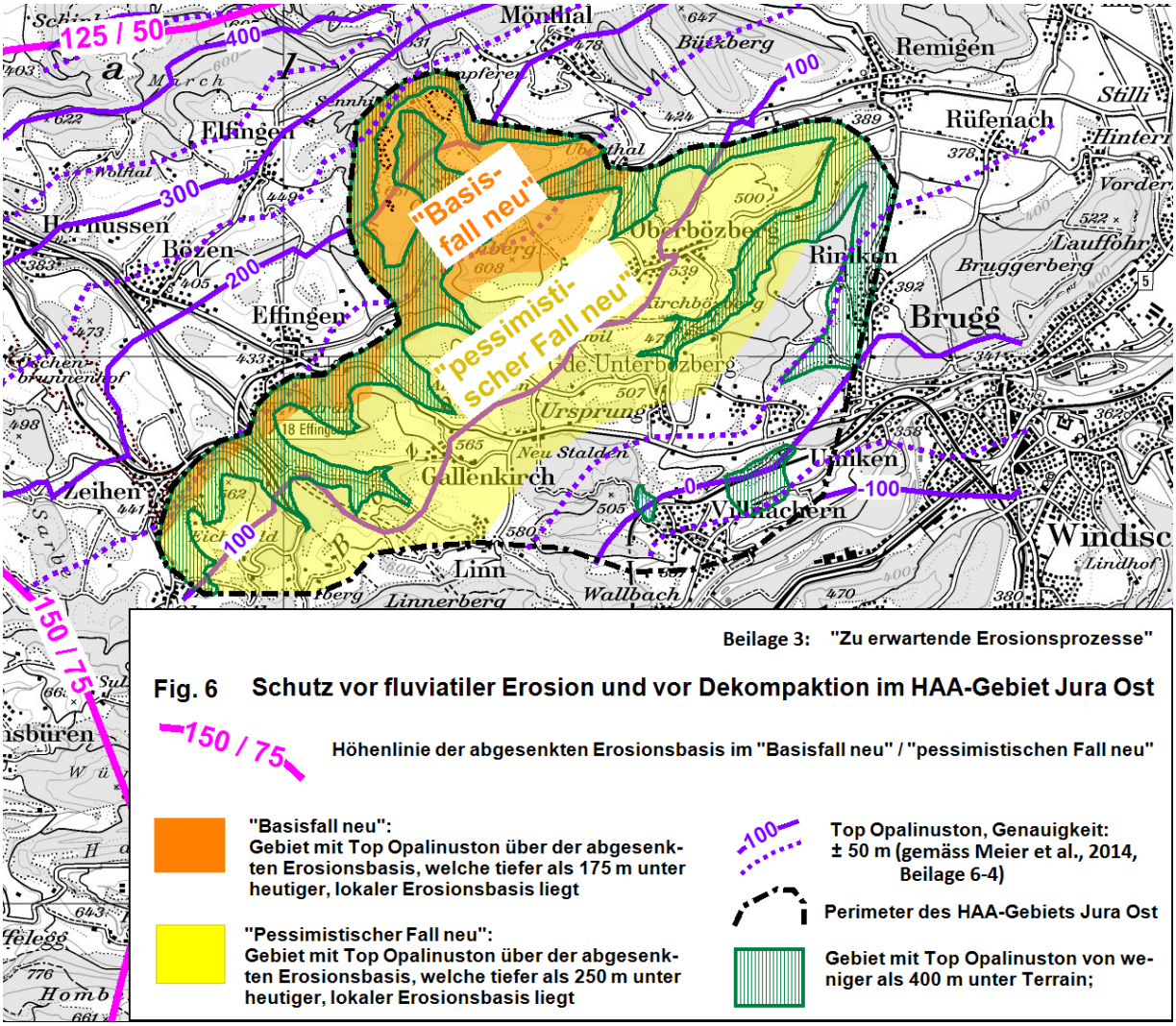


Fig. 6: Abgesenkte Erosionsbasis (in m über Meer) in beiden Szenarien. Schutz vor fluviatiler Erosion und Dekompaktion im Standortgebiet Jura Ost unter Annahme der in Fig. 4 und 5 gezeigten alternativen Festsetzung der Absenkung der lokalen Erosionsbasis. Quelle: eigene Darstellung.

4.4 Durchbruchsrinnen («neue Rinnen»)

Zwischen Haupttälern gelegene Gebiete können unter Umständen rascher erodiert werden als die Haupttäler selbst. Potenziell greifen diese neuen Rinnen im Verlauf des Betrachtungszeitraums relativ rasch unter die abgesenkte lokale Erosionsbasis. Wie die Nagra richtig festhält (Nagra 2014c, Seite 72), sind die Standortgebiete Südranden (SR, nur SMA) und JO (SMA und HAA) aufgrund ihrer geringen Tiefenlage des Wirtgesteins auf diesen Faktor besonders sensitiv. Die Nagra hält ebenfalls zutreffend fest, dass es im Gegensatz zum Standortgebiet SR im Standortgebiet JO keine verfüllten Felsrinnen oder Trockentäler gibt.

Aufgrund des relativ breiten Aaretals und der rezenten Höhe des Bözbergplateaus bezüglich der lokalen Erosionsbasis von durchwegs >200 m wird die Entstehung einer Durchbruchsrinne durch das Bözberggebiet von der Nagra zumindest für die nächsten Vergletscherungen als sehr unwahrscheinlich betrachtet und «bei den Erosionsszenarien nicht berücksichtigt» (Nagra 2014c, Seite 73). Später ist in Nagra 2014c (Seite 78) in Bezug auf JO zu lesen: «Im Sinne einer vorsichtigen Annahme

wird, in Anbetracht des langen Betrachtungszeitraums von 10^6 Jahren, für den Basisfall der Nagra mit der Entstehung einer Durchbruchsrinne bis aufs Niveau einer abgesenkten lokalen Erosionsbasis gerechnet». Die zusätzliche Eintiefung einer potenziellen Durchbruchsrinne wird demnach in JO ausgeschlossen. Wie wir im Folgenden ausführen, können wir jedoch nicht nachvollziehen, dass die Eintiefung einer Durchbruchsrinne unter die abgesenkte lokale Erosionsbasis im Fall JO nicht berücksichtigt wurde.

Während künftigen Eiszeiten können neue Durchbruchsrinnen als Erosionsformen entstehen, und zwar durch Schmelzwässer, die von Eisrändern ausgehen. Dies bedingt allerdings in der Regel topografische Veränderungen, die sich durch vorangegangene Vergletscherungen ausbildeten. Dadurch entstehen innerhalb der Gletscher und ihres Umfelds völlig neue hydrologische/hydraulische Gegebenheiten (vgl. Müller 2010). Ein typisches Beispiel hierfür ist die während der Beringen-Eiszeit erfolgte Verfüllung der Klettgaurinne westlich von Schaffhausen (Bereich Engiwald). Analog könnte eine Verfüllung der Hochrheinrinne südlich von Waldshut angenommen werden. In deren Folge entstünden Schmelzwasserabflüsse über niedrig gelegene Jurapasshöhen – beispielsweise über den Bözberg ins Sissletal (Fig. 7, umseitig, links unten).

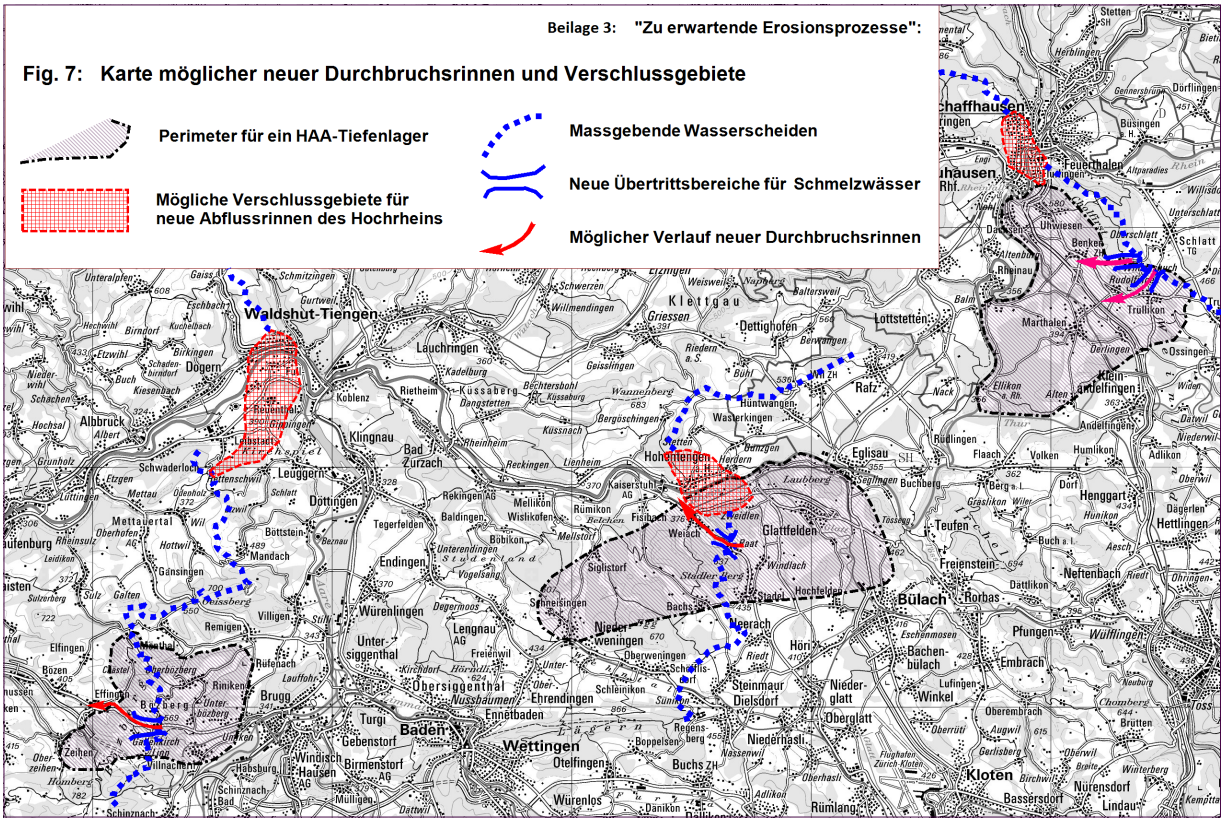


Fig. 7: Mögliche Durchbruchsrinnen und Verschlussgebiete. Quelle: eigene Darstellung.

Die Bildung neuer Durchbruchsrinnen basiert für alle drei Gebiete auf vorgängig erfolgten Verfüllungen der bestehenden Wasserläufe des Hochrheins mit glazigenem Material. Dies, wie erwähnt, analog der Klettgaurinne in der späten Beringen-Eiszeit (einstiges Hochrheintal) mit Anhäufungen von moränenartigem Material von bis 200 m Höhe über der alten Rinnensohle. Solche «Verstopfungseffekte» sind künftig durchaus möglich: für das Standortgebiet ZNO im Raum Schaffhausen-Feuerthalen-Flurlingen, für das Standortgebiet NL im Raum Hohentengen-Zweidlen-Weiach und das Standortgebiet JO im Bereich Waldshut-Full-Reuenthal-Hohwacht (vgl. Fig. 7).

Im Standortgebiet ZNO sind die Voraussetzungen zur Entstehung einer Durchbruchsrinne am ehesten gegeben. Ein entsprechender Verschluss des heutigen Rheintals bei Schaffhausen benötigt relativ wenig glazigenes Material. Zudem kann hier am häufigsten mit den dazu gehörenden Gletscherständen gerechnet werden.

Im Standortgebiet NL ist das Entstehen einer neuen Durchbruchsrinne im Bereich Raat (Gemeinde Stadel) - Weiach ebenfalls vorstellbar, aber die Eintretenswahrscheinlichkeit ist relativ geringer.

Im Standortgebiet JO wird das Entstehen einer Durchbruchsrinne als wenig wahrscheinlich, aber möglich betrachtet. Damit sich ein solches Szenario einstellen könnte, müsste von zwei Vergletscherungsphasen, wenn nicht gar Eiszeiten, ausgegangen werden. Dazu müsste in einer ersten Phase eine Verfüllung des Hochrheintals und in einer zweiten der Einschnitt durch übertretende, randglaziale Schmelzwässer erfolgen. In der kommenden 1 Million Jahre sind jedoch nur ganz wenige Vergletscherungen zu erwarten, die überhaupt eine glazigene Verfüllung des Gebiets

Waldshut-Reuenthal ermöglichen würden. Der entsprechende Eisrand wäre zudem nur wenig interner als jener des Maximalstandes von Möhlin (= externste mittelpleistozäne Eisrandlage) gelegen.

Zusammenfassend ist für die drei Standortgebiete davon auszugehen, dass im massgebenden Zeitraum in allen Bereichen mindestens eine Durchbruchsrinne entstehen kann. Da die zu erwartende Häufigkeit von künftigen Vergletscherungen vom Raum ZNO über NL bis ins Gebiet JO abnehmen wird, nimmt auch die Wahrscheinlichkeit für die Bildung neuer Durchbruchsrinnen in gleicher Richtung ab. Doch darf einerseits die Eintiefung einer Durchbruchsrinne unter die abgesenkte lokale Erosionsbasis im Fall JO nicht ausgeschlossen werden, anderseits erscheint uns die Einstufung der Nagra von ZNO viel zu optimistisch. Am Standort NL ist die Situation zweifellos deshalb am günstigsten, weil die Lagerebene dort wesentlich tiefer liegt.

4.5 Glaziale Tiefenerosion

Mit dem entscheidrelevanten Indikator «Tiefenlage unter Fels im Hinblick auf glaziale Tiefenerosion» wird die Möglichkeit einer Vertiefung und/oder Verbreiterung der existierenden grossen übertieften Felsrinnen als Folge der glazialen Tiefenerosion beurteilt. Das Entstehen glazialer Tiefenerosion ist die Folge verschiedenster massgebender Faktoren, beispielsweise Geometrie bzw. Morphologie der Gletschersohle, Tiefenlage der Felsoberfläche, Beschaffenheit der Felsgesteine, Beschaffenheit des Gletschereises, Temperaturverteilung im Gletscherkörper, Eisüberlagerungshöhe, Schmelzwasserführung sowie Abstand zum «Gletschertor». Die Wechselwirkung dieser Prozesse vermögen aber mathematisch-physikalische Modelle kaum zu quantifizieren und damit auch nicht zu prognostizieren.

Um dennoch – zumindest qualitativ – die unterschiedlichen Auswirkungen beurteilen zu können, muss dies somit anhand von Analogiebetrachtungen früherer Tiefererosion in der Nordschweiz erfolgen. Als massgebende Formen werden nur jene betrachtet, welche «abflusslose» glaziale Eintiefungen umfassen, das heisst solche, die bis unter die lokale Erosionsbasis reichen. Dies *unabhängig* davon, um wieviel tiefer sie unter die lokale Erosionsbasis eingeteuft wurden (vgl. Nagra 2014a Seite 180, Fussnote [118)] und Nagra 2014c, Seite 77, Fussnote [34)]). Solche heute noch eindeutig erkennbaren glazialen Eintiefungen entstanden in der vergangenen 1 Million Jahre im Umfeld der drei Standortgebiete in stark unterschiedlicher Weise. Sie entwickelten sich am meisten ausgeprägt im Weinland (ZNO) und am wenigsten – wenn überhaupt – im Unteren Aaretal (JO). Es gilt daher, die einzelnen Standortgebiete prinzipiell in gleicher Weise, aber dennoch differenziert anzugehen. Somit erscheint es uns richtig, wenn im weiteren Vorgehen in allen Gebieten von der in 1 Million Jahre abgesenkten Fläche der lokalen Erosionsbasis ausgegangen wird.

In Kap. 4.3 schlugen wir vor, dabei im «Basisfall neu» in allen drei Gebieten von einem Absenkungsbetrag von 175 m gegenüber der heutigen lokalen Erosionsbasis auszugehen (vgl. Fig. 4). Im «pessimistischen Fall neu» sollte dieser Betrag auf 250 m erhöht werden (vgl. Fig. 5).

Der für das Standortgebiet ZNO anzuwendende Referenzfall entspricht der im unteren Thurtal glazial «ausgekolkten» Rinne. Sie entstand während der länger andauernden Beringen-Eiszeit. Diese sehr markante Rinne beginnt im thurgauischen Thurtal, also weit oberhalb von Gütighausen, und verläuft via Andelfingen nach Flaach.

Diese über 20 km lange Übertiefung ist mehrheitlich zwischen 1 und 1½ km breit. Obwohl sie durch mehrere Bohrungen erschlossen wurde, ist ihre grösste Tiefe immer noch nicht ausreichend bekannt. Sicher ist nur, dass sie bei Dätwil (Gemeinde Adlikon) mehr als 265 m unter die heutige lokale Erosionsbasis reicht (vgl. Pitsch & Jordan 2014, Beilage 8). Daher ist eine bis 300 m unter diese Bezugsfläche reichende Rinne durchaus plausibel. Für ZNO sollte daher gelten, dass die Oberfläche des Wirtgesteins mindestens 300 m unterhalb der in 1 Million Jahre abgesenkten Erosionsfläche anstehen muss (vgl. Fig. 8, umseitig). Diese Bezugsfläche liegt im «Basisfall neu» zwischen 150 und 175 m ü. M. (Fig. 4) und im «pessimistischen Fall neu» zwischen 75 und 100 m ü. M. (Fig. 5). Infolgedessen gilt für ZNO im «Basisfall neu», dass die Oberfläche des Opalinustons tiefer als zwischen -150 und -125 m ü. M. bzw. im «pessimistischen Fall neu» zwischen -225 und -200 m ü. M. liegen muss.

Der für das Standortgebiet NL geltende Referenzfall entspricht der im Glatttal zwischen dem Flughafen Zürich-Kloten via Endhöri/Bülach und Seglingen (Gemeinde Eglisau) verlaufenden glazial übertieften Rinne. Ihr Entstehungsalter ist noch nicht geklärt. Sie ist aber sicher älter als die letzte Eiszeit, denn sie umfasst auch Gebiete, die ausserhalb des letzteiszeitlichen Gletscherrandes gelegen sind. Die hier vorliegende, ca. 15 km lange Übertiefung ist mehrheitlich um ½ km breit. Ihre Existenz ist durch mehrere Bohrungen belegt. Trotzdem ist ihre grösste Tiefe ebenfalls noch nicht ausreichend bekannt. Sicher ist nur, dass sie zwischen Hochfelden und Bülach mindestens 150 m unter die heutige, lokale Erosionsbasis reicht (vgl. Pitsch. & Jordan 2014, Beilage 9). Daher ist eine Rinnentiefe, die in NL bis 200 m unter dieser Bezugsfläche verläuft, durchaus plausibel. Für NL sollte daher gelten, dass die Oberfläche des Wirtgesteins mindestens 200 m unterhalb der in 1 Million Jahre abgesenkten Erosionsfläche verläuft. Diese liegt im «Basisfall neu» zwischen 175 und 200 m ü. M. (Fig. 4) und im «pessimistischen Fall neu» zwischen 75 und 100 m. ü. M. (Fig. 5). Infolgedessen gilt für NL im «Basisfall neu», dass die Oberfläche des Opalinustons tiefer als zwischen 0 und -25 m ü. M. bzw. im «pessimistischen Fall neu» zwischen -100 und -75 m ü. M. liegen muss. Eine das Tiefenlager gefährdende glaziale Tiefenerosion ist hier auch im «pessimistischen Fall neu» auszuschliessen, da die Oberfläche des Opalinustons tiefer als -100 m ü. M. liegt.

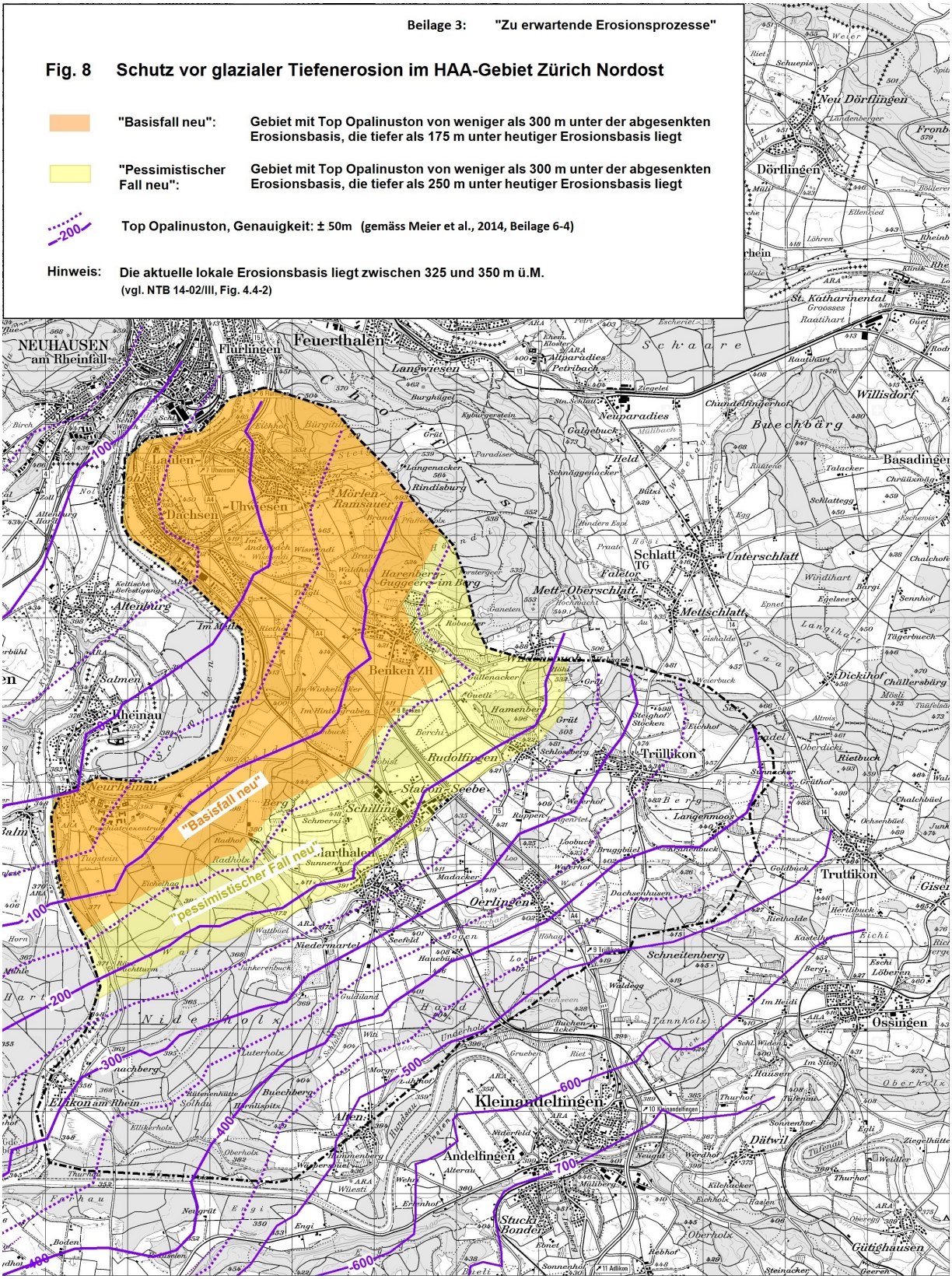


Fig. 8: Tiefenlage von Top Opalinuston (m ü. M.) und Flächen ohne ausreichenden Schutz vor künftiger glazialer Tiefenerosion im Standortgebiet Zürich Nordost. Quelle: eigene Darstellung.

Das Standortgebiet JO wurde während der letzten 1 Million Jahre mindestens von zwei Vergletscherungen überfahren. Dennoch ist aus diesem Gebiet keine glaziale Tiefenerosion bekannt, welche unter die lokale Erosionsbasis reichen könnte (vgl. Pitsch & Jordan 2014, Beilage 10). Es ist daher wahrscheinlich, dass die wenigen in der nächsten 1 Million Jahre zu erwartenden Vergletscherungen hier ebenfalls keine bedeutenden glaziale Übertiefungen zur Folge haben. Deshalb erscheint es plausibel, wenn hier im «Basisfall neu» von keiner glazialen Tiefenerosion ausgegangen wird. Da eine solche dennoch nicht völlig auszuschliessen ist, sollte in JO im neuen «pessimistischen Fall neu» trotzdem von einer glazialen Tiefenerosion ausgegangen werden, welche bis ca. 50 m unter die abgesenkte Erosionsbasis reichen könnte (Fig. 9).

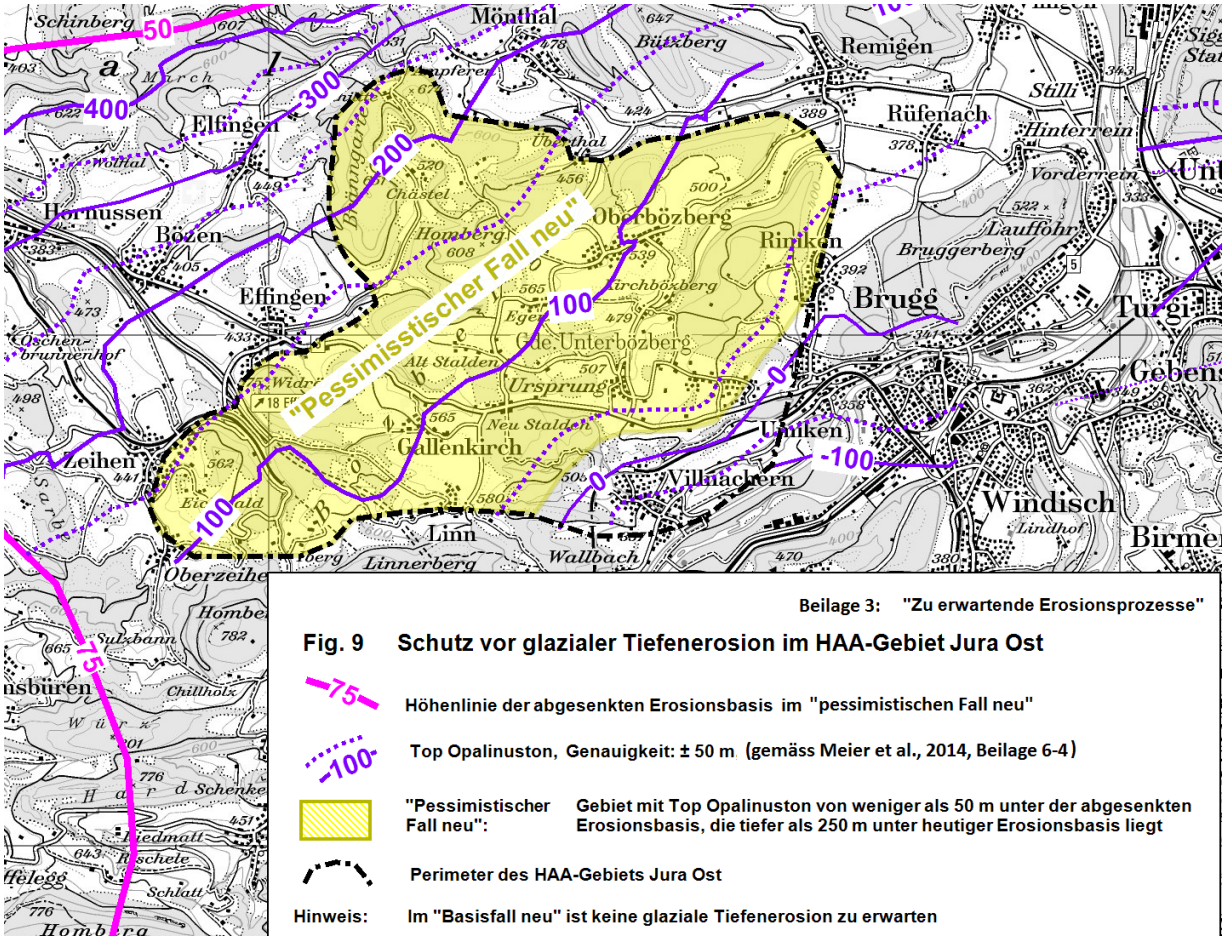


Fig. 9: Tiefenlage von Top Opalinuston (m ü. M.) und Flächen ohne ausreichenden Schutz vor künftiger glazialer Tiefenerosion im Standortgebiet Jura Ost im neuen «pessimistischen Fall». Quelle: eigene Darstellung.

Zusammenfassend halten wir fest, dass die in der Fig. 8 gezeigten Konsequenzen das Platzangebot im Standortgebiet ZNO drastisch einschränken würden. Mit grösseren Einschränkungen des Platzangebots ist auch im Standortgebiet JO zu rechnen (Fig. 9). Im Standortgebiet NL kann infolge der tiefen Lage unter der heutigen Erosionsbasis auch im «pessimistischen Fall neu» eine das Tiefenlager gefährdende glaziale Tiefenerosion ausgeschlossen werden, so dass nicht mit einer Reduktion des Platzangebots infolge glazialer Tiefenerosion zu rechnen ist.

4.6 Modellvorstellungen zur Langzeitentwicklung

Die Nagra definiert den entscheidrelevanten Indikator «Modellvorstellungen zur Langzeitentwicklung (Geodynamik und Neotektonik; weitere Prozesse)» in Nagra 2014c, Seite 47, wie folgt: «Dieser Indikator beurteilt die Prognostizierbarkeit von kritischen Langzeitveränderungen. Dies ist insbesondere dort von Bedeutung, wo das Spektrum der grundsätzlichen Modellvorstellungen breit ist und das Eintreten des kritischsten Prozesses einen grossen Einfluss auf die Langzeitentwicklung hat, aber auch durch zusätzliche Untersuchungen nicht auszuschliessen ist. In SGT Etappe 1 bezog sich der entsprechende Indikator nur auf die Modellvorstellungen zur Geodynamik und Neotektonik. Neu werden darunter neben Aspekten zur Geodynamik und Neotektonik […] auch die Prognostizierbarkeit von kritischen Langzeitveränderungen betreffend Erosion berücksichtigt. Dabei geht es insbesondere um die Entstehung von Durchbruchsrinnen in Gebieten mit vergleichsweise geringer Überlagerung.»

Laut der nur schwer verständlichen Definition dieses Indikators ergeben sich starke Überlappungen mit anderen entscheidrelevanten Indikatoren wie «Tiefenlage unter lokaler Erosionsbasis in Hinblick auf die Bildung neuer Rinnen». Laut Auskunft der Nagra wird unter dem Begriff «weitere Prozesse» vor allem die Möglichkeit von Durchbruchsrinnen betrachtet. So schreibt die Nagra in Nagra 2014a (Textband, Seite 317) denn auch: «Das Kriterium ‹Prognostizierbarkeit der Langzeitveränderungen› ergibt in den Standortgebieten Zürich Nordost und Nördlich Lägern die Bewertung «sehr günstig» und im Standortgebiet Jura Ost die Bewertung «günstig». Die Differenz ist primär bedingt durch den Indikator «Modellvorstellungen zur Langzeitentwicklung (Geodynamik und Neotektonik; weitere Prozesse)». Es ist uns nicht klar, ob die Nagra noch andere «weitere Prozesse» berücksichtigte.

Zusammenfassend halten wir fest, dass es beim entscheidrelevanten Indikator «Modellvorstellungen zur Langzeitentwicklung (Geodynamik und Neotektonik; weitere Prozesse)» besonders schwierig ist, die Bewertungen der Nagra bezüglich Vor- und Nachteile der drei Standortgebiete nachzuvollziehen, weiss man doch nicht, was genau mit diesem Indikator bewertet wird. Inwiefern auch Aspekte der Geodynamik und Neotektonik in die unterschiedlichen Bewertungen einflossen, bleibt unklar. Die Dokumente der Nagra schaffen diesbezüglich keine Klarheit.

5 Massgebende Erosionsszenarien

Vorbemerkung: Auf die in Nagra 2014c dargestellte Fig. 4.4-12 (siehe unsere Fig. 3) wird in diesem Kapitel nicht näher eingegangen, da weder die Abgrenzung des «optimierten Lagerperimeters», inklusive deren vorgenommenen «Modifikationen», noch die angewendete Statistik bezüglich der Median- und Perzentilwerte nachvollziehbar dem Bericht entnommen werden kann.

Für die einzelnen Standortgebiete liegen ganz unterschiedliche Verhältnisse bezüglich der Langzeitentwicklung und der einzelnen Erosionsszenarien vor (vgl. Kap. 4). Bei Bewertung und Vergleich der drei Standortgebiete ZNO, JO und NL schlagen wir im Folgenden ein strukturiertes Vorgehen vor. Die durchgeführten Untersuchungen ergeben, dass sich die einzelnen Erosionsszenarien stets auf die sich in 1 Million Jahre einstellende Absenkung der Erosionsbasis beziehen.

In Anlehnung an die Nagra-Berichterstattung ist es zweckmässig, sich zur Abschätzung der abgesenkten Erosionsbasis auf einen «Basisfall» und einen «pessimistischen Fall» zu beziehen. Auf eine Erwähnung des Begriffs «optimistischer Fall» wird dagegen – im Gegensatz zu den Nagra-Berichten **(**Nagra 2014c, Kap. 4.4, Seiten 67 und 78ff.) – verzichtet. Im Folgenden wird unter «Basisfall» (der Nagra) verstanden, dass die entsprechenden Eigenschaften mit >50% Wahrscheinlichkeit eintreten werden. Dem «Basisfall neu» wird auch die durchschnittliche, aus der Seismik ermittelte Höhenlage vom Near-Top Opalinuston zugrunde gelegt. Wir weisen aber darauf hin, dass diese Tiefenangaben mit einer Ungewissheit von rund 50 m in ZNO und JO bzw. bis zu 150 m in NL behaftet sind (vgl. Meier et al, 2014, Beilage 6-4).

Unter dem «pessimistischen Fall neu» sind dagegen jene Eigenschaften erfasst, die eintreten können bzw. denkbar sind. Diese Szenarien können nicht ausser Betracht gelassen werden, da sie nicht auszuschliessen sind. Auch im «pessimistischen Fall neu» wurde von einer noch nicht sehr präzis bekannten Höhenlage des Top Opalinuston ausgegangen. Möchte man noch «pessimistischer» sein, müsste die höchstmögliche Höhenlage für Top Opalinuston angenommen werden. Sie beträgt in den Gebieten NL bis 150 m und in JO und ZNO bis 50 m. Dadurch würden sich die verfügbaren Lagerperimeter in den Gebieten JO und ZNO entsprechend verkleinern.

Tabelle 1 (umseitig) vergleicht in beiden Fällen («Basisfall neu», «pessimistischer Fall neu») die in 1 Million Jahre abgesenkte Erosionsbasis gemäss unserer Einschätzung mit der heute angenommenen Höhenlage des Opalinustons. Dabei lassen wir die – unbekannten – Auswirkungen der künftigen Klimaentwicklung infolge anthropogener Eingriffe unberücksichtigt.

Tab. 1: Zusammenfassung der erosionsbedingten Auswirkungen der einzelnen Szenarien im «Basisfall neu» und «pessimistischen Fall neu»[3]. Durch den Menschen verursachte Klimaentwicklung unberücksichtigt.

Szenario	Jura Ost (JO)		Nördlich Lägern (NL)		Zürich Nordost (ZNO)	
	«Basisfall neu»	«Pessimistischer Fall neu»	«Basisfall neu»	«Pessimistischer Fall neu»	«Basisfall neu»	«Pessimistischer Fall neu»
Gefährdung des Wirtgesteins durch Gesteinsdekompaktion im Opalinuston selbst	verbreitet in randlichen, steileren Abhängen und ins Hochplateau hineinreichenden Tälern (vgl. Fig. 1)	verbreitet in randlichen, steileren Abhängen und ins Hochplateau hineinreichenden Tälern (vgl. Fig. 1)	keine	keine	keine	keine
Gefährdung des Wirtgesteins durch Absenkung der lokalen Erosionsbasis	vorwiegend im W, NW, N und NE (vgl. Fig. 4).	gesamtes nördliches Gebiet (vgl. Fig. 6).	keine	keine	keine	keine
Bildung neuer Durchbruchsrinnen	keine	unwahrscheinlich	unwahrscheinlich	wenig wahrscheinlich	wahrscheinlich	wahrscheinlich
Bildung glazial übertiefter Felsrinnen (glaziale Tiefenerosion)	keine	unwahrscheinlich, maximal bis 50 m unter die abgesenkte Erosionsbasis	wenig wahrscheinlich, max. bis 200 m unter die abges. E.	mässig wahrscheinlich, max. bis 200 m unter die abgesenkte Erosionsbasis	wahrscheinlich, max. 300 m unter die abgesenkte Erosionsbasis	wahrscheinlich, max. bis 300 m unter die abgesenkte Erosionsbasis
Reduktion des Platzangebots durch die Gesamtheit der Erosionsprozesse	38 %, (11.2 km^2 von total 29.4 km^2)	91 %, (26.7 km^2 von total 29.4 km^2)	0 % (0 km^2 von total 64.9 km^2)	0 %: (0 km^2 von total 64.9 km^2)	31 %, (15.1 km^2 von total 48.3 km^2)	48 %, (23.2 km^2 von total 48.3 km^2)
Verbleibendes Platzangebot	18.2 km^2	2.7 km^2	64.9 km^2	64.9 km^2	33.2 km^2	25.1 km^2

[3] «Unwahrscheinlich» heisst, dass die Wahrscheinlichkeit des Eintretens sehr niedrig ist, dass die Problematik aber weiterer Untersuchungen bedarf (Eintreten wird nicht erwartet). Die Skala der Eintretenswahrscheinlichkeiten ist: wahrscheinlich > mässig wahrscheinlich > wenig wahrscheinlich > unwahrscheinlich > keine (ausgeschlossen). Auf Quantifizierung wird verzichtet.

Die verschiedenen Erosionsszenarien lassen sich zweckmässigerweise wie folgt zusammenfassen:

- *Flächenhafte Erosion* (Denudation): Dadurch entstehen Gesteinsdekompaktionseffekte im Opalinuston, sofern er heute höher als 400 m unter Terrain ansteht. Dies ist weitgehend unabhängig davon, ob ein «Basisfall» oder ein «pessimistischer Fall» vorliegt. Bei der Beurteilung wird auch bei diesem Szenario von einer bisher nur ungefähr bekannten Lage von Top Opalinuston ausgegangen. Bei einer allfälligen Wertung eines Extremszenarios (siehe oben), müsste ebenfalls eine dem Schwankungsbereich angepasste, höhere Top-Opalinuston-Lage angenommen werden. Die daraus entstehenden Auswirkungen würden vor allem das Standortgebiet JO betreffen, indem dort die Fläche des gegen die Gesteinsdekompaktion zu schützenden Bereichs weitaus am meisten vergrössert würde.
- *Künftige fluviatile Erosion:* Ihre Eintiefungsbeträge sind auf die sich in der nächsten 1 Million Jahre entwickelnde lokale Erosionsbasis bzw. abgesenkte Erosionsbasis bezogen. Hierzu geht dieser Bericht von einem neu definierten «Basisfall neu» und «pessimistischen Fall neu» aus.
- *Bildung neuer Durchbruchsrinnen:* Unter deren Sohle kann im Verlauf späterer Vergletscherungen zusätzlich glaziale Tiefenerosion einsetzen.
- Entstehen neuer, *tiefreichender Rinnen als Folge glazialer Tiefenerosion:* Als Bezugsfläche soll die in der nächsten 1 Million Jahre gemäss dem vorliegenden Bericht zu erwartende, abgesenkte Erosionsbasis dienen.

6 Folgerungen

Die geometrischen Auswertungen der massgebenden Flächen bezüglich der mittleren Lage von Top Opalinuston (Nagra 2014b, A1-10, A2-7 und A3-7), der zu erwartenden abgesenkten Erosionsbasis im «Basisfall neu» bzw. im «pessimistischen Fall neu» (Fig. 2 und 3) sowie bezüglich der zu berücksichtigenden Übertiefungsbeträge durch glaziale Tiefenerosion führen zu den nachstehenden Folgerungen. Bezüglich der mittleren Lage von Top Opalinuston gilt es zusätzlich zu berücksichtigen, dass dessen effektive Lage in den Gebieten ZNO und JO um einen Betrag von ca. ±50 m und im Gebiet NL um einen Betrag von bis zu ca. ±150 m schwanken kann (vgl. Meier et al. 2014, Beilage 6-4).

Infolge der zu erwartenden abgesenkten Erosionsbasis ergeben sich neu zu treffende, geänderte Annahmen für ein HAA-Lager im *Standortgebiet Jura Ost*, die zu einem stark reduzierten verfügbaren Platzangebot führen. Dies betrifft sowohl den «Basisfall neu» als auch – besonders massiv – den «pessimistischen Fall neu» (vgl. Tab. 1). Dies hat grosse negative Einwirkungen auf die Einstufung bezüglich SGT-Kriterium 1.1-8 «Platzangebot untertags».

Unter Anwendung der im gleichen Rahmen getroffenen Annahmen wie im Gebiet Jura Ost verkleinert sich die verfügbare Fläche auch im *Standortgebiet Zürich Nordost* bedeutend (vgl. Tab. 1). Hier müsste in die tiefergelegenen Bereiche des Standortgebiets ausgewichen werden, was unter Umständen in Konflikt steht mit hier nicht diskutierten Problemen bezüglich «Gebiete mit zu meidender Tektonik» oder Gebieten, die bautechnische Schwierigkeiten aufweisen.

Alleine aufgrund der Tatsache, dass das gesamte *Standortgebiet Nördlich Lägern* praktisch keine Probleme bezüglich der Erosionsprozesse aufwirft, wird der von der Nagra postulierte Eignungsunterschied zu den beiden Standortgebieten Jura Ost und Zürich Nordost insgesamt stark vermindert. Die beiden Standortgebiete Zürich Nordost und Jura Ost lassen anhand der vorliegenden Beurteilung der künftigen Erosionsprozesse wesentlich grössere Nachteile gegenüber dem Standortgebiet Nördlich Lägern erkennen. Unter diesem Gesichtspunkt ist deshalb aus Sicht der Erosionsproblematik *mindestens kein belastbarer, also nachvollziehbarer eindeutiger Nachteil des Gebiets Nördlich Lägern gegenüber den beiden andern – Zürich Nordost und Jura Ost – festzustellen*.

Insgesamt betrachtet bestehen zurzeit noch viele grundsätzliche und wesentliche offene Fragen, die es in der kommenden Phase – SGT-Etappe 3 – soweit wie möglich zu klären gilt. Die *Ziele der künftigen ergänzenden Untersuchungen* liegen unter anderen im:

- Bestimmen des Zeitpunkts, ab dem die Höheren Deckenschotter überhaupt erst eingeschnitten werden konnten. Nur dadurch lässt sich schliesslich ableiten, mit welcher Erosionsrate künftig zu rechnen ist.
- Festsetzen der anzuwendenden Tiefenlage der abgesenkten Erosionsbasis in 1 Million Jahre.
- Bestimmen einer genaueren Kenntnis der Höhenlagen der Oberfläche des Wirtgesteins Opalinuston (Verkleinern der Schwankungsbereiche).
- Klären der Frage, inwieweit im HAA-Standortgebiet Jura Ost glaziale Tiefenerosion überhaupt möglich ist.
- Bestimmen der maximal zu berücksichtigenden Tiefe für eine glaziale Tiefenerosion im HAA-Standortgebiet Zürich Nordost.

Solange diese offenen Fragen nicht näher geklärt sind, ist aufgrund der Erosionsbetrachtung eine Einengung von drei auf zwei HAA-Standorte verfrüht und daher abzulehnen.

Beigezogene Unterlagen

Akçar, N., Ivy-Ochs, S., Alfimos, V., Claude, A., Graf, H. R., Dehnert, A., Kubik, Peter W., Rahn, M., Kuhlemann, J. & Schlüchter, Ch., 2014: The first major incision of the Swiss Deckenschotter landscape. Swiss J Geosci 107/2-3: 337-347. Birkhäuser Verlag, Basel.

ENSI 2009: Spezifische Auslegungsgrundsätze für geologische Tiefenlager und Anforderungen an den Sicherheitsnachweis. Richtlinie G03. ENSI, Brugg.

ENSI 2010: Anforderungen an die provisorischen Sicherheitsanalysen und den sicherheitstechnischen Vergleich. ENSI 33/075. ENSI, Brugg.

Kuhlemann, J. & Rahn, M., 2013: Plio-Pleistocean landscape evolution in Northern Switzerland. Swiss J Geosci 106/3, S. 451-467. Birkhäuser Verlag, Basel.

Meier, B., Kuhn, P., Muff, S., Roth, P., Madritsch, H., 2014: Tiefenkonvertierung der regionalen Strukturinterpretation der Nagra 2D-Seismik 2011/12. Arbeitsbericht NAB 14-34. Nagra, Wettingen.

Müller, E. R., 2010: Neue glaziale Talbildung im Zürich Weinland - ein denkbares Szenario. In: Kurzprotokoll der Fachsitzung «Glaziale Tiefenerosion» des Technischen Forums Sicherheit vom 10. September 2010, Beilage 8. ENSI-AN-7411. https://www.plattform-tiefenlager.ch (Zugriff eingeschränkt), Dateiablage TFS.

Nagra, 2008: Vorschlag geologischer Standortgebiete für das SMA- und das HAA-Lager. Begründung der der Abfallzuteilung, der Barrierensysteme und der Anforderungen an die Geologie. Bericht zur Sicherheit und technischen Machbarkeit. NTB 08-05. Nagra, Wettingen.

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

Nagra, 2014b: SGT Etappe 2: Vorschlag weiter zu untersuchender geologischer Standortgebiete mit zugehörigen Standortarealen für die Oberflächenanlage. Geologische Grundlagen Dossier II: Sedimentologische und tektonische Verhältnisse. NTB 14-02, Dossier II.

Nagra, 2014c: SGT Etappe 2: Vorschlag weiter zu untersuchender geologischer Standortgebiete mit zugehörigen Standortarealen für die Oberflächenanlage. Geologische Grundlagen, Dossier III. Geologische Langzeitentwicklung. NTB 14-02, Dossier III.

Nagra, weitere Arbeitsberichte: NAB 09-23 (Glacial Erosion: A review of its modelling), NAB 10-34 (Glacial Erosion Modelling: Results of a workshop held in Unteräageri, Switzerland, 29 April-1 May 2010), NAB 12-48 (Glacial Overdeepening: Results of a workshop held in Zürich, Switzerland, 20 – 21 April 2012).

Pitsch, J. & Jordan, P., 2014: Digitales Höhenmodell Basis Quartär der Nordschweiz - Version 2014 und ausgewählte Auswertungen. Arbeitsbericht NAB 14-02.

Schnellmann, M., Fischer, U., Heuberger, S. & Kober, F., 2014: Erosion und Landschaftsentwicklung Nordschweiz. Zusammenfassung der Grundlagen im Hinblick auf die Beurteilung der Langzeitstabilität eines geologischen Tiefenlagers (SGT Etappe 2). NAB 14-25.