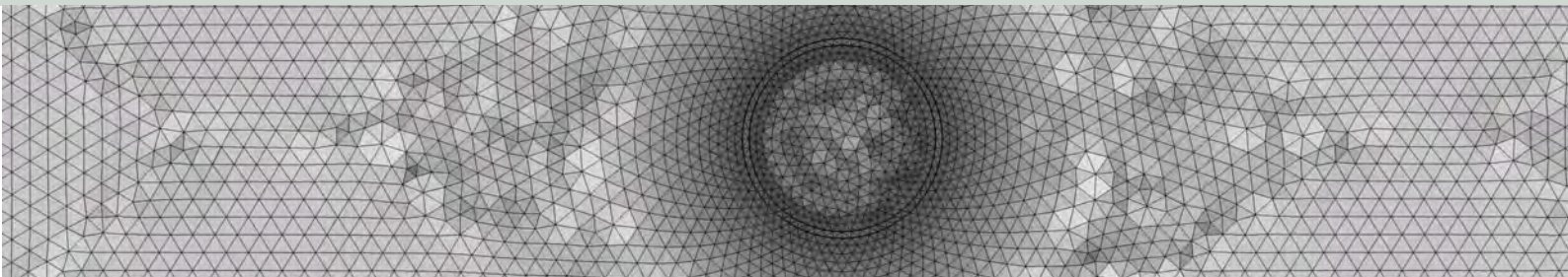




Schweizerische Eidgenossenschaft  
Confédération suisse  
Confederazione Svizzera  
Confederaziun svizra

Swiss Confederation

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



# Prüfung Langzeitstabilität und Quartärgeologie

## Expertenbericht

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

H.-R. Graf  
S. Frank

Dr. von Moos AG

September 2015

*Disclaimer:*

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

**Auftraggeber: Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat  
5200 Brugg**

## **Sachplan geologische Tiefenlager (SGT) Etappe 2**

# **Prüfung Langzeitstabilität und Quartärgeologie**

**Expertenbericht zuhanden des Eidgenössischen  
Nuklearsicherheitsinspektorates ENSI**



**Dr. von Moos AG**

Geotechnisches Büro  
Bachofnerstrasse 5, CH - 8037 Zürich

**Beratende Geologen und Ingenieure**

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

Filialen

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

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

**Bericht Nr. 8600-34**

**7. September 2015**

<b>Inhalt</b>	<b>Seite</b>
Zusammenfassung	3
1. Einleitung	6
2. Verwendete Unterlagen	7
2.1 Berichte der Nagra	7
2.2 Weitere Unterlagen	8
3. Vorgehen der Nagra	10
4. Vorgehen der Experten im Rahmen der Überprüfung	11
4.1 Prüfung der Grundlagen	11
4.1.1 Basis Quartär und Lokale Erosionsbasis	11
4.1.2 Erosion und Landschaftsgeschichte	17
4.1.3 Neotektonik	23
4.1.4 Glaziale Tiefenerosion	26
4.1.5 Umgang mit Ungewissheiten	34
4.2 Anmerkungen zu Indikatoren in der qualitativen Bewertung der geologischen Standortgebiete bzw. der zugehörigen Lagerperimeter	36
4.2.1 Indikator Nr. 2	36
4.2.2 Indikator Nr. 3	37
4.2.3 Indikator Nr. 4	37
4.2.4 Indikator Nr. 23	38
4.2.5 Indikator Nr. 28	38
5. Beantwortung der Leitfragen	39
5.1 Leitfrage 1	39
5.2 Leitfrage 2	39
5.3 Leitfrage 3	40
5.4 Leitfrage 4	40
6. Bemerkungen zu weiter führenden Untersuchungen für Etappe 3 SGT	41
<b>ANHANG</b>	
Anmerkungen zu einzelnen Punkten in den geprüften Berichten der Nagra	43

## Zusammenfassung

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

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

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

In den erwähnten Berichten hat die Nagra die Grundlagen für ihre Beurteilung der Langzeitstabilität der Standortgebiete bzw. Lagerperimeter dargelegt und diese in den zusammenfassende Bericht (NTB 14-02/III) sowie schliesslich in den sicherheitstechnischen Vergleich der Standorte einfliessen lassen (NTB14-01). Die Grundlagenberichte bauen zum grossen Teil auf entsprechenden Berichten aus früheren Untersuchungsphasen auf und entwickeln die jeweiligen Themen anhand von gezielten neuen Untersuchungen, neuen Aufschluss- und Bohrdaten sowie neuer Literatur weiter.

Die Prüfungsarbeit im vorliegenden Expertenbericht fokussierte sich auf folgende Schwerpunkte:

- Basis Quartär und lokale Erosionsbasis
- Erosion und Landschaftsgeschichte
- Neotektonik
- Glaziale Tiefenerosion

Die Nagra hat das bestehende digitale Höhenmodell Basis Quartär ("Version 2008") u.a. anhand von neuen Bohr- und Aufschlussdaten, neuen geologischen Karten, neuen Felsisohypsenkarten sowie weiteren Grundlagen aktualisiert und zum neuen

**"DHM Basis Quartär Nordschweiz"** weiter entwickelt. Dieses stellt nach Ansicht der Experten eine verlässliche aktuelle Datenbasis für weitere Untersuchungsschritte dar.

Basierend auf dieser Grundlage hat die Nagra eine neue Bezugsfläche, die **lokale Erosionsbasis (LEB)** entwickelt, welche im Wesentlichen die Höhenlage der tiefsten fluviatilen Rinnen in den Haupttälern auf das Gesamtgebiet extrapoliert. Dies ist ein Vorgang, der zu einem guten Teil auf subjektiven Ansätzen beruht, welche aus Sicht der Experten jedoch plausibel sind. Allerdings kann für die nun vorliegende LEB nicht ausgesagt werden, ob sie als konservativ zu betrachten ist. Dies sollte im Rahmen der Arbeiten von Etappe 3 SGT geklärt werden.

Als Basis für die Szenarien der zukünftigen geologischen Entwicklung in den Standortgebieten (**Erosionsszenarien**) hat die Nagra eine umfassende und aktuelle Dokumentation der erdgeschichtlichen Entwicklung der letzten ca. 10 Millionen Jahre erarbeitet, wobei das Schwergewicht auf der Entwicklung der letzten ca. 2 Millionen Jahre liegt. Dafür wurde die massgebende existierende Literatur praktisch lückenlos ausgewertet und zu einem in sich kohärenten Modell der Landschaftsgeschichte zusammengefasst. Aus Sicht der Experten sind nur punktuell Klärungen notwendig, welche jedoch keinen Einfluss auf die Standortwahl haben und in Etappe 3 SGT ausgeführt werden können.

Die Untersuchung der **neotektonischen Vorgänge** durch die Nagra beinhaltet eine tektonische Analyse des Untersuchungsgebietes und eine Wertung des Potenzials der festgestellten Strukturen für zukünftige differenzielle Krustenbewegungen, die Auswertung von aktuellen Vermessungsdaten sowie die Analyse der Höhenverteilung von quartären Ablagerungen. Die Nagra kommt zum Schluss, dass für die Nordschweiz nur ein sehr geringes Potenzial für zukünftige tektonische Vorgänge vorliegt. Für das Standortgebiet Wellenberg wird dieses Potenzial als vergleichsweise höher betrachtet. Die Experten teilen die Ansichten der Nagra. Betreffend der Datenbasis sind nur geringfügige Ergänzungen zu empfehlen, welche aber keinen Einfluss auf die Standortwahl haben und im Rahmen der Arbeiten von Etappe 3 SGT ausgeführt werden können.

Die **glaziale Tiefenerosion** ist ein Prozess, welcher markant unter die lokale Erosionsbasis greifen kann. Sie wurde deshalb schon früh im Prozess der Standortsuche für geologische Tiefenlager als massgebender geologischer Vorgang erkannt und von der Nagra untersucht. Dabei konnte die Nagra das Prozessverständnis sukzessive entwickeln; die wurde auch im Rahmen von SGT Etappe 2 konsequent weitergeführt. Die ausgeführten Arbeiten beleuchten v.a. Erosionsvorgänge, welche zu glazialer Tiefenerosion führen, die Kenntnisse über die Entstehung von übertieften Tälern, das Verhalten von Gletschern unter dem Einfluss von wechselnden klimatischen Verhältnissen während Eiszeiten und die Möglichkeiten der Modellierung des Verhaltens von Gletschern sowie von subglazialer Erosion. Wegen der Vielzahl von Einflussgrößen erweist sich eine mathematische Modellierung von zukünftiger glazialer Tiefen-

erosion für die Standortgebiete als zurzeit noch nicht möglich. Die Abschätzung des möglichen Einflusses von glazialer Tiefenerosion durch die Nagra beruht weiterhin auf dem generellen Prozessverständnis sowie den Kenntnissen über die realisierten Erosionsbeträge. Ausgehend von einer Felsdepression im Bereich von Andelfingen, welche über 250 m unter die LEB reicht, beziffert die Nagra den Maximalbetrag für zukünftige glaziale Tiefenerosion mit 200 m. Dieser reduzierte Betrag wird mit den in den Standortgebieten Nördlich Lägern und Zürich Nordost oberhalb des Opalinustons liegenden Malmkalken begründet, welchen eine relativ hohe Erosionsresistenz zugemessen wird. Die Experten anerkennen zwar das von der Nagra präsentierte Prozessverständnis, sind aber der Ansicht, dass dieses besonders in zweierlei Hinsicht gezielt weiter entwickelt werden sollte. Einerseits sollten mögliche Wechselwirkungen zwischen Entwässerung im Gletschervorfeld und subglazialen Fließverhältnissen untersucht werden, im Hinblick auf die geografische Fokussierung zukünftiger Tiefenerosion. Andererseits sollte die Annahme einer relativ hohen Resistenz der Malmkalke gegenüber subglazialer Erosion überprüft werden, besonders unter den Aspekten der Wechselwirkungen zwischen einem ausgedehnten Karstsystem und subglazialer Entwässerung und chemischer Erosion der Kalke. Vorläufig wird deshalb das von der Nagra verwendete Mass zukünftig möglicher glazialer Tiefenerosion von 200 m von den Experten als zu wenig konservativ betrachtet.

Die im vorliegenden Expertenbericht behandelten Themen fließen in die Entscheidungsrelevanten Indikatoren "Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf die Gesteinsdekompression" (I2), "Tiefenlage unter lokaler Erosionsbasis im Hinblick auf die Bildung neuer Rinnen" (I3), "Tiefenlage unter Fels im Hinblick auf die glaziale Tiefenerosion" (I4), "Modellvorstellungen zur Langzeitentwicklung (Geodynamik und Neotektonik; weitere Prozesse)" (I23), sowie "Erosion im Betrachtungszeitraum" (I28) des sicherheitstechnischen Vergleichs der Standortvorschläge ein. Es wurde beurteilt, ob die Nagra die von ihr präsentierten Kenntnisse und Interpretationen angemessen in die Beurteilung der Indikatoren für die einzelnen Standortgebiete hat einfließen lassen. Die Experten sind der Ansicht, dass dies weitgehend der Fall ist, mit Einschränkungen entsprechend den oben dargelegten Einwänden.

Die Empfehlungen der Experten für zusätzliche Untersuchungen für Etappe 3 SGT fokussieren auf dem konsequenten weiteren Ausbau des Prozessverständnisses der glazialen Tiefenerosion. Als Teil dieser Forschung werden auch Sondierbohrungen in den in Etappe 3 SGT weiter zu untersuchenden Standortgebieten mit einer intensiven quartärgeologischen Untersuchung und Auswertung nötig sein. Insbesondere sollte der Sedimentinhalt der innerhalb oder im nahen Umfeld der Standortgebiete existierenden Talübertiefungen Gegenstand von Forschungsarbeit sein.

## 1. Einleitung

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

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

Das Eidgenössische Nuklearsicherheitsinspektorat ENSI hat die Experten der Dr. von Moos AG beauftragt, dieses Dossier III sowie die ergänzenden Berichte zum Themenbereich Langzeitstabilität und Quartärgeologie anhand von Leitfragen des ENSI zu prüfen.

Im vorliegenden Bericht werden die Ergebnisse der Prüfung der hinsichtlich Langzeitstabilität, Erosionsszenarien und Quartärgeologie relevanten Berichte der Nagra zusammengefasst, deren Resultate in die Indikatoren "Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf die Gesteinsdekompaktion" (I2), "Tiefenlage unter lokaler Erosionsbasis im Hinblick auf die Bildung neuer Rinnen" (I3), "Tiefenlage unter Fels im Hinblick auf die glaziale Tiefenerosion" (I4), "Modellvorstellungen zur Langzeitentwicklung (Geodynamik und Neotektonik; weitere Prozesse" (I23), sowie "Erosion im Betrachtungszeitraum" (I28) des sicherheitstechnischen Vergleichs der Standortvorschläge einfließen.



## 2. Unterlagen

### 2.1 Berichte der Nagra

- NTB 84-16 Haldimann, P., Naef, H. & Schmassmann, H. (1984): Fluviale Erosions- und Akkumulationsformen als Indizien jungpleistozäner und holozäner Bewegungen in der Nordschweiz und angrenzenden Gebieten - Nagra Technischer Bericht
- NTB 93-34 Klemenz, W. (1993): Erosionszenarien Wellenberg - Nagra Technischer Bericht
- NTB 08-05 Vorschlag geologischer Standortgebiete für das SMA- und das HAA-Lager. Begründung der Abfallzuteilung, der Barrierensysteme und der Anforderungen an die Geologie- Bericht zur Sicherheit und technischen Machbarkeit - Nagra Technischer Bericht
- NTB 14-01 Sicherheitstechnischer Vergleich und Vorschlag der in Etappe 3 weiter zu untersuchenden geologischen Standortgebiete - Nagra Technischer Bericht
- NTB 14-02/III SGT Etappe 2: Vorschlag weiter zu untersuchender geologischer Standortgebiete mit zugehörigen Oberflächenanlagen, Geologische Grundlagen, Dossier III, Geologische Langzeitentwicklung - Nagra Technischer Bericht
- NAB 09-06 Burki, V. (2009): Glaziale Erosion: Prozesse und Ihre Kapazitäten - Nagra Arbeitsbericht
- NAB 09-23 Fischer, H.U. (2009): Glacial erosion: a review of its modelling - Nagra Arbeitsbericht
- NAB 10-18 Haeberli, W. (2010): Glaciological conditions in northern Switzerland during recent Ice Ages - Nagra Arbeitsbericht
- NAB 10-33 Liniger, M., Hänni, R., Nagelisen, J., Schnellmann, M. (2014): Ausgewählte Beobachtungen im Hinblick auf die geologische Langzeitentwicklung des Standortgebiets Wellenberg - Nagra Arbeitsbericht
- NAB 10-34 Fischer, U.H., Haeberli, W. (2010): Glacial erosion modelling, Results of a workshop held in Unterägeri, Switzerland, 29 April – 1 Mai 2010 - Nagra Arbeitsbericht
- NAB 12-20 Heuberger, S., Büchi, M., Naef, H. (2014): Drainage system and landscape evolution in northern Switzerland since the Late Miocene - Nagra Arbeitsbericht

- NAB 12-35 Heuberger, S., Naef, H. (2014): Regionale GIS-Kompilation und-Analyse der Deckenschotter-Vorkommen im nördlichen Alpenvorland - - Nagra Arbeitsbericht
- NAB 12-48 Fischer, U.H., Haeberli, W. (2012): Glacial overdeepening, Results of a workshop held in Zurich, Switzerland, 20-21 April 2012 - Nagra Arbeitsbericht
- NAB 13-40 Green, A.G., Merz, K., Marti, U., Spillmann, T. (2013): Gravity data in northern Switzerland and southern Germany - Nagra Arbeitsbericht
- NAB 13-71 Stumm, D. (2010): Deep glacial erosion, Review with focus on tunnel valleys in northern Europe - Nagra Arbeitsbericht
- NAB 14-02 Pietsch, J., Jordan, P. (2014): Digitales Höhenmodell Basis Quartär der Nordschweiz - Version 2014 und ausgewählte Auswertungen - Nagra Arbeitsbericht
- NAB 14-25 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) - Nagra Arbeitsbericht
- Roth, Ph. (2011): Durchgehende Quartärkartierung mit Hilfe der CRS-Stapelung 3D Z-HWL - Nagra Interner Bericht

## 2.2 Weitere Unterlagen

- Bitterli-Dreher, P., Graf, H.R., Naef, H., Diebold, P., Matousek, F., Burger, H. & Pauli-Gabi, T. (2007): Erläuterungen zu Blatt 1070 Baden des Geologischen Atlas der Schweiz 1:25'000, Bundesamt für Landestopographie
- Büchi + Müller AG (1997): Hydrogeologie Schaffhausen Ost - "Binninger Rinne" - unveröff. geol. Bericht zH. Kt. Schaffhausen
- Dehnert, A., Lowick, S.E., Preusser, F., Anselmetti, F.S., Drescher-Schneider, R., Graf, H.R., Heller, F., Horstmeyer, H., Kemna, H.A., Nowacyk, N.R., Züger, A. & Furrer, H. (2012): Evolution of an overdeepened trough in the northern Alpine Foreland at Niederweningen, Switzerland - Quaternary Science Reviews, 34: 127-145
- Dr. von Moos AG (2009): Sachplan Geologische Tiefenlager (SGT) Etappe 1: Beurteilung der glazialen Tiefenerosion im Rahmen der Festlegung der geologischen Standortgebiete, Expertenbericht ENSI 33/063
- ENSI (2013): Präzisierungen zur sicherheitstechnischen Methodik für die Auswahl von mindestens zwei Standortgebieten je für HAA und SMA in Etap-

pe 2 SGT, ENSI 33/154, Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat, ENSI

- Fraefel, M. (2008): Geomorphic response to neotectonic activity in the Jura Mountains and the southern Upper Rhine Graben. Diss. Univ. Basel.
- Graf, H.R. (1993): Die Deckenschotter der zentralen Nordschweiz - Diss. ETH No. 10205, ETH Zürich
- Graf, H.R. (2009a): Stratigraphie von Mittel- und Spätpleistozän in der Nordschweiz - Beiträge zur Geologischen Karte der Schweiz (N.F. 168), Bundesamt für Landestopografie Swisstopo
- Graf, H.R. (2009b): Stratigraphie und Morphogenese von frühpleistozänen Ablagerungen zwischen Bodensee und Klettgau - Eiszeitalter und Gegenwart / Quaternary Science Journal, 58: 12-53
- Graf, H.R., Bitterli-Dreher, P., Burger, H., Bitterli, T., Diebold, P. & Naef, H (2006): Blatt 1070 Baden des Geologischen Atlas der Schweiz 1:25'000, Bundesamt für Landestopographie
- Graf, H.R., Jost, J., Eberhard, M., Krusse, H., Reber, D. & Willenberg, H. (2012): Blatt 1109 Schöftland des Geologischen Atlas der Schweiz 1:25'000, Bundesamt für Landestopographie
- Kock, S. (2008): Pleistocene terraces in the Hochrhein area - formation, age constraints and neotectonic implications - PhD thesis, Universität Basel

### 3. Vorgehen der Nagra

Die Resultate der in den Nagra-Berichten zur Etappe 2 dokumentierten Untersuchungen zu Quartärfragen fliessen im Rahmen der qualitativen Bewertung der geologischen Standortgebiete bzw. der zugehörigen Lagerperimeter sowie des sicherheitstechnischen Vergleichs der geologischen Standortgebiete (NTB 14-01) in folgende Kriteriengruppen, Kriterien und Indikatoren ein:

Kriteriengruppe (KG):

KG1 Eigenschaften des Wirtgesteins bzw. des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs

Kriterium:

1.2 - Hydraulische Barrierewirkung

Indikator:

2 Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf die Gesteinsdekompression

Kriteriengruppe (KG):

KG2 Langzeitstabilität

Kriterium:

2.2 - Erosion

Indikatoren:

28 Erosion im Betrachtungszeitraum

2 Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf die Gesteinsdekompression

3 Tiefenlage unter lokaler Erosionsbasis im Hinblick auf die Bildung neuer Rinnen

4 Tiefenlage unter Fels im Hinblick auf die glaziale Tiefenerosion

Kriteriengruppe (KG):

KG3 Zuverlässigkeit der geologischen Aussagen

Kriterium:

3.3 - Prognostizierbarkeit der Langzeitveränderungen

Indikator:

23 Modellvorstellungen zur Langzeitentwicklung

(Geodynamik und Neotektonik, weitere Prozesse)

Die Identifikation von eindeutigen Nachteilen eines Standortgebiets erfolgt anhand von entscheiderelevanten Merkmalen und zugehörigen Indikatoren. Gemäss ENSI (2013) gilt unter anderem das Merkmal "Langzeitstabilität der geologischen Barriere" als entscheiderelevant. Die zugehörigen entscheiderelevanten Indikatoren wurden von den Nagra identifiziert und erläutert (vgl. NTB 14-1, Seite 29 und Anhang A1). In unseren Themenbereich fallen die oben aufgelisteten Indikatoren, welche also alle dem erwähnten entscheiderelevanten Merkmal zugeordnet sind.

Die Beurteilung/Wertung der Indikatoren durch die Nagra beruht im Wesentlichen auf Szenarien der zukünftigen Entwicklung (10<sup>5</sup> Jahre für SMA, 10<sup>6</sup> Jahre für HAA). Dabei

handelt es sich grundsätzlich um verschiedene Erosionsszenarien sowie deren Kombination. Die Erosionsszenarien werden von der Nagra abgeleitet aus Analysen des rezenten Zustandes (inkl. rezent ablaufende Prozesse), der erdgeschichtlichen Dokumentation früherer Zustände sowie dem Verständnis der massgebenden geologischen Prozesse. Dafür wurden von der Nagra folgende neue Grundlagen erarbeitet (in Klammern die von uns diesbezüglich geprüften Berichte der Nagra):

- Basis Quartär (NAB 13-40, NAB 14-02, NAB 13-71, Roth 2011)
- Lokale Erosionsbasis (NAB 14-25, NAB 13-71)
- Erosion und Landschaftsentwicklung (NAB 12-20, NAB 12-35, NAB 13-71)
- Neotektonik (NTB 14-02 III, NAB 13-71)
- Glaziale Tiefenerosion (NAB 09-06, NAB 09-23, NAB 10-18, NAB 10-33, NAB 10-34, NAB 12-48).

#### 4. Vorgehen der Experten im Rahmen der Überprüfung

Unsere Prüfung der Berichte orientiert sich am oben skizzierten Vorgehen der Nagra, wobei zunächst die Grundlagen und anschliessend die darauf aufbauenden Schritte betrachtet werden:

--> Prüfung der Grundlagen

--> Ableitung der Erosionsszenarien

--> Auswirkungen auf die entscheiderelevanten Indikatoren

Von uns nicht im Detail sondern nur auf Plausibilität geprüft wurden in diesem Zusammenhang folgende Grundlagen-Aspekte:

- zukünftige Entwicklung des Klimas
- flächige Erosion, Denudation
- rezente Krustenbewegungen, tektonisches Spannungsfeld

#### 4.1 Prüfung der Grundlagen

##### 4.1.1 Basis Quartär, lokale Erosionsbasis

###### *Darstellung der Nagra*

###### **Nordschweiz**

Die Erstellung des neuen **DHM "Basis Quartär der Nordschweiz"** wird im NAB 14-02 erläutert. Dieses digitale Höhenmodell ist ein Rastermodell mit einer Maschenweite von 25 m. Es beschreibt flächendeckend den Verlauf der Felsoberfläche im Gebiet der Nordschweiz. Bereits für Etappe 1 des Sachplanverfahrens war ein digitales Höhenmodell "Basis Quartär" erarbeitet worden ("Version 2008"). Von der Nagra wurde eine

Überarbeitung und Ergänzung durchgeführt, da sie seither zahlreiche neue Bohrdaten erfasst hat und neue Interpretationen zum Verlauf der Felsoberfläche aus Erläuterungen zu mehreren Karten des Geologischen Atlas der Schweiz 1:25'00, aus Graf (2009a) und vom angrenzenden Ausland verfügbar wurden. Die detaillierte Überarbeitung beschränkte sich auf das zentrale Untersuchungsgebiet der Nordschweiz. Für das Standortgebiet Zürich Nord-Ost wurde eine Kartierung der Felsoberfläche anhand einer Auswertung der 3D-Seismik Zürcher Weinland eingebaut (Roth 2011). Im Weiteren wurden neu interpretierte bzw. erhobene gravimetrische Daten interpretiert (NAB 13-40). Anpassungen und Ergänzungen wurden von der Nagra im Bodenseeraum vorgenommen sowie in angrenzenden Gebieten weitere vorhandene DHM-Datensätze angehängt (z.B. Alpenrheintal).

In Kombination mit weiteren thematischen Höhenmodellen dient das DHM "Basis Quartär" der Nagra als Grundlage für verschiedene Auswertungen, u.a. für die Erarbeitung der "Lokalen Erosionsbasis" (NAB 14-02, Beilagen 16, 17). Ausserdem wurden damit die Mächtigkeiten der quartären Sedimente ermittelt, ebenso die Verbreitung von Übertiefungen (NAB 14-02, Beilagen 20, 21). Im Weiteren diente es zur Erstellung von Profilschnitten entlang der Haupttäler, um z.B. das Verhältnis zwischen Talgefälle und jeweiligem Felsuntergrund zu visualisieren (NAB 14-02, Beilagen 18, 19).

Das DHM "Basis Quartär" stellt im Wesentlichen eine Kompilation von vorhandenen Daten sowie Konzepten und Interpretationen Dritter dar, wobei letztere nicht flächendeckend und nach Ansicht der Nagra nicht widerspruchsfrei vorliegen. Deshalb wurden auch zum Teil für grössere Abschnitte neue Interpretationen erarbeitet (NAB 14-02, Kapitel 3.2.1). Bestehende Interpretationen wurden ausserdem auf neue, darin nicht verwendete Bohrdaten angepasst (verifiziert und als zuverlässig erachtet), dies möglichst unter Beibehaltung der konzeptionellen Ansätze der jeweiligen Autoren. Bei der Übernahme der Auswertung der 3D-Seismik Zürcher Weinland flossen keine konzeptionellen Überlegungen ein. Auch bestehen in diesem Gebiet - wo nicht durch Bohrungen überprüfbar - grundsätzliche, methodisch bedingte Unsicherheiten betreffend die Tiefenlage der Felsoberfläche (Tiefenumwandlung von interpretierten Laufzeiten, NAB 14-02, Kapitel 2.3). Die Ergebnisse der neuen Schwere-Kartierung haben insbesondere im Osten des Modellgebietes (Kanton Thurgau) wichtige Hinweise auf vorhandene glaziale Rinnen geliefert (NAB 14-02, Kapitel 2.5).

Der Prüfung der Bohrdaten wurde seitens Nagra ein spezielles Augenmerk gewidmet (NAB 14-02, Beilagen 2.4). Einerseits wurde eine Plausibilitätsprüfung der in der Bohrungsdatenbank der Nagra vorhandenen Informationen durchgeführt (Lage, Höhenkote gemäss Topodaten, Widersprüche zu geologischen Karten, Vergleich mit benachbarten Bohrungen) und andererseits wurden Bohrdaten, welche in vorhandenen Felsisohypsenkarten angegeben sind, geprüft. Nicht übernommen wurden Bohrungen, welche anhand von Karten des Geologischen Atlas der Schweiz 1:25'000 in die Geocover-Datensätzen aufgenommen worden waren. Dies wegen der fehlenden An-

gaben zur Terrainkote und redaktionell bedingten Verschiebungen der Bohrpunkte auf der Karte zwecks besserer Lesbarkeit.

Im Fall von widersprüchlichen Angaben anhand von Karten oder Bohrdaten wurde die Zuverlässigkeit der Angaben von der Nagra priorisiert. Als am zuverlässigsten gewertet wurden Angaben aus dem Geologischen Atlas der Schweiz 1:25'000 und der Landeskarte 1:25'000, gefolgt von Bohrungsdaten und schliesslich Isohypsenkarten (NAB 14-02, Kapitel 3.1).

Das eigentliche Produkt dieser Überarbeitung ist eine Felsisohypsenkarte (Ausschnitte: NAB 14-02, Beilagen 7 bis 11). Das DHM "Basis Quartär" wurde anschliessend rechnerisch daraus abgeleitet. Zusätzlich zu den Isohypsen basiert es auf konzeptionell nachvollziehbaren, "manuell" festgelegten Talachsen, entlang welcher die lokalen Modellwerte stetig sinken. Das Resultat wurde von der Nagra anschliessend anhand von Bohrdaten überprüft. Im Weiteren wurde eine Kontrolle bezüglich der Topografie durchgeführt. Bereiche, wo die Felsoberfläche gemäss Modell höher als die Topografie lag, wurden angepasst.

Ein wesentliches interpretiertes Produkt, welches auf dem DHM "Basis Quartär" beruht, ist die **lokale Erosionsbasis** (in NAB 14-02 als "tiefste fluviatile Erosionsbasis" oder auch "regionale Erosionsbasis" bezeichnet). Sie stellt eine wichtige Grundlage für weiterführende Betrachtungen (insb. die Erosionsszenarien) dar (NTB 14-02/III) Diese Fläche der lokale Erosionsbasis "LEB" basiert auf den (Paläo-)Talwegen der Haupttäler. Dabei ist die Definition, was ein Haupttal ist, bzw. welche Nebentäler zusätzlich berücksichtigt werden sollen, entscheidend. Es handelt sich also um einen Begriff, der auf Basis von verschiedenen Konzepten "subjektiv" definiert werden kann. Dementsprechend wurden insgesamt fünf unterschiedliche Ansätze zur Generierung der LEB verfolgt, wobei erst deren Kombination zum plausiblen Schlussresultat führte (NAB 14-02, Kapitel 6.4.3). Am deutlichsten tritt die angesprochene "Subjektivität" im Bereich des Standortes Jura Ost hervor, wo die Berücksichtigung bzw. Nicht-Berücksichtigung des Sissle-Tales (bzw. der Topografie des Bözberg-Gebietes) zu markanten Unterschieden führt (NAB 14-02, Beilagen 16, 17).

Als Basis für die Beurteilung der zukünftigen Landschaftsentwicklung (Erosion in den Haupttälern) wurden von der Nagra Flusslaufprofile konstruiert. Diese Konstruktion basiert auf hydrografischen Daten (heutiger Flusslauf, Lage von Stromschnellen) und geologischen Grundlagen (Geologie von Stromschnellen und Flussabschnitten mit Felssohle, Lage der Felsoberfläche (DHM), tektonischen Störungen). Dargestellt sind die Resultate einerseits als Karten und andererseits als Flusslaufprofile mit 125-facher Überhöhung (NAB 14-02, Beilagen 18, 19).

Die Identifikation von glazial übertieften Talabschnitten durch die Nagra erfolgte anhand von zwei Ansätzen. Einerseits wurden die im DHM "Basis Quartär" erkennbaren "abflusslosen Senken" (Bereiche mit relativ tief liegender Felsoberfläche, welche lückenlos von höheren Felsbereichen umgeben sind) rechnerisch gefüllt. Andererseits

wurden jene Talabschnitte bestimmt, welche unterhalb der LEB liegen. Die erste Variante liefert Resultate, die von den der LEB zugrunde liegenden Interpretationen unabhängig ist, im Gegensatz zur zweiten Variante.

### **Wellenberg**

Für das Standortgebiet Wellenberg existierte bisher noch keine **Felsisohypsenkarte**. Diese wurde anhand von Bohrdaten, geologischen Karten, früheren seismischen Untersuchungen sowie Neukartierungen erstellt (NAB 13-71). Darauf aufbauend wurde analog zur Nordschweiz ein digitales Höhenmodell berechnet, welches anschliessend mittels Vergleich mit dem DHM25 des Bundesamtes für Landestopografie, der Ermittlung der Lockergesteinsmächtigkeiten diene.

Eine **lokale Erosionsbasis** - analog zu jener der Nordschweiz - konnte nicht ermittelt werden, denn die tiefste Felsrinne im Standortgebiet liegt gesamthaft tiefer als die Felsschwelle bei Luzern (425 m ü.M.). Das Engelbergertal ist demnach insgesamt als übertieftes glaziales Becken zu interpretieren. Als Ausgangsbasis für die Betrachtungen zur zukünftigen Landschaftsentwicklung wird deshalb das rezente Talniveau des Engelbergertales verwendet (NTB 14-02/III, Kapitel 4.5.2).

Im Weiteren diene die Felsisohypsenkarte der Erstellung von Profilschnitten durch Engelberger- und Secklisbachtal, zusammen mit den Geländehöhen aus dem DHM25 und geologischen Informationen aus Bohrungen sowie bestehenden geologischen Karten.

### ***Stellungnahme der Experten***

#### **Nordschweiz**

Das in NAB 14-02 dokumentierte Vorgehen für die Erstellung des **DHM "Basis Quartär"** ist aus unserer Sicht umfassend und nachvollziehbar erläutert.

Die im NAB 14-02 enthaltenen Isohypsenkarten bzw. Ausschnitte aus dem DHM "Basis Quartär" sind in sich konsistent. Die gegenüber den für die Überarbeitung verwendeten Grundlagen ersichtlichen Abweichungen (z.B. Felsisohypsenkarten aus Graf 2009a) lassen sich u.a. mit der Einarbeitung von neuen Bohrdaten erklären und sind plausibel. Dies gilt auch im Zusammenhang mit der Verwendung der Quartärbasis gemäss der 3D-Seismik Zürcher Weinland (Roth 2011), obwohl diese eine andere Art von Datenbasis darstellt als sonst von der Nagra verwendet wurde. Es ist zwar festzustellen, dass in diesem Bereich des DHM "Basis Quartär" einige der in der entsprechenden Tafel in Graf (2009a) enthaltenen Bohrungen nicht berücksichtigt wurden, das grundsätzliche Bild der Felsoberfläche stimmt jedoch gut mit den bisherigen Interpretationen überein. Die Überarbeitung hat ausserdem mit der Niderholz-Rinne (vgl. Figur 3) ein wichtiges ergänzendes Element geliefert, welches allerdings noch anhand von Sondierbohrungen zu bestätigen ist (vgl. Kapitel 6). Methodenbedingt



sind die konkreten Tiefen der glazialen Rinnen in der von Roth (2011) erarbeiteten Quartärbasiskarte allerdings mit Unsicherheiten behaftet, zu deren Minderung zusätzliche Bohrdaten notwendig sind (vgl. Kapitel 6).

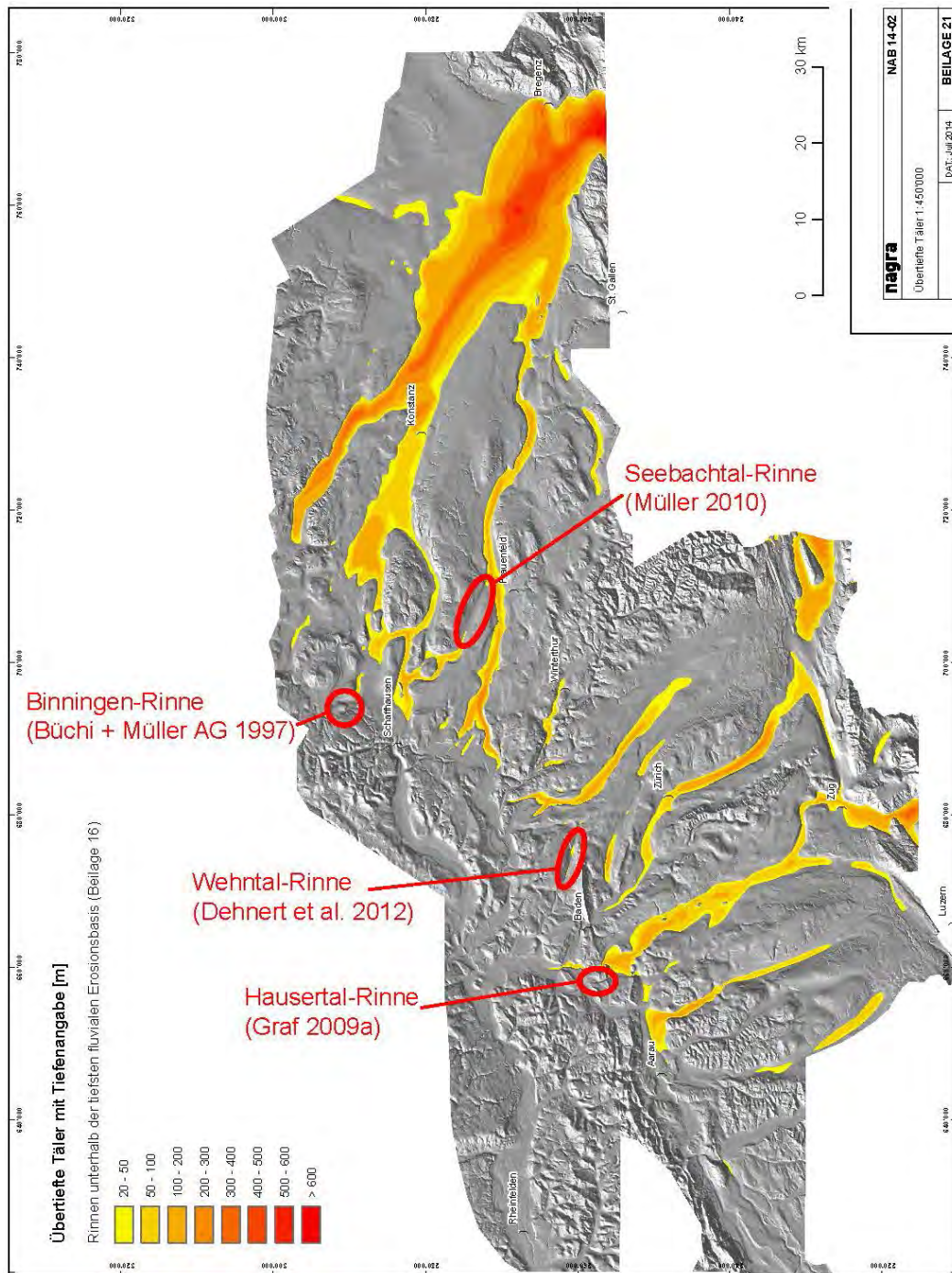
Im Bericht nicht erwähnt ist, ob die vorhandenen neuen Daten zur Basis der Deckenschotter (NAB 12-35) für das neue DHM "Basis Quartär" berücksichtigt wurden. Anhand der in NAB 14-02 enthaltenen Kartenausschnitte ist dies nicht abschliessend zu beurteilen. Allerdings sind die Hügel mit Deckenschotterbedeckung als flache Kuppen dargestellt, während anhand von genetischen Überlegungen eher von (Teil)Rinnen auszugehen wäre. Offenbar wurden seitens Nagra bestehende Felssisohypsenkarten Basis Deckenschotter nicht berücksichtigt (vgl. Graf 2009b). Dies hat zwar keine Konsequenzen betreffend dem Standortvergleich in Etappe 2, sollte aber in Etappe 3 nachgeholt werden.

Die Verwendung der rezenten Sohlen der heutigen Flüsse als Basis für die Interpretation der zukünftigen Entwicklung des Flussnetzes im Rahmen von SGT Etappe 1 war von uns (Dr. von Moos AG, 2009) als dafür nicht vollständig geeignet erachtet worden. Unserer Empfehlung der Verwendung der Felsrinnenbasis wurde mit dem neuen Konzept der **lokalen Erosionsbasis LEB** Rechnung getragen. Der Unterschied zwischen den beiden Konzepten ist anhand der im Bericht enthaltenen Flusslaufprofile (insbesondere zwischen dem Rheinfluss und Basel) gut zu erkennen (NAB 14-02, Beilage 18). Die Herleitung der LEB im Sinn der tiefsten fluviatilen Erosionsbasis (heterochron) ist von der konzeptuellen Anlage her ein neues Element und war daher völlig neu zu erarbeiten. Das Vorgehen ist in NAB 14-02 nachvollziehbar erläutert, und die resultierende LEB ist sinnvoll und plausibel. Es wird jedoch nicht klar, ob die von der Nagra für die weiteren Schritte (z.B. als Ausgangshöhe für die Erosionszenarien in NTB 14-02/III Kapitel 4.4) verwendete LEB als konservativ zu betrachten ist.

Es hat sich gezeigt, dass die Festlegung der als Haupttäler zu interpretierenden Felsrinnen grosse Auswirkungen auf die resultierende Fläche der LEB haben kann. Dies zeigt sich insbesondere im Bereich des Standortgebietes Jura Ost, wo die Berücksichtigung der lokalen Topografie der Felsoberfläche – bzw. die Berücksichtigung des Sissletales als Haupttal (Kurzschluss zwischen Aare- und Rheintal) – zu markanten Unterschieden führt (NAB 14-02, Beilagen 16 und 17). Daraus ergeben sich Konsequenzen für die zu erwartende maximale Tiefe einer eventuellen neuen Durchbruchrinne sowie deren Auswirkungen auf den Lagerperimeter (vgl. Kapitel 4.1.2). Die Berücksichtigung des Sissletales als Haupttal ergibt in dieser Hinsicht eine konservativere LEB welche rund 100 m tiefer liegt. Diese wurde von der Nagra in NTB 14-02/III (S.68) als "Szenario 3b - total 175 m Eintiefung (pessimistisch Jura Ost)" für die Betrachtungen bez. Erosionsszenarien beim Standortgebiet Jura Ost berücksichtigt.

Das DHM "Basis Quartär" wurde von der Nagra auch hinsichtlich der Verbreitung von **übertiefen Talabschnitten** ausgewertet. Dies erfolgte mit zwei verschiedenen Ansät-

zen (Auffüllung von abflusslosen Senken bzw. Gebiete unterhalb der LEB), welche weitgehend vergleichbare Resultate lieferten. Damit konnte der grösste Teil der durch glaziale Tiefenerosion entstandenen Rinnen erkannt und visualisiert werden. Dies dient insbesondere der Frage, welche maximale Tiefe solche glazialen Übertiefungen aufweisen können.



Figur 1 Übertiefte Täler: Rinnen unterhalb der tiefsten fluvialen Erosionsbasis, mit zusätzlicher Angabe von bekannten glazialen Beckenfüllungen, welche anhand der ausgeführten GIS-Analyse der Nagra nicht dargestellt werden (Beilage 21 aus NAB 14-02, verkleinert und mit den im Text erwähnten Angaben ergänzt)

Nicht beantwortet werden kann mit diesen beiden Ansätzen die Frage nach der gesamten Verbreitung von glazial entstandenen Rinnen. So fehlen auf den Beilagen 20 und 21 (NAB 14-02) u.a. die Binningen-Rinne bei Thayngen, die Verbindung der Stammheimer Rinne mit dem Thurtal, die Wynatal-Rinne, und das Becken im Wehntal ist nur angedeutet (vgl. Figur 1). Dies beruht v.a. darauf, dass die Nagra nur Täler als übertieft betrachtet, welche mind. 20 m unter der LEB liegen (vgl. Figur 1). Die Kenntnis dieser Vorkommen ist u.U. jedoch wichtig hinsichtlich der Frage, wo eine allfällige zukünftige glaziale Tiefenerosion stattfinden könnte (Kapitel 4.1.4 des vorliegenden Berichts: Orientierung zukünftiger glazialer Tiefenerosion an bestehenden Rinnen). Bei der Optimierung des Lagerperimeters im Standortgebiet Zürich Nordost fällt in diesem Sinn auf, dass nicht alle von der Nagra als übertieft erkannten Talabschnitte (Figur 1) auch als übertiefte Felsrinnen eingeflossen sind (z.B. die Rudolfin-gen-Rinne, vgl. Kapitel 4.1.4, Figur 3).

Eventuell könnte eine geeignete Kombination mit der Karte der Quartärmächtigkeiten (NAB 14-02, Beilagen 3 oder 4) diesen Aspekt abdecken. Es handelt sich dabei jedoch in erster Linie um eine Darstellungsfrage; Kenntnisse über die Verbreitung von eiszeitlichen Beckenfüllungen in der Nordschweiz liegen vor und wurden von der Nagra für die einzelnen Standortgebiete stufengerecht berücksichtigt.

### **Wellenberg**

Das in NAB 13-71 dokumentierte Vorgehen für die Erstellung des **DHM "Basis Quar-tär"** ist aus unserer Sicht sinnvoll gewählt und nachvollziehbar erläutert. Eine Ermittlung der **lokalen Erosionsbasis** im Sinn der tiefsten pleistozänen Flussrinnen war jedoch nicht möglich, weil die Felsoberfläche im Engelbergertal gegenüber der Schwelle bei Luzern als Ganzes übertieft ist. Als Basis für Erosionsszenarien wurde deshalb das rezente Niveau des Engelbergertales verwendet, was unseres Erachtens richtig ist.

## **4.1.2 Erosion und Landschaftsentwicklung**

### ***Darstellung der Nagra***

#### **Nordschweiz**

Für SGT Etappe 2 sind die Aspekte von **Erosion und Landschaftsentwicklung** in den Berichten NAB 12-20, NAB 14-25 sowie NTB 14-02 behandelt worden, wobei NAB 12-20 die vergangene Landschaftsentwicklung beinhaltet und sich NAB 14-25 darauf aufbauend mit der zukünftigen Entwicklung beschäftigt. In NTB 14-02 erfolgt die zusammenfassende Wertung unter zusätzlicher Berücksichtigung der Hebung als endogenem Prozess. Als für die entsprechenden Betrachtungen massgebende Begriffe werden die "lokale Erosionsbasis" (vgl. oben), die "lokale Topographie" und die "glaziale Tiefenerosion" eingeführt. Letzteres Thema wird im vorliegenden Expertenbericht separat behandelt (vgl. Kapitel 4.1.4).

Basierend auf früheren Nagra-Berichten zur vergangenen Landschaftsentwicklung (erstellt für den Entsorgungsnachweis bzw. SGT Etappe 1), neuen wissenschaftlichen Ergebnissen sowie eigenen Forschungen der Nagra wird in NAB 12-20 der Stand des Wissens über die Landschaftsentwicklung der Nordschweiz während der letzten ca. 10 Millionen Jahre beschrieben und diskutiert.

NAB 12-20 besteht aus zwei Teilen. Teil A beinhaltet eine umfassende Literaturstudie, welche das aktuelle Wissen über die Gewässernetz- und Landschaftsentwicklung in chronologischer Reihenfolge zusammenfasst. Dabei werden die wichtigsten noch vorhandenen Ablagerungen beschrieben und ihre Altersstellung sowie Genese diskutiert. Ein besonderes Gewicht wird auf die wichtigsten Reorganisationen der Flusssysteme und deren Auslöseprozesse gelegt, wobei unterschiedliche Interpretationen aufgezeigt und diskutiert werden. Daraus ergeben sich schliesslich die von der Nagra als massgebend betrachteten Interpretationen. Teil B des Berichts NAB 12-20 beinhaltet die Visualisierung und zusammenfassende Darstellung dieser Interpretationen anhand von Karten und Profilschnitten mit vereinheitlichter Darstellung. Sie dienen einem raschen Überblick über die Änderungen bzw. wichtigen Zustände des Gewässernetzes und stellen in diesem Sinn eine Grundlage für die Ableitung der Szenarien für die zukünftige Entwicklung im NAB 14-25 dar.

NAB 14-25 beinhaltet eine zusammenfassende Wertung der **Landschaftsentwicklung der vergangenen 5-10 Millionen Jahre** mit einer Identifikation der wahrscheinlich für die zukünftige Entwicklung relevanten Prozesse und Randbedingungen. Im Weiteren werden verschiedene Szenarien der zukünftigen Entwicklung des Klimas zitiert und diskutiert. Ein grosser Unsicherheitsfaktor liegt in den anthropogen erhöhten CO<sub>2</sub>-Emissionen (NAB 14-25, Kapitel 3.4). Während diese für die nächsten 100'000 Jahre u.U. eine neue Vergletscherung verhindern könnten, zeigen verschiedene Modelle für den Zeitraum nach 500'000 Jahren keinen Einfluss mehr auf die Schwankungen der globalen Eismassen, welche sich durch die Schwankungen der Sonneneinstrahlung (orbital forcing) ergeben dürften. Um diese Ungewissheiten zu berücksichtigen geht die Nagra von einem Andauern des Eiszeitklimas (Wechsel zwischen kalten und warmen Zeitabschnitten) als wahrscheinlichstem Szenario aus, wenngleich Zeitpunkt, Dauer, Intensität und Häufigkeit von zukünftigen Vergletscherungen nicht genauer bestimmt werden können (NAB 14-25, Kapitel 3.4). Ergänzend werden aber auch alternative extreme Klimaverhältnisse besprochen. Der Annahme eines andauernden Eiszeitklimas wird von der Nagra mit einer Bestandesaufnahme und Analyse der quartären Ablagerungen und den daraus zu interpretierenden Vorgängen und Prozessen Rechnung getragen. Ebenso werden die heutigen Verhältnisse im Entwässerungsnetz betrachtet und im Hinblick auf zukünftige Entwicklungen analysiert.

Als wichtiger Einflussfaktor auf das **Mass und die Raten von Erosionsvorgängen** wird die tektonische und/oder isostatische Hebung anhand von thermochronologischen Methoden und rezenten Vertikalbewegungen abgeschätzt (NTB 14-02/III, Kapitel 4.4.2.2). Wegen der wahrscheinlichen zeitlichen Variabilität der Hebung, möglichen

Wechselwirkungen zwischen ihr und den exogenen Prozessen sowie der oft unklaren Abgrenzung wird jedoch nicht die Hebung selbst, sondern die relative Absenkung des Gewässernetzes (bzw. der lokalen Erosionsbasis) als Mass für die vergangene bzw. zukünftige Erosion betrachtet (NAB 14-02, Kapitel 2.1).

Als wichtige Grundlage für die Ermittlung der vergangenen Erosion (Absenkung der Flussniveaus) wurde anhand einer detaillierten Auswertung von Informationen zu Basis und Top der Deckenschotter-Ablagerungen eine GIS-Datei Basis Deckenschotter erstellt und grob genetisch interpretiert (NAB 12-35). Sie dient im Verbund mit den vorhandenen Angaben zum Alter der Deckenschotter der Abschätzung der langfristigen Erosionsraten. Für den Betrachtungszeitraum von 1 Million Jahren werden von der Nagra anhand der ermittelten vergangenen Eintiefungsbeträge Erosionsszenarien aufgestellt, wobei für die HAA-Standorte von einer Eintiefung um 125 m als Basisfall ausgegangen wird. Zusätzlich werden ein optimistisches (75 m) und ein pessimistisches Szenario (200 m, bzw. 175 m für Standortgebiet Jura Ost) betrachtet (NTB 14-02/III, Kapitel 4.4.2.4).

Die beiden von der Nagra als massgebend für eine relativ rasche Absenkung der lokalen Erosionsbasis erkannten Prozesse sind **grossräumige Veränderungen im Flusssystem** (Anbindung an ein Flusssystem mit kürzerem Weg zum Meer) und die **Entstehung von neuen Durchbruchsrinnen**.

Abschliessend kommt die Nagra zum Schluss, dass es punkto zukünftiger Entwicklung der lokalen Erosionsbasis nicht zu erwarten ist, dass im Betrachtungszeitraum von 1 Million Jahren die geologischen Standortgebiete der Nordschweiz vom Aare-Rhein-System an ein anderes Flusssystem mit tieferer Erosionsbasis angebinden werden. Dementsprechend wird nicht mit einer damit verbundenen raschen Einschneidung der Flüsse gerechnet (NTB 14-02/III, Kapitel 4.4.2.3).

Im Hinblick auf die zukünftige **Entwicklung der lokalen Topographie** wird von einer flächenhaften Denudationsrate von ca. 0.1 mm/Jahr ausgegangen, wobei die lokalen Verhältnisse u.a. von der Lithologie des Untergrunds und dem lokalem Relief abhängen (NTB 14-02/III, Kapitel 4.4.3.1). Als massgebend für die sicherheitstechnische Analyse wird die Entstehung von neuen Durchbruchsrinnen betrachtet, welche in erster Linie im Zusammenhang mit Vergletscherungen zu raschen Veränderungen des lokalen Entwässerungsnetzes und somit der lokalen Topographie führen können (NTB 14-02/III, Kapitel 4.4.3.2).

## **Wellenberg**

Im Vergleich zur Nordschweiz liegen für den Bereich des Standortgebietes Wellenberg relativ wenig detaillierte Informationen zur langfristigen vergangenen Landschaftsentwicklung vor (NAB 13-71). Quartäre Ablagerungen, die älter sind als die letzte Vergletscherung, konnten bisher nicht festgestellt werden. Anhand von Karstniveaus und Höhlensedimenten lassen sich allerdings Schlüsse auf die **Absenkungsgeschichte des lokalen Vorflutniveaus** ziehen. So konnten von insgesamt 5 untersuch-

ten Karstniveaus anhand von Datierungen an Stalagmiten das zweitunterste auf 200'000 Jahre (1'650 m ü.M.) und das unterste auf rund 100'000 Jahre (1'350 m über dem rezenten Vorflutniveau) datiert werden (NAB 13-71, Kapitel 3.7).

Die **Felsoberfläche** wird laut Nagra wegen der ausgeprägten U-Form als glazialen Ursprungs interpretiert, wobei die damit verbundene Übertiefung im Bereich Wellenberg mit ca. 60 m als relativ wenig ausgeprägt zu bezeichnen sei, liegt die Felsoberfläche im Gebiet von Stans doch schon auf Meeresniveau (NAB 13-71, Kapitel 4). Die spät- bis postglaziale Geschichte des Engelbergtals ist geprägt durch die Auffüllung der Übertiefung mit Beckensedimenten (lakustrische, fluviatile und gravitative Sedimente), die Aktivität der lokalen Bäche sowie durch Hangbewegungen. Letztere spielen eine relativ grosse Rolle, indem sie teilweise äusserst tiefgründig sind (Rutschung von Altzellen) und deshalb zusammen mit der glazialen Erosion hinsichtlich der Absenkung der Felsoberfläche als wichtige Prozesse erkannt wurden (NAB 13-71, Kapitel 7.2).

Als Grundlage für die Abschätzung der **zukünftigen Landschaftsentwicklung** wurden detaillierte Bestandesaufnahmen und Hangneigungsanalysen ausgeführt. Diese dienen dem Prozessverständnis und somit der Lokalisierung und Dimensionierung von möglichen zukünftigen grossmassstäblichen Hangbewegungen (Bergsturz, Rutschung). Gemeinsam mit der in Zusammenhang mit einer zukünftigen Vergletscherung zu erwartenden Glazialerosion stellen diese Hangbewegungen die hauptsächlichen Prozesse der Absenkung der Felsoberfläche dar (NAB 13-71, Kapitel 7.3).

Anhand von rezenten Hebungsdaten und Annahmen zum zukünftigen Ausgleich des Flussprofils geht die Nagra für das Gebiet Wellenberg von einer **Absenkung der lokalen Erosionsbasis** um 125 m aus. Die bereits für frühere Untersuchungsphasen ausgearbeiteten Erosionsszenarien wurden überprüft und mit zusätzlichen pessimistischen Fallbetrachtungen ergänzt. Die früher angenommene maximale glaziale Eintiefung um 50 m wurde mit Szenarien von 100 m bzw. 200 m Eintiefung ergänzt (NAB 13-71, Kapitel 8.2).

## ***Stellungnahme der Experten***

### **Nordschweiz**

Die von der Nagra erarbeiteten Szenarien für die **zukünftige Entwicklung von Erosion und Landschaft** beruhen auf einer Analyse der vergangenen Verhältnisse und sind plausibel. Der Betrachtungszeitraum für die erdgeschichtliche Zusammenfassung ist sinnvoll gewählt. Er umfasst im Wesentlichen den Zeitraum zwischen der Hauptphase der Alpenbildung (Obere Süsswassermolasse) und heute. Ausgangsbasis ist eine Beschreibung des herrschenden Zustandes zur Zeit der Oberen Süsswassermolasse, bevor sich im Molassebecken der Wechsel von einem dominant sedimentationsgeprägten zu einem erosionsdominierten Umfeld einstellte. Die massgebende Literatur wurde von der Nagra ausgewertet und mit gezielten, weitergehenden Untersuchun-

gen ergänzt. Betrachtungen zur zukünftigen klimatischen Entwicklung haben angesichts des Betrachtungszeitraumes von 100'000 (SMA-Lager) bzw. 1'000'000 Jahren (HAA-Lager) dazu geführt, dass sich das Quartär als wichtigste Grundlage für die Abschätzung der zukünftigen Entwicklung ergab. Dementsprechend wurde bei der Gewinnung und Bereitstellung von neuen Kenntnissen bzw. Unterlagen auf diesen Zeitabschnitt fokussiert.

Die **hauptsächlichen Entwicklungsschritte der nordschweizerischen Landschaft** sind nachvollziehbar herausgearbeitet und illustriert. Unklar ist aus unserer Sicht einzig der Zeitpunkt des Anschlusses des Bodensee-Rheingletschergebiets an die westwärts gerichtete Entwässerung. Dies liegt hauptsächlich an der Diskrepanz, dass im Wesentlichen eiszeitliche Dokumente für eine Analyse der Entwässerungsverhältnisse vorliegen, als Bezugspunkt für die Landschaftsentwicklung von der Nagra aber die warmzeitlichen Verhältnisse verwendet werden, über welche praktisch keine Informationen (sprich Sedimente) vorliegen. So wird von der Nagra für die Zeit der Tieferen Deckenschotter des Rheingletschergebiets zwar die Existenz einer westwärtigen eiszeitlichen Entwässerung festgestellt, die warmzeitliche Anbindung an das Oberrheinsystem allerdings erst für das Mittelpleistozän angenommen. Hier fehlt seitens der Nagra eine prinzipielle Diskussion, welcher Zustand für die Landschaftsentwicklung als massgebend betrachtet werden soll. U.E. nach sollte auf die eiszeitlichen Verhältnisse Bezug genommen werden, weil nur dafür Zeugen (Sedimente) vorliegen. Hinsichtlich des Standortvergleichs hat dies zwar keine Konsequenzen, sollte aber für Etappe 3 SGT berücksichtigt werden.

Die u.a. zur Abschätzung Absenkungsbeträge der LEB während des Quartärs erstellte **GIS-Datei "Basis Deckenschotter"** stellt die Kenntnisse über Lage und Höhe von frühpleistozänen fluviatilen Rinnen in plausibler und nachvollziehbarer Weise dar. Die darauf aufbauenden Interpretationen sind zwar relativ grob, aber der Fragestellung in dieser Phase angemessen.

Wie eingangs des vorliegenden Expertenberichts erwähnt (Kapitel 4), wurde der Grundlagen-Aspekt der **zukünftigen Entwicklung des Klimas** von uns nicht im Detail geprüft. Anhand der von der Nagra zitierten und diskutierten Literatur ist es jedoch plausibel, auch für die kommenden 1 Million Jahre von einem eiszeitlichen Klima, also von weiteren Vergletscherungen auszugehen.

Die konsequent prozessorientierte Betrachtungsweise der Nagra hat zu klaren und nachvollziehbar beschriebenen Vorstellungen der **zukünftigen Entwicklung von Erosion und Landschaftsgeschichte** geführt. Die tektonische/isostatische Hebung, die regionalen Flussumlegungen sowie die Bildung von neuen Durchbruchsrinnen wurden als die für die Entwicklung der lokalen Erosionsbasis und Topographie massgebenden Prozesse erkannt und ihre potenziellen Auswirkungen auf die Langzeitstabilität analysiert. Die angegebenen Quantifizierungen sind nachvollziehbar und plausibel. Bezüglich der Langzeitentwicklung der lokalen Topographie ist zu bemerken, dass

den **Verkarstungsprozessen** als landschaftsformenden Vorgang bisher praktisch keine Aufmerksamkeit geschenkt wurde (z.B. im Zusammenhang mit flächenhafter Denudation). Im Hinblick auf den Abtrag der Malmkalke könnte sich dies als wichtiger Aspekt erweisen.

Bezüglich des Entstehungsprozesses von **neuen Durchbruchsrinnen** bestehen noch gewisse Unklarheiten. Während mit der Formulierung in NTB 14-01 (S.169) grundsätzlich auch eine Entstehung durch Rückwärtserosion eines bestehenden Tales denkbar wäre, wird im gleichen Bericht auf S.170 (Fussnote 116) betont, dass für die Bildung einer Durchbruchsrinne eine starke Vorlandvergletscherung Bedingung ist. Dieses Prozessverständnis sollte im Rahmen der Untersuchungen für Etappe 3 weiterentwickelt werden.

## Wellenberg

Im Vergleich zur Nordschweiz liegen für den Bereich des Standortgebietes Wellenberg relativ wenig detaillierte Informationen zur **quartären Landschaftsentwicklung** vor. Es sind lediglich Ablagerungen vorhanden, welche der letzten Eiszeit zugeschrieben werden können. Dies ist hinsichtlich der Abschätzung der zukünftigen Landschaftsentwicklung an sich von Bedeutung, muss demnach doch für eine zukünftige Eiszeit von einer praktisch vollständigen Ausräumung des Lockermaterials (inklusive einer teilweisen Ausräumung der grossen Hangbewegungsmassen) ausgegangen werden.

Die von der Nagra anhand bereits früher ausgearbeiteten **Erosionsszenarien** (NTB 93-34) abgeschätzten und mit den neu erarbeiteten Grundlagen überprüften Annahmen für die zukünftige Entwicklung der Felsoberfläche sind plausibel. Die Annahmen für die Absenkung der Talachse durch glaziale Tiefenerosion, sowie die damit verbundene und durch Hangbewegungen akzentuierte Verbreiterung des Talquerschnitts sind nachvollziehbar und angemessen. Die Entstehung von Transfluenzen und später eventuell neuen Rinnen für den Betrachtungszeitraum bewerten wir in Übereinstimmung mit der Nagra als nicht wahrscheinlich.

Die in NAB 13-71 gegenüber früheren Berichten der Nagra (NTB 93-34) neu betrachteten **Szenarien von 100 m bzw. 200 m glazialer Tiefenerosion** im Engelbergertal werden nicht begründet. Wir verstehen dies als eine angemessene Sensitivitätsanalyse, denn mangels Sedimenten älterer Eiszeiten im Untersuchungsgebiet liegen keine Indizien für das Mass der glazialen Eintiefung während eines Gletschervorstosses im Engelbergertal vor.



### 4.1.3 Neotektonik

Unter Neotektonik werden von der Nagra im Wesentlichen Krustenbewegungen zusammengefasst, welche seit dem Abschluss der Hauptphasen der Entstehung des Jura-Gebirges stattgefunden haben (NTB 14-02/III, Seite 13). Die Untersuchung der neotektonischen Vorgänge durch die Nagra beinhaltet eine detaillierte tektonische Analyse des Untersuchungsgebietes und eine Wertung des Potenzials der festgestellten Strukturen für zukünftige differenzielle Krustenbewegungen. Ebenfalls in diesem Zusammenhang steht die tektonische und/oder isostatische regionale Hebung. Hinsichtlich der Abklärung von vergangenen neotektonischen Vorgängen spielen gezielte Untersuchungen von (v.a. quartären) Ablagerungen eine entscheidende Rolle. Inhalt dieses Kapitels des vorliegenden Expertenberichts sind die entsprechenden von der Nagra durchgeführten Abklärungen in der Nordschweiz. Die tektonischen Strukturanalysen sowie die Untersuchungen der Nagra zu rezenten Krustenbewegungen für die Nordschweiz sowie für das Standortgebiet Wellenberg werden von uns nicht behandelt.

#### ***Darstellung der Nagra***

Hinweise auf neotektonische Vorgänge, insbesondere differentielle Hebungen von pleistozänen Flussterrassen und Felsrinnen, wurden von verschiedenen Autoren mit unterschiedlicher Methodik untersucht (z.B. NTB 84-16, Kock 2008, Fraefel 2008). Dabei zeigten sich grundsätzliche Schwierigkeiten:

- Stratigrafisch unsichere Zuordnung von Terrassenflächen oder Rinnenelementen
- unbekannter lithologischer Aufbau der Sedimente unterhalb der Terrassenflächen (Erosionsterrassen / Akkumulationsterrassen / Deckschichten)
- erosive Überprägung nach der Terrassenbildung

Als Konsequenz können aus mittel- und spätpleistozänen Ablagerungen **keine hinreichend gesicherten** Erkenntnisse zu vertikalen Verstellungen seit ihrer Entstehung gewonnen werden (NTB 14-02/III, Kapitel 3.4.1). Aus Ablagerungen des Frühpleistozäns hingegen ergeben sich vage Hinweise auf neotektonische Aktivitäten. Diese basieren im Wesentlichen auf Graf (1993), der für die Höheren Deckenschotter des Mandacher Gebietes und das Vorkommen am Wildstock bei Boppelsen solche Bewegungen postulierte. Daraus wäre auf eine Hebung entlang des südlichen Blockes der Mandacher Struktur bzw. eine Hebung der Lägerstruktur zu schliessen. Angaben zum konkreten differentiellen Hebungsbetrag sind nach Ansicht der Nagra daraus nur mit grossen Unsicherheiten zu gewinnen. Auch der aus einer regionalen Kompilation erarbeitete GIS-Datensatz Basis Deckenschotter genügt ihrer Ansicht nach nicht für quantitative Angaben (NAB 12-35, S. 44).

### ***Stellungnahme der Experten***

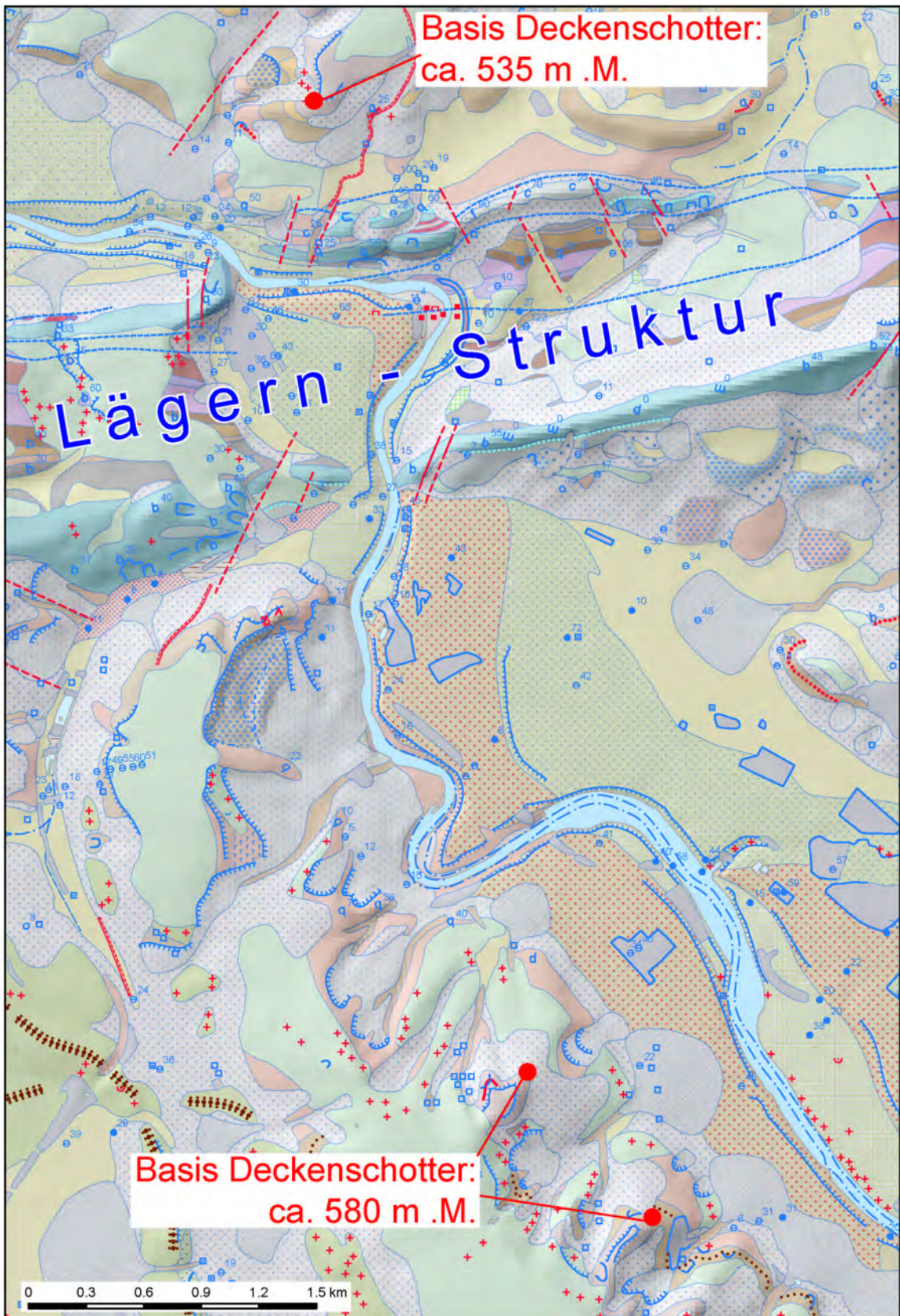
Eine Ausprägung von morphologischen Merkmalen durch neotektonische Vorgänge – v.a. vertikale Verstellungen – benötigt einen ausreichend langen Zeitraum, um sich überhaupt manifestieren zu können, bzw. um anhand der möglichen Genauigkeit der Festlegung von Bezugsflächen signifikant zu sein. Unter der Annahme von differenziellen Hebungen in der Größenordnung von 0.1 mm/Jahr wären für die spät-letzzeitlichen Terrassen maximale Verstellungen von 1.7 m zu erwarten, was angesichts der Ungewissheiten bei der Bestimmung von Terrassenflächenhöhen (vgl. oben) sicher nicht signifikant ist.

Es ist aus diesem Grund kaum anzunehmen, dass anhand von geomorphologischen Kriterien tektonische Verstellungen aus dem Zeitraum der Entstehung von Hoch- und Niederterrasse (Mittel- bis Spätpleistozän) erkennbar sind. Erst Verstellungen von Ablagerungen des Früh-Pleistozäns (und älter) haben aufgrund dieser Argumentation das Potenzial, eine signifikante Bewegung dokumentieren zu können. Zusätzlich zu den oben erwähnten Ablagerungen weisen weitere Deckenschottervorkommen diesbezüglich ein gewisses Potenzial auf:

*Höhere Deckenschotter des Heitersbergs:* Anhand von Graf et al. (2006) ist erkennbar, dass die Basis der Höheren Deckenschotter im Bereich Chrüzliberg bzw. Hinterhau auf einer Höhe von ca. 580 m ü.M. liegt, während ihre Äquivalente nördlich der Lägerstruktur im Gebiet des Dürn auf rund 535 m ü.M. der Molasse auflagern (Figur 2: Höhendifferenz ca. 45 m, Distanz ca. 6 km). Analog zum Vorkommen am Wildstock bei Boppelsen (Graf 1993) kann dies als Hinweis auf eine quartäre Hebung der Läger-Struktur aufgefasst werden.

*Tiefere Deckenschotter im Rheingletschergebiet:* Von Graf (2009b) wurden die markanten Unterschiede in der Höhenlage der einzelnen Vorkommen von Tieferen Deckenschottern im Gebiet von Unter- und Überlingersee (D) diskutiert. Diese könnten sich durch Verstellung entlang der zwischen den fraglichen Vorkommen verlaufenden Mindelsee-Verwerfung erklären lassen.

Aus heutiger Sicht sind allerdings anhand der vorhandenen Datengrundlagen keine sicheren Aussagen möglich - auch nicht für die in Graf (1993) angegebenen Vorkommen. Die Hinweise basieren auf Daten zur Felsmorphologie bzw. Auflagerungshöhe der jeweiligen Vorkommen sowie petrografischen Daten. Für belastbare Aussagen wären zuverlässige Altersdatierungen notwendig. Allerdings ist hinsichtlich des Umgangs mit Unsicherheiten hier anzufügen, dass die möglicherweise betroffenen tektonischen Strukturen (vgl. oben) bestens bekannt sind und bei der Abgrenzung der Lagerperimeter von der Nagra berücksichtigt wurden ("regionale Störungszonen" bzw. "Zu meidende tektonische Strukturen", z.B. NTB 14-01, Anhang B).



Figur 2 Ausschnitt aus Blatt 1070 Baden des geologischen Atlas der Schweiz 1:25'000 (Geocover), mit Angaben zur Höhenlage von aufgeschlossenen Kontakten zwischen Höheren Deckenschottern und Fels.

#### 4.1.4 Glaziale Tiefenerosion

##### *Darstellung der Nagra*

Die **glaziale Tiefenerosion** ist ein Prozess, welcher markant unter die lokale Erosionsbasis greifen kann. Anhand von Auswertungen des DHM "Basis Quartär" sind so entstandene übertiefte Talabschnitte erkennbar (NAB 14-02, Kapitel 6.6). Schon im Rahmen von Entsorgungsnachweis und SGT Etappe 1 wurde die glaziale Tiefenerosion als der punkto Freilegung eines geologischen Tiefenlagers kritischste Prozess erkannt und die Kenntnis darüber sukzessive ausgebaut. Im Rahmen der Arbeiten für SGT Etappe 2 wurden von der Nagra neben "klassischen" Forschungsarbeiten (NAB 09-06, NAB 09-23, NAB 10-18, NAB 10-33) auch zwei internationale Workshops mit Fachleuten durchgeführt (NAB 10-34, NAB 12-48). Diese Arbeiten beleuchten v.a. folgende Aspekte:

- Erosionsvorgänge, welche zu glazialer Tiefenerosion führen
- Kenntnisse über die Entstehung von übertieften Tälern (Tunnel-Valleys)
- Verhalten von Gletschern unter dem Einfluss von wechselnden klimatischen Verhältnissen während Eiszeiten
- Modellierung des Verhaltens von Gletschern und von subglazialer Erosion

Grundsätzlich kann **glaziale Erosion** durch direkte Eiswirkung (Abrasion, Detraktion), durch Wirkung der Schmelzwässer (Korrasion, Kavitation) sowie durch chemische Erosion erfolgen (NAB 09-06, NAB 14-25: Kapitel 7.1.1). Es ist wahrscheinlich, dass die bekannten Übertiefungen in der Nordschweiz vor allem durch subglaziale Schmelzwässer und Sediment-Evakuierung entstanden. Sie fand bevorzugt in leicht erodierbarem Untergrund statt (Molasse, ältere eiszeitliche Lockergesteine), aber Übertiefungen sind auch in härterem Untergrund bekannt (z.B. im unteren Reuss-/Aaretal: mesozoische Schichten des Falten- und Tafeljuras). Die klimatischen Verhältnisse beeinflussen die Aktivität von subglazialer Erosion stark (NAB 10-18). So ist davon auszugehen, dass sie vor allem während gemässigt kalten Phasen einer Eiszeit von Bedeutung ist, wenn im Eis temperierte bzw. polythermale Bedingungen herrschen (NAB 14-25: Kapitel 7.1.1). In vollariden, kalten Hochphasen einer Eiszeit sind die Gletscher grossenteils an den Untergrund angefroren und die Schmelzwasseraktivität minimal.

Auf Grund der heutigen Verbreitung von **glazialen Übertiefungen** stellt die Nagra einen möglichen Zusammenhang mit der Verteilung der relativ leicht erodierbaren Untergrundgesteine, resp. mit dem schichtlagerungsbedingten Ansteigen der relativ harten mesozoischen Kalke gegen N bzw. NW zur Diskussion (NTB 14-02/III, Kapitel 4.4.4). Weiter könnte dies auch ein Effekt der lithologisch-topografischen Schwelle im Bereich der Malmkalkausbisse sein (Hochgebiet des Tafeljuras). Auch ein Zusammenhang mit der Verkarstung der Malmkalke könnte eine Rolle spielen, ebenso die Vorherrschaft von kalt-ariden Bedingungen zur Zeit der maximalen Eisausdehnung (NTB 14-02/III, Kapitel 4.4.4). Das heisst, die maximale Übertiefung läge u.U. deutlich intern

bezüglich der maximalen Eisausdehnung der jeweiligen Vergletscherung.

Zwar ist gemäss Nagra eine Tendenz festzustellen, dass sich die subglaziale Erosion an **bereits existierenden Übertiefungen orientiert**, jedoch gebe es auch Gegenbeispiele. Das sei allerdings nur dann von Bedeutung, wenn überhaupt Platz für einen alternativen Verlauf vorhanden ist, was für die Haupttäler in den Alpen und im proximalen Alpenvorland nicht gegeben ist. Erst im distaleren, geringer reliefierten Alpenvorland liegen entsprechende Freiheiten vor (realisiert im Bereich der Lagerstandorte Nördlich Lägern und Zürich Nordost, NAB 14-25: Kapitel 7.2).

Die Nagra geht bezüglich der zukünftigen Entwicklung der glazialen Tiefenerosion davon aus, dass sie sich im Wesentlichen an existierenden Übertiefungen orientieren wird (Vertiefung, Verbreiterung), dass aber die Bildung von neuen Rinnen nicht ausgeschlossen werden kann, insbesondere in Gebieten mit relativ wenig Topografie. Die heute bekannten Rinnen reichen bis zu 250 m unter die lokale Erosionsbasis; grössere Maximaltiefen können gemäss der Nagra aufgrund von vorhandenen Bohrdaten nicht ausgeschlossen werden (NAB 14-25: Kapitel 7.2).

### ***Stellungnahme der Experten***

#### **Nordschweiz**

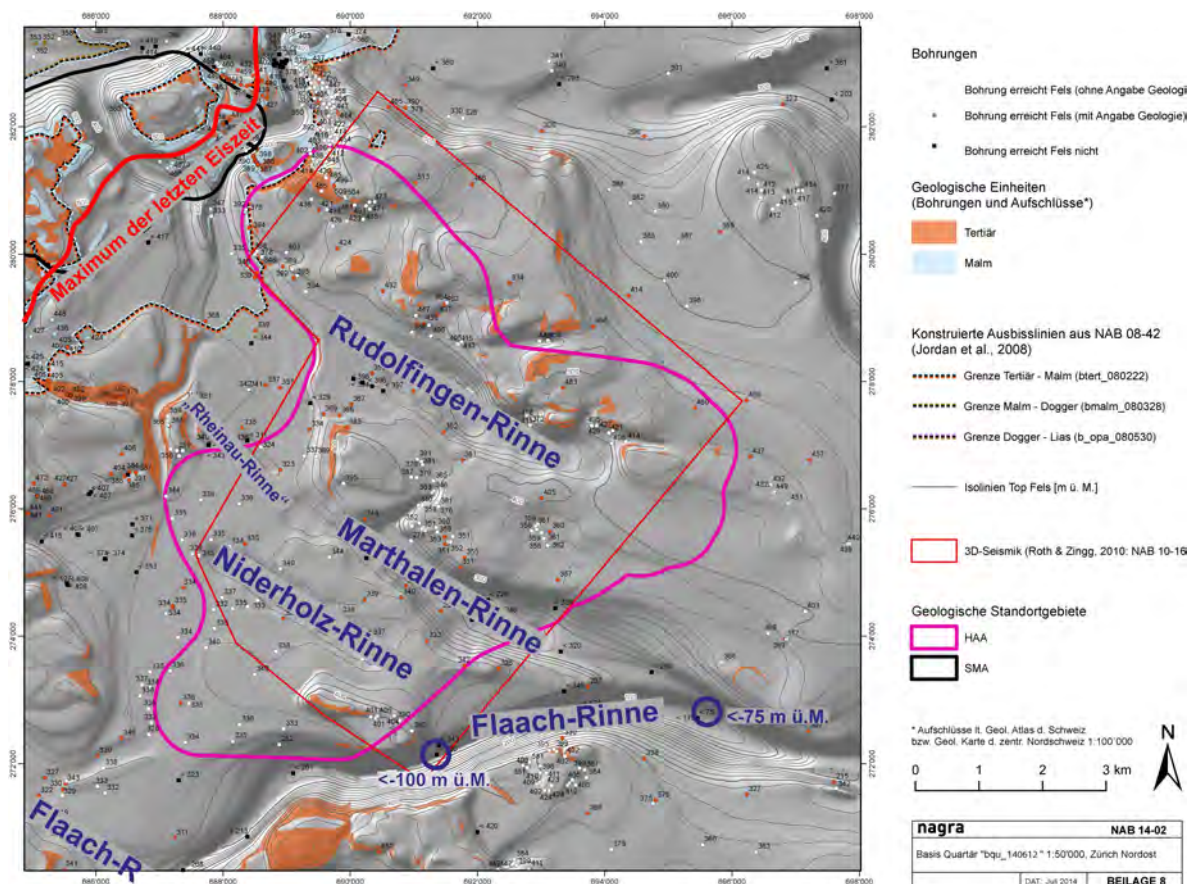
Die seit SGT Etappe 1 seitens Nagra hinzugewonnene Kenntnisse zur **glazialen Tiefenerosion** sind von grosser Bedeutung. Sie haben einerseits zu einem wesentlich verbesserten Prozessverständnis geführt und andererseits auch die Grenzen der heute möglichen Prognostizierbarkeit der Entwicklung der glazialen Tiefenerosion aufgezeigt.

Zuerst ist festzustellen, dass unsere Empfehlung (aus Dr. von Moos AG 2009), für die Abschätzung der Entwicklung der glazialen Tiefenerosion nicht nur eine Vertiefung von vorhandenen Rinnen, sondern auch deren Verbreiterung zu berücksichtigen, von der Nagra aufgenommen und umgesetzt wurde. Eine Begründung für den von der Nagra gewählten, minimalen horizontalen Abstand von 200 m zum Lagerperimeter ("Pufferzone", NTB 14-02, S.70, Fussnote 34) liegt uns zwar nicht vor, die Grössenordnung ist aber vernünftig.

Betreffend der Möglichkeit der **Entstehung von glazialen Übertiefungen auch in relativ erosionsresistenten Gesteinen** (Malmkalke etc.) wird von der Nagra richtigerweise auf die Rinne im unteren Reusstal/Aaretal (Gebenstorf–Stilli) hingewiesen. Diese ist jedoch nicht als einzigartig zu interpretieren, existiert doch wenige Kilometer weiter westlich eine analoge, allerdings kürzere Rinne im Hausertal (vgl. Figuren 1 und 5 sowie Bitterli-Dreher et al. 2007, Graf 2009). Zu berücksichtigen ist in diesem Zusammenhang aber, dass diese beiden Rinnen wahrscheinlich in tektonisch stark vorgeprägten Bereichen der Lägern-Struktur liegen (Querstörungen im Faltenjura). In die-

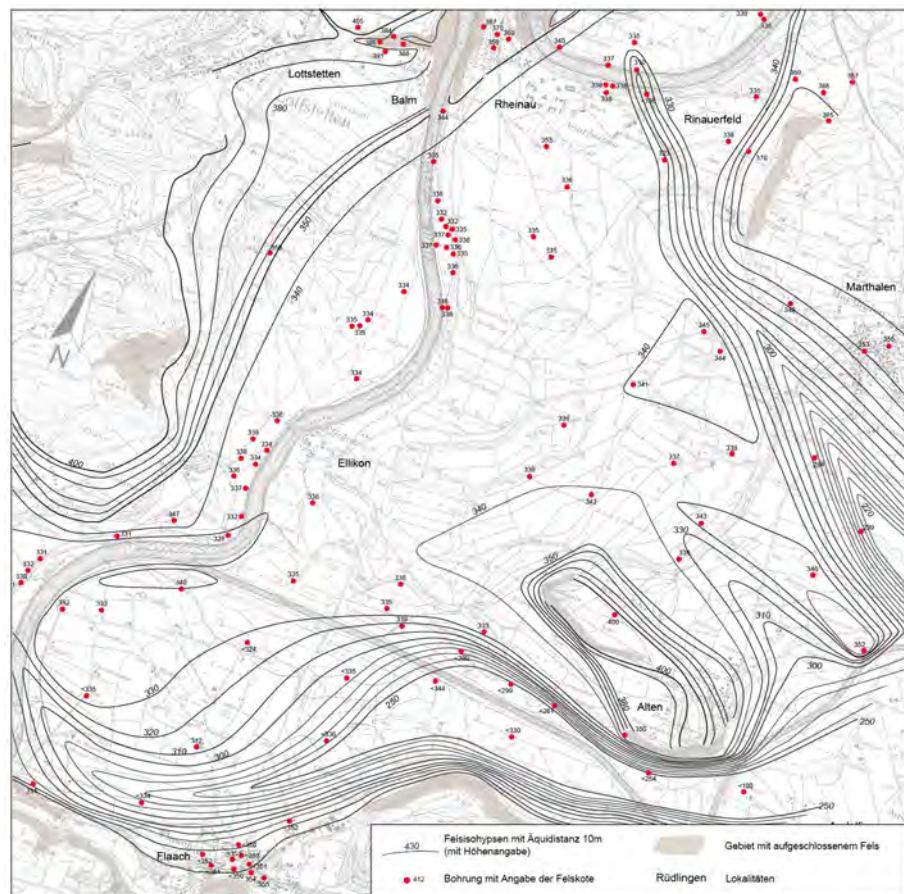
sem Zusammenhang sei darauf hingewiesen, dass es ungewiss ist, ob die Verteilung der bekannten übertieften Täler, welche zum grössten Teil innerhalb der Molasse-schichten liegen und mit dem Auftauchen der mesozoischen Schichten aussetzen, effektiv mit der schlechteren Erodierbarkeit der Malmkalke gegenüber den Molassegesteinen zusammenhängt. Immerhin reichen unseres Wissen praktisch keine der übertieften Täler bis auf das Mesozoikum hinunter (Ausnahmen sind lediglich die Rinnen von Gebenstorf–Stilli und vom Hausertal), so dass dieser Effekt in der Vergangenheit wohl noch gar nicht gewirkt haben dürfte.

Die Rekonstruktion der **Felstopografie im Standortgebiet Zürich Nordost** zeigt insgesamt vier übertiefte, unter die LEB greifende Depressionen (Figur 3). Auffällig ist die parallele, SE-NW-gerichtete Anordnung der nebeneinander liegenden Übertiefungen der Rudolfingen-, Marthalen- und Niederholz-Rinne. Auch der distalste Abschnitt der Flaach-Rinne (wenig südwestlich des Standortgebietes) weist eine entsprechende Orientierung auf. In der Hauptsache verläuft die Flaach-Rinne (von der Nagra z.T. auch als Thurtal-Rinne bezeichnet) jedoch quer zur SE-NW-Orientierung der anderen.



Figur 3 Karte der Felsoberfläche des Standortgebietes Zürich Nordost, basierend auf 3D-Seismik Zürcher Weinland (Beilage 8 aus NAB 14-02, mit Rinnenbezeichnungen, letzteiszeitlichem Maximum und Hervorhebung von Bohrangaben ergänzt)

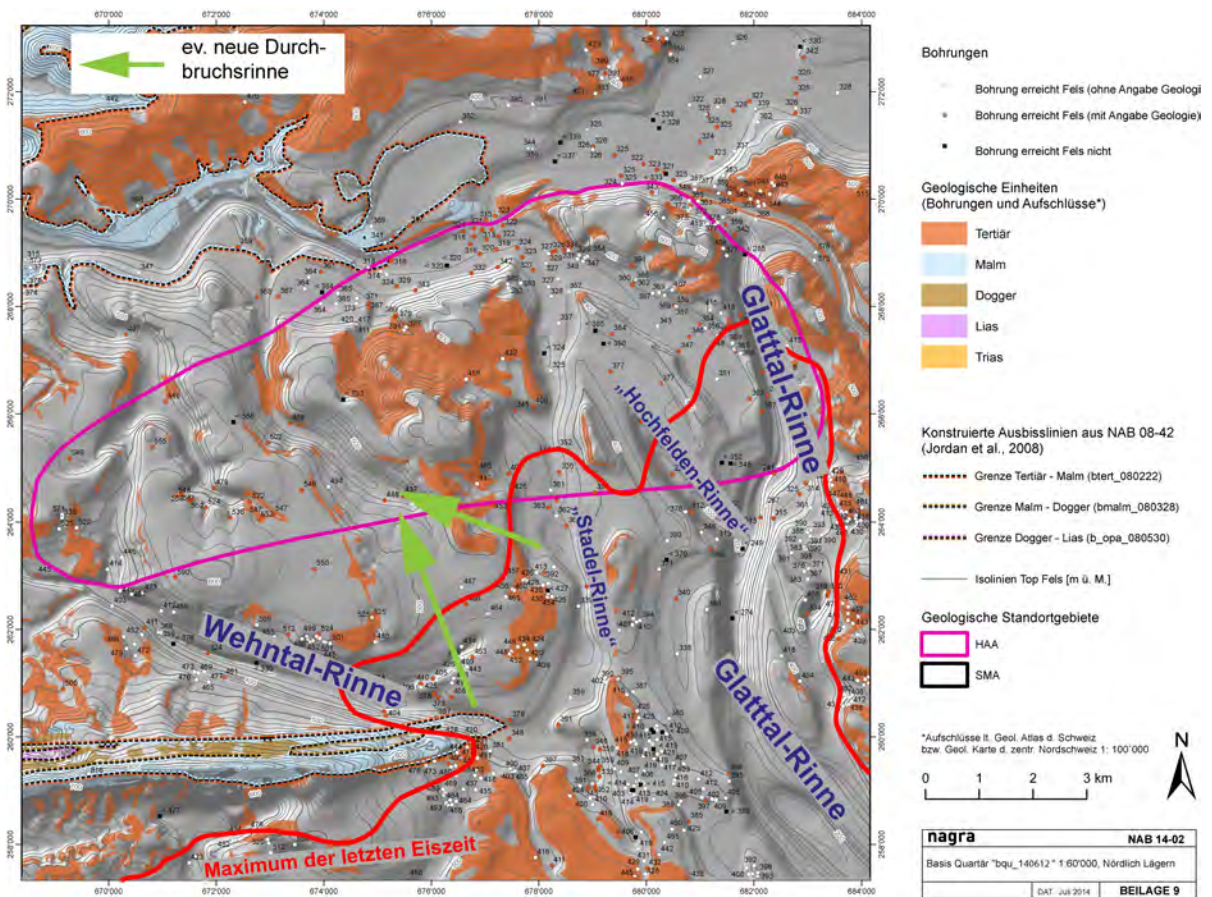
Eine genetische Deutung dieses Musters ist nicht einfach und soll hier auch nicht versucht werden. Es ergeben sich daraus aber gewisse prinzipielle Fragen. Im Hinblick auf eine zukünftige Vergletscherung des Gebietes (Annahme Eisausdehnung vergleichbar mit der letzten Eiszeit, vgl. Figur 3) und unter dem Aspekt, dass Gletscher bevorzugt den bereits existierenden Übertiefungen folgen, stehen dem Gletscher hier vier Möglichkeiten für die Reaktivierung bestehender Übertiefungen und zusätzlicher Erosion zur Verfügung. Weiter ist zu bemerken, dass zur Abgrenzung des Lagerperimeters (HAA) Zürich Nordost die Ausdehnung der Marthalen-Rinne zwar berücksichtigt wurde (inkl. Pufferzone), nicht hingegen die etwas weiter nordwestlich liegende kleine Übertiefung (vgl. Figur 3: "Rheinau-Rinne"), welche genetisch wahrscheinlich ebenfalls der Marthalen-Rinne zuzuordnen ist (vgl. Figur 4). Für die Abgrenzung des Lagerperimeters ebenfalls nicht berücksichtigt wurde die Rudolfingen-Rinne (vgl. NTB 14-01, Anhang B).



Figur 4 Felsisohypsenkarte Zürcher Weinland (Ausschnitt aus Tafel 3 aus Graf 2009a, verändert)

Für das **Standortgebiet Nördlich Lägern** (Figur 5) sind im Osten mehrere übertiefte Talabschnitte bekannt (Glatttal-Rinne und Hochfelden-Rinne). Zusätzlich sind in der Karte Basis Quartär auch südlich von Stadel kleine Felsdepressionen erkennbar, welche auf eine - zumindest teilweise - subglaziale Erosion hindeuten. Südlich des

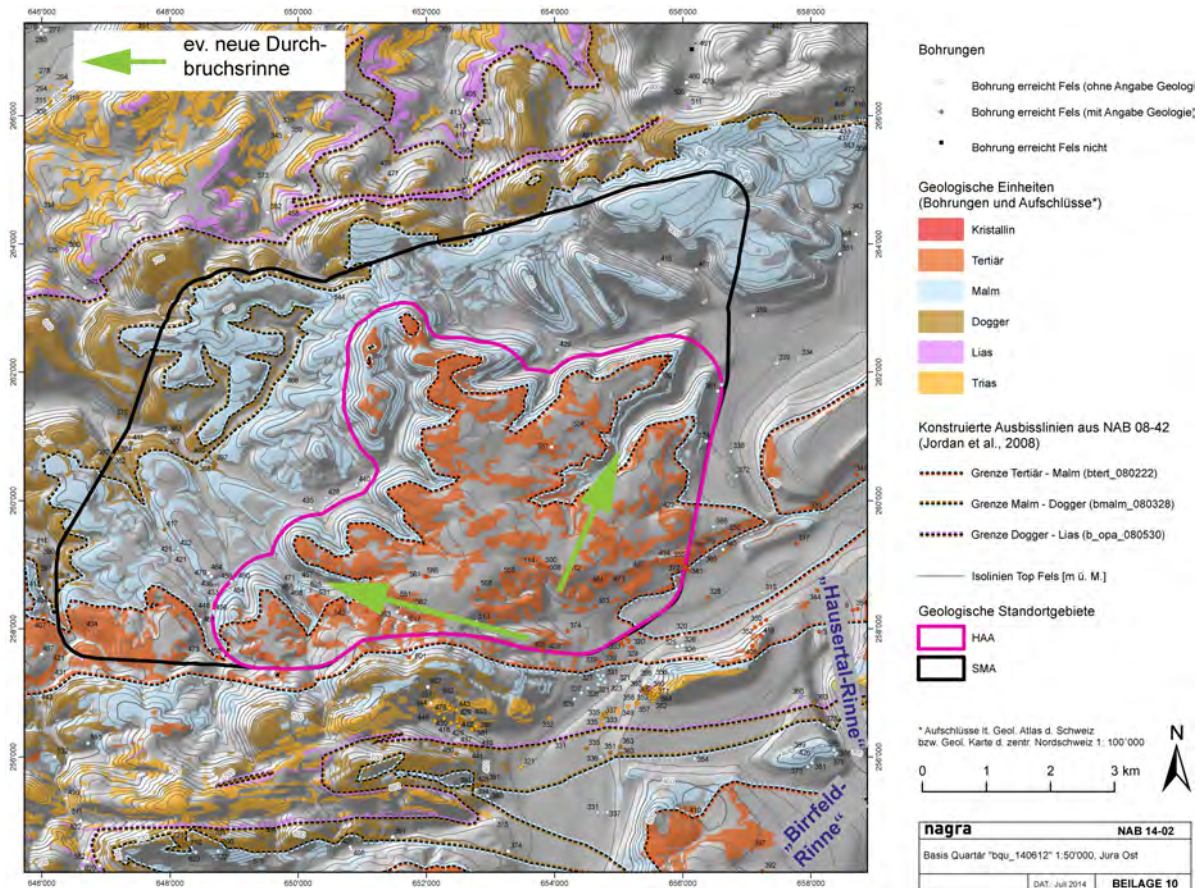
Standortgebietes erstreckt sich die Wehntalrinne. Im Osten dieses Standortgebietes zeigt sich also eine ähnliche Situation, wie im Standortgebiet Zürich Nordost. Auch hier stehen dem Gletscher während zukünftiger Eiszeiten mehrere Möglichkeiten für die Reaktivierung bestehender Übertiefungen und zusätzlicher Erosion zur Verfügung. Für eine wesentliche zusätzliche Tiefenerosion müsste die Eisausdehnung aber wohl über das letzteiszeitliche Maximum hinaus reichen. Die bestehenden Rinnen wurden von der Nagra bei der Ausscheidung des Lagerperimeters berücksichtigt (vgl. NTB 14-01, Anhang B).



Figur 5 Karte der Felsoberfläche des Standortgebietes Nördlich Lägern (Beilage 9 aus NAB 14-02, mit Rinnenbezeichnungen und letzteiszeitlichem Maximum ergänzt)

Das **Standortgebiet Jura Ost** wird von übertieften Tälern nicht tangiert (Figur 6). Südöstlich davon findet sich ein Ausläufer der Birrfeld-Rinne, die Hausertal-Rinne, welche - wie oben erwähnt - die mesozoischen Gesteine der Lägern-Struktur durchdringt. Weiter östlich (in Figur 6 nicht enthalten, vgl. aber Figur 1) verläuft die bis St. Illi reichende Rinne im Reusstal/Aaretal. Dieses Standortgebiet liegt deutlich ausserhalb des letzteiszeitlichen Maximums (südöstlich des Ausschnittes von Figur 5 verlaufend) und würde nur bei einer weit darüber hinaus reichenden Vereisung erreicht.



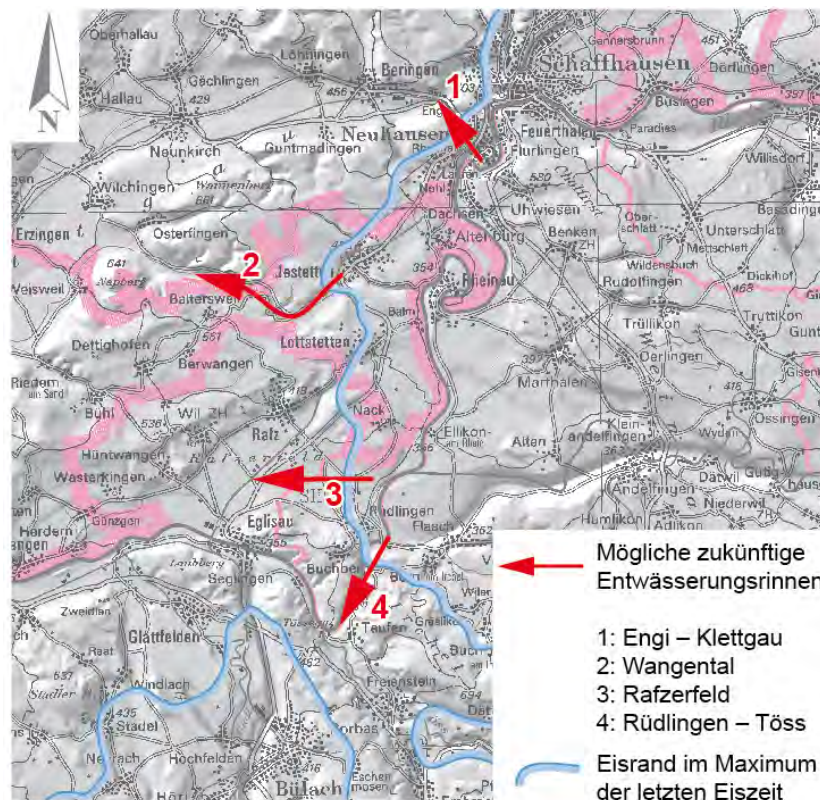


Figur 6 Karte der Felsoberfläche des Standortgebietes Jura Ost (Beilage 11 aus NAB 14-02, mit Rinnenbezeichnungen)

Anhand der Situation in den Standortgebieten Zürich Nordost und Nördlich Lägern stellen sich grundsätzliche Fragen betreffend die Faktoren und Randbedingungen, welche die Lage der hauptsächlich subglazialen Erosion steuern. Dass es ausschliesslich das weiche, leicht zu erodierende Substrat (Seeablagerungen) ist, dagegen spricht z.B. im unteren Thurtal die Existenz der Flaach-Rinne, welche von Graf (2009a) aufgrund von Überlegungen zur regionalen Landschaftsentwicklung als jünger als die Marthalen-Rinne interpretiert wurde (vgl. Figur 3). Also wurde anstatt der dort vorhandenen, mit Lockergesteinen gefüllten Übertiefungen bevorzugt die Molasse südwestlich davon ausgeräumt - dies unter der Voraussetzung der Richtigkeit der erwähnten Interpretation. Ähnliches scheint im Gebiet Nördlich Lägern der Fall gewesen zu sein, indem die Hochfelden-Rinne von der (verm.) jüngeren Glattal-Rinne gekappt wurde (Figur 5). Es scheint also, dass der Erodierbarkeitskontrast zwischen Lockergesteinen und Molasse zu gering ist, um den zukünftigen Fliessweg des subglazialen Wassers vorzubestimmen. Die Nagra hat diesen Ansatz ebenfalls verfolgt und in einer entsprechenden flächigen Betrachtung die Sensitivität der Standortgebiete bezüglich zukünftiger Erosion untersucht (vgl. NTB 14-02/III, Fig. 4.4-12). Dem-

nach würde unter Berücksichtigung der Entwicklung der lokalen Erosionsbasis (pessimistischer Fall) und einer zusätzlichen glazialen Tiefenerosion von 200 m in den Standortgebieten Zürich Nordost und Nördlich Lägern das Wirtgestein erreicht (Nördlich Lägern nur knapp). Im Fall des Standortgebietes Jura Ost würde das Wirtgestein bereits bei Berücksichtigung der Entwicklung der lokalen Erosionsbasis erreicht. Eine eventuelle zusätzlich glaziale Tiefenerosion könnte sogar den optimierten Lagerperimeter tangieren.

In diesem Zusammenhang könnte ein bisher wenig beachteter Gesichtspunkt von Bedeutung sein: Es stellt sich die Frage, inwieweit der Abflussweg der glazifluvialen Entwässerung des Gletschervorfeldes die Lage von Gletschertoren und damit evtl. die hauptsächlich subglazialen Entwässerungswege steuern könnte. Dies sei exemplarisch für das Standortgebiet Zürich Nordost erläutert (vgl. Figur 7):



Figur 7 Mögliche Entwässerungsrinnen für eine zukünftige Vergletscherung im Standortgebiet Zürich Nordost Im Zuge eines zukünftigen Vorstosses

des Rheingletschers dürfte eine vorauseilende Aufschotterung im Thur- und angrenzenden Rheintal erfolgen (Vorstoss-Schotter). Dabei dürfte die enge Rinne zwischen Rüdlingen–Töss (heutiger Rheinlauf) relativ schnell aufgeschottert werden (auch: Gleichzeitige Aufschotterung im Tösstal) und so zu einer gewissen Stausituation im Zürcher Weinland führen. Zusätzlich ist mit einem Sedimenteintrag aus dem Gebiet Schaffhausen zu rechnen (Rheintallappen des Rheingletschers). Im Westen würde diese Stausituation höhenmässig von den Wallmoränen der letzten Eiszeit und den

darin vorhandenen Durchbrüchen, sowie den mesozoischen Gesteinen des Südrandens begrenzt. Bei Erreichen der Stauhöhe dürfte sich entscheiden, welchen Weg die hauptsächliche Entwässerung des Gletschervorfeldes nimmt. Dafür stehen weiterhin die Rinne Rüdlingen-Töss, aber auch eine Reaktivierung der Rafzerfeldrinne, des Wangentals bei Jestetten oder gar der Engi bei Neuhausen zur Verfügung. Je nach dem, welcher Verlauf sich schliesslich stabilisiert, stellt sich die oben formulierte Frage, ob dies Auswirkungen auf die subglaziale Entwässerung des Gletschers haben könnte.

Ob das Wirtgestein tatsächlich tangiert werden könnte, hängt wesentlich von der Erodierbarkeit der Gesteine ab. Insbesondere die Kalke des Malm könnten diesbezüglich eine Rolle spielen (gilt im Wesentlichen für die Standortgebiete Zürich Nordost und Nördlich Lägern). Deren gegenüber den Molassegesteinen angenommene reduzierte Erodierbarkeit wird von der Nagra insofern bereits berücksichtigt, als dass der mögliche Betrag der zukünftigen glazialen Tiefenerosion mit 200 m beziffert wird, obwohl grössere Talübertiefungen bekannt sind (NTB 14-02/III, Seite 78).

In diesem Zusammenhang spielen möglicherweise weitere Gesichtspunkte eine Rolle. Mit dem Erreichen der Malmkalke könnte die chemische Erosion unterhalb des Gletschereises eine grössere Bedeutung erlangen (vgl. NAB 09-06, S. 22). Es könnten sich Wechselwirkungen einstellen zwischen subglazialen Schmelzwässern mit vermuteten, möglicherweise nur teilweise durch Boluston versiegelten Karstsystemen im Malm. Es ist bisher unklar, ob ein kommunizierendes Karstsystem eine erleichterte subglaziale Entwässerung bewirkt, welche u.U. die mechanische subglaziale Erosionsleistung limitiert (Druckabbau) oder ob diese im Gegenteil sogar akzentuiert wird. Es ist ebenfalls nicht auszuschliessen, dass ein Karstsystem durch Ablagerungen von unter dem Eis durch die Karsthohlräume hindurch evakuiertem Gesteinsmaterial versiegelt wird. Umgekehrt stellt sich die Frage, ob sich durch einen Kurzschluss zwischen der subglazialen Entwässerung und dem Karstsystem des Malms in Letzterem massgebende Änderungen ergeben könnten (hydraulisch, geochemisch etc.).

Insgesamt kommen die Experten zum Schluss, dass mit der heutigen Modellvorstellung über die glaziale Tiefenerosion nicht entschieden werden kann, in welchem Bereich des Standortgebietes Zürich Nordost sich eine zukünftige glaziale Tiefenerosion fokussieren wird. Dieser Aspekt betrifft auch den östlichen Bereich des Glattales im Standortgebiet Nördlich Lägern, wo eine vergleichbare, allerdings lateral weniger ausgedehnte Situation vorliegt. Für das Standortgebiet Jura Ost ist die Situation anders, indem dieses nicht von bestehenden glazialen Rinnen erreicht wird. Glaziale Tiefenerosion dürfte hier allenfalls erst nach Entstehung einer neuen Durchbruchsrinne von Bedeutung werden (vgl. NTB 14-02/III, Fig. 4.4-12) und setzt eine wesentlich über das Maximum der letzten Eiszeit hinaus reichende Vergletscherung voraus.

## **Wellenberg**

Die glaziale Tiefenerosion ist für das Standortgebiet Wellenberg von entscheidender Bedeutung, steuert sie doch die Absenkung der Felsoberfläche nicht nur direkt durch Glazialerosion, sondern auch indirekt über die Schaffung von Möglichkeiten für eine Aktivität (Reaktivierung) von grossmasstäblichen Rutschungen. Eine Abschätzung des zukünftigen Eintiefungsbetrages ist wie in der Nordschweiz äusserst schwierig. Die betrachteten Szenarien mit Eintiefungsbeträgen von 50, 100 und 200 m sowie die sich daraus ergebenden möglichen Verbreiterungsbeträge des Talquerschnittes mit Verlagerung der Talachse scheinen den Experten für den Betrachtungszeitraum von 100'000 Jahren jedoch plausibel.

### **4.1.5 Umgang mit Ungewissheiten**

Prognosen der zukünftigen geologischen Entwicklung sind naturgemäss mit Ungewissheiten behaftet. Je nach Thema und Bearbeitungstiefe sind diese grösser oder kleiner. Im Hinblick auf das Auswahlverfahren für geologische Tiefenlager sind sie auch von unterschiedlicher Bedeutung. Für folgende Aspekte aus dem Themenkreis des vorliegenden Berichtes, welche die Experten als von grosser Bedeutung beurteilen, soll der Umgang der Nagra mit den Ungewissheiten geprüft werden:

- Basis Quartär
- Bestimmung der lokalen Erosionsbasis
- zukünftige Entwicklung der lokalen Erosionsbasis
- Quantifizierung der glazialen Tiefenerosion

#### ***Basis Quartär***

Ein wichtiges Instrument für die Ermittlung und Darstellung der Basis Quartär ist das "Digitale Höhenmodell Basis Quartär". Die Erstellung des DHM Basis Quartär ist in NAB 14-02 im Detail beschrieben, ebenso die Unsicherheiten. Anhand von statistischen Auswertungen (DHM Quartär versus Bohrdaten) können demnach die Abweichungen für über 93% der Bohrungen mit weniger als 10 m beziffert werden. Toleriert werden allgemein Abweichungen von maximal 20 m (NAB 14-02, Kapitel 5.2.2). Lediglich 4.6% der Bohrungen zeigen grössere Abweichungen. Davon betroffen sind offenbar überwiegend Hanglagen. Die grössten Unsicherheiten bestehen im Bereich von übertieften Tälern (Datendichte). Im Gebiet der 3D-Seismik Zürcher Weinland wurde die Basis Quartär auf einem neu prozessierten Datensatz kartiert (Roth 2011) und das Resultat in das DHM Basis Quartär integriert. Ein Abgleich mit Bohrdaten hat - bei einigen Widersprüchen - gemäss Nagra eine relativ gute Übereinstimmung ergeben, wenngleich für die zentralen Bereiche der festgestellten Felsdepressionen Bohrdaten und somit absolute Tiefenangaben oft fehlen würden (NAB 14-02). Für die Unsicherheiten im Bereich von Talübertiefungen gibt die Nagra keine Quantifizierungen. Es wird lediglich konstatiert, dass die effektive Tiefe der bekannten Übertiefun-

gen grösser sein kann als bisher mit Bohrungen nachgewiesen wurde, und dass Übertiefungen von mehr als 250 m existieren (NTB 14-02/III, S. 75).

Die angegebenen Abweichungen des DHM Basis Quartär gegenüber Bohrdaten rechtfertigen es aus Sicht der Experten, diese Bezugsfläche ohne Fehlerfortpflanzung und somit als weitgehend fixe Grösse zu behandeln (u.a. hinsichtlich Indikator I4). Die Kenntnis des Masses von Talübertiefungen (d.h. der Tiefenlage der Basis Quartär) ist in erster Linie als Grundlage für eine Abschätzung des Potenzials der glazialen Tiefenerosion von Bedeutung (vgl. unten).

### ***Bestimmung der lokalen Erosionsbasis***

In NAB 14-02, Kapitel 6.4.3 wird auf die Zuverlässigkeit der Daten der lokalen Erosionsbasis (LEB) eingegangen. Unter anderem wird betont, dass es sich bei der LEB um einen abstrakten Begriff handelt, der stark von subjektiven Definitionen abhängt (S. 55). Am deutlichsten wird dies, wie oben bereits erwähnt (Kapitel 4.1.2), für den Bereich des Standortgebietes Jura Ost. Der Entscheid, das Sissletal als Haupttal zu betrachten oder nicht hat gemäss Nagra einen Höhenunterschied in der Grössenordnung von bis zu 100 m zur Folge. Eine Quantifizierung von höhenmässigen Unsicherheit der LEB in den übrigen Gebieten wird von der Nagra nicht angegeben. Ebenfalls nicht ausgesagt wird, ob die resultierenden LEB im Hinblick auf den sicherheitstechnischen Vergleich der Standortgebiete als konservativ zu betrachten ist.

In NTB 14-02/III, Fig. 4.4-12 wird die Sensitivität der Standortgebiet bezüglich zukünftiger Erosion mittels Höhendifferenzen bezüglich der LEB dargestellt und abgeschätzt, ob und in welchem Mass das Wirtgestein in den einzelnen Standortgebieten erreicht werden könnte. Die Ungewissheit der LEB wird dabei nicht berücksichtigt, sondern diese als fixe Grösse behandelt.

### ***Zukünftige Entwicklung der lokalen Erosionsbasis***

Anhand von verschiedenen geologischen Archiven schätzt die Nagra die Entwicklung der LEB während der letzten ca. 2 Millionen Jahre ab (u.a. Hebungsraten, Schotterbasisflächen etc.). Für die Ableitung von verschiedenen Szenarien für die zukünftige Entwicklung basiert sie vor allem auf der Absenkung von Schotterbasisflächen (Basisfall, optimistisch, pessimistisch). Diese werden anschliessend auf die Standortgebiete angewendet (vgl. NTB 14-02/III, Kapitel 4.4). Dieses Vorgehen sowie die vorgeschlagenen Quantifizierungen betrachten wir als angemessen und ausreichend konservativ.

### ***Quantifizierung der glazialen Tiefenerosion***

Das in NTB 14-02/III angegebene Mass für die zu erwartenden glaziale Tiefenerosion beruht auf den Kenntnissen der existierenden Talübertiefungen. Demnach sind Übertiefungen von mindestens 250 m bekannt und wohl auch für zukünftige Eiszeiten nicht grundsätzlich auszuschliessen. Für die Abschätzung der zukünftigen glazialen

Tiefenerosion arbeitet die Nagra aber mit einem Mass von nur 200 m, mit der Begründung, dass die zwischen Molasse und Opalinuston liegenden Malmalke diese markant behindern würden (NTB 14-02/III, Seite 78). Aus Sicht der Experten kann sich dieses Vorgehen noch zu wenig auf Kenntnisse über den Mechanismus der glazialen Tiefenerosion in Malmkalken abstützen und wird im Moment als nicht ausreichend konservativ beurteilt.

## **4.2 Anmerkungen zu Indikatoren in der qualitativen Bewertung der geologischen Standortgebiete bzw. der zugehörigen Lagerperimeter**

Die im vorliegenden Expertenbericht behandelten Aspekte der Untersuchung der geologischen Standortgebiete dienen der Abgrenzung der vorgeschlagenen Lagerperimeter und fliessen im Rahmen des sicherheitstechnischen Vergleichs (NTB 14-01) in verschiedene entscheidrelevante Indikatoren ein. Im Wesentlichen dienen sie der Bestimmung der minimalen Tiefenlage des Lagerperimeters hinsichtlich der Gesteinsdekompektion bzw. einer möglichen Freilegung. Als Bezugshorizont gilt dabei der Top Opalinuston. Nachstehend fassen wir - ohne Anspruch auf Vollständigkeit - einige Anmerkungen zu den Indikatoren 2, 3, 4, 23 und 28 zusammen, welche sich aus unserer Beurteilung der Grundlagen ergeben.

### **4.2.1 Indikator Nr. 2: Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf die Gesteinsdekompektion**

Im Rahmen der Anforderungen an diesen Indikator ist zu prüfen, ob auch unter Berücksichtigung der flächigen Erosion der lokalen Topographie (Einschneidung und Denudation) am Ende des Betrachtungszeitraums eine genügend grosse Überdeckung des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs verbleibt (NTB 08-05, Anhang A1.2; NTB 14-01, Tab. 2.3-6). Dieser Indikator fliesst in das Kriterium 1.2 (Hydraulische Barrierewirkung) ein.

Zur Verhinderung von Dekompaktionseffekten muss am Ende des Betrachtungszeitraums für SMA eine Lagerüberdeckung von 350 m und für HAA eine Überdeckung von 450 m vorhanden sein. Für das Standortgebiet Wellenberg wird eine Überdeckung von 600 m angestrebt (NTB 14-01, Kapitel 4.1, S.167).

Grundlage für die Optimierung des Lagerperimeters und den sicherheitstechnischen Vergleich sind die Aspekte der zukünftigen Entwicklung von lokaler Erosionsbasis und lokaler Topographie. Diese Aspekte und ihre Quantifizierung wurden in Kapitel 4.1.2 des vorliegenden Expertenberichts behandelt. Die dort wiedergegebenen Aussagen der Nagra zu Erosion und Landschaftsgeschichte sind unseres Erachtens plausibel und stufengerecht.

#### **4.2.1 Indikator Nr. 3: Tiefenlage unter lokaler Erosionsbasis im Hinblick auf die Bildung neuer Rinnen**

Im Rahmen der Anforderungen an diesen Indikator ist zu prüfen, ob auch unter Berücksichtigung der Entstehung von neuen Durchbruchsrinnen und deren späteren glazialen Übertiefung am Ende des Betrachtungszeitraums eine genügend grosse Überdeckung des Lagers verbleibt, um eine Freilegung des Lagergesteins zu verhindern (NTB 08-05, Anhang A1.3; NTB 14-01, S. 48, Fussnote 40; NTB 14-01, Tab. 2.3-6). Dieser Indikator fliesst in das Kriterium 2.2 (Erosion) ein.

Das Potenzial für die Entstehung solcher Rinnen wird in NTB 14-02/III für alle Standortgebiete diskutiert. Das grösste Potenzial wurde von der Nagra dabei für das Standortgebiet Südranden festgestellt, v.a. wegen dessen relativ untiefer Lage. Ebenfalls ein gewisses Potenzial für die Bildung neuer Rinnen kann im Standortgebiet Jura Ost erkannt werden. Allerdings dürfte dies nur im Fall einer relativ grossen zukünftigen Vergletscherung und unter Berücksichtigung von speziellen Interaktionen einzelner Gletscherlappen tatsächlich eintreten. Die in Kapitel 4.1.2 des vorliegenden Expertenberichts wiedergegebenen Aussagen der Nagra zur Bildung von neuen Rinnen sind unseres Erachtens plausibel und stufengerecht. Grundsätzlich können solche neuen, fluviatil entstandenen Rinnen nicht tiefer als die lokale Erosionsbasis greifen; ihre Auswirkungen auf die Lagerstandorte sind demnach auch mit dem Indikator Nr. 2 abgedeckt (vgl. oben).

#### **4.2.3 Indikator Nr. 4: Tiefenlage unter Fels im Hinblick auf die glaziale Tiefenerosion**

Im Rahmen der Anforderungen an diesen Indikator ist zu prüfen, ob auch unter Berücksichtigung der glazialen Tiefenerosion in bestehenden übertieften Felsrinnen am Ende des Betrachtungszeitraums eine genügend grosse Überdeckung des Lagers verbleibt, um eine Freilegung des Lagergesteins zu verhindern (NTB 08-05, Anhang A1.4; NTB 14-01, Tab. 2.3-6).

Bereits auf Grund ihrer geografischen Lage sind nicht alle Standortgebiete hinsichtlich glazialer Tiefenerosion gleich einzuordnen. Während die Wahrscheinlichkeit, von einer zukünftigen Vergletscherung betroffen zu sein, für das Standortgebiet Wellenberg sehr hoch ist, ist dies u.a. für das Standortgebiet Jura Ost sehr viel weniger der Fall (Lage ausserhalb des letzteiszeitlichen Maximalstandes).

Zweiter wichtiger Punkt ist die Tiefenlage des Lagerperimeters unter der Felsoberfläche. Je tiefer er sich befindet, desto geringer ist die Gefährdung. Im Weiteren hat eine Position unter einer rezenten Felshochzone einen positiven Effekt, indem sich zukünftige Vergletscherungen tendenziell an den heutigen Tälern orientieren werden. Dies ist zum Beispiel ein wesentlicher Unterschied zwischen den beiden Standortge-

bieten Jura Ost (unter der Hochzone des Tafeljuras gelegen) und Zürich Nordost (im wenig reliefierten Molassegebiet gelegen). Der optimierte Lagerperimeter im Standortgebiet Zürich Nordost weicht lediglich Flaach- und Marthalen-Rinne aus (inkl. Pufferzone), nicht jedoch der Rudolfingen-Rinne. Angesichts der Verbreitung von bestehenden glazialen Übertiefungen in diesem Standortgebiet, wie auch im Standortgebiet Nördlich Lägern sollte der Ansatz einer flächigen Beurteilung der glazialen Tiefenerosion ohne Fokussierung auf heute bestehende Felsrinnen bevorzugt werden. Davon abgesehen ist die Wertung der glazialen Tiefenerosion im Vergleich der Standortgebiete untereinander durch die Nagra jedoch stufengerecht und plausibel dargelegt.

#### **4.2.4 Indikator Nr. 23: Modellvorstellungen zur Langzeitentwicklung (Geodynamik und Neotektonik; weitere Prozesse)**

Dieser Indikator fliesst in die Kriterien 2.1 (Beständigkeit des Standorts und Gesteinseigenschaften) sowie 3.3 (Prognostizierbarkeit der Langzeitveränderungen) ein.

Wie oben erläutert (Kapitel 4.1.3), haben wir lediglich jenen Teilaspekt der Neotektonik geprüft, welcher der Analyse von vergangenen differentiellen Höhenbewegungen von einzelnen Krustenabschnitten und somit der Identifizierung von neotektonisch aktiven Strukturelementen dient. Die Untersuchung von Rinnenbasishöhen eiszeitlicher Schotter hat gewisse Hinweise auf mögliche Aktivitäten entlang von Lägern- und Mandacher Struktur ergeben. Mit dem aktuellen Kenntnisstand (u.a. fehlende Altersdatierungen) sind diese Hinweise aber als vage zu werten. Der Lage der allenfalls betroffenen Strukturelemente und ihrer eventuellen zukünftigen tektonischen Aktivität wird mit der bereits in Etappe 1 vorgeschlagenen Abgrenzung der Standortgebiete aber ausreichend Rechnung getragen.

#### **4.2.5 Indikator Nr. 28: Erosion im Betrachtungszeitraum**

Gemäss NTB 14-02/III (S. 46) werden mit diesem Indikator grossräumige Unterschiede zwischen den Standortgebieten betreffend Erosion (lineare Eintiefung und Denudation) betrachtet. Dies betrifft im Wesentlichen die Unterschiede zwischen dem nördlichen Alpenrand (Gebiet Wellenberg) und dem externen nördlichen Alpenvorland (Standortgebiete in der Nordschweiz). Vergleiche dazu auch NTB 14-01: Tab. 2.3-2 (S.34) und S.241.

Der Indikator 28 entspricht mit dem von der Nagra in Etappe 1 verwendeten Indikator "Grossräumige Erosion im Betrachtungszeitraum". Er dient der Beurteilung der Auswirkungen der grossräumigen flächenhaften Erosion auf die Langzeitstabilität, und berücksichtigt auch den Einfluss der Dekompaktion sowie die Freilegung des Tiefenlagers durch langfristige Hebung/Erosion. Es sind Überschneidungen mit den Indikatoren 2 und 3 zu vermerken.



Hinsichtlich der Hebung (vertikale Krustenbewegungen) sind klare Unterschiede zwischen den geographischen Grossräumen festzustellen, indem die Hebungsbeträge im Alpenraum gegenüber dem nördlichen Alpenvorland deutlich erhöht sind. Diesem Aspekt wurde von der Nagra beim Vergleich der Standorte ausreichend Rechnung getragen.

## 5. Beantwortung der Leitfragen

### 5.1 Leitfrage 1

*Ist die in NAB 14-02 (Dossier III) dokumentierte Erstellung des neuen digitalen Modells zur Felsoberfläche («Basis Quartär») nachvollziehbar? Lässt sich aus dem Modell robust und reproduzierbar auf die Bezugsniveaus «Lokale Erosionsbasis» und «Niveau glaziale Tiefenerosion» schliessen?*

Die Erstellung des aktualisierten DHM "Basis Quartär" für die Nordschweizer Standortgebiete sowie die Neuerstellung des DHM "Basis Quartär" für das Standortgebiet Wellenberg sind nachvollziehbar dokumentiert und die Resultate plausibel. Das Bezugsniveau "Lokale Erosionsbasis" ist eine neu definierte Bezugsgrösse, deren genaue Ausprägung jedoch auch Interpretationsspielraum lässt (Stichwort: Definition "Haupttäler"). Die Herleitung der von der Nagra für SGT 2 verwendeten Fläche ist sinnvoll und plausibel sowie nachvollziehbar dokumentiert. Es ist jedoch nicht klar, ob sie als konservativ zu betrachten ist.

Ein "Niveau glaziale Tiefenerosion" als solches wurde von der Nagra bisher nicht hergeleitet. Für die Erosionsszenarien wird aber (bezüglich der Standortgebiete Zürich Nordost und Nördlich Lägern) mit einer um 200 m unter die lokale Erosionsbasis greifenden glazialen Tiefenerosion gerechnet, womit ein solches Niveau im Wesen definiert ist - wobei die Experten gegenüber dem Mass von 200 m allerdings Vorbehalte haben (vgl. Kapitel 4.1.5).

### 5.2 Leitfrage 2

*Ist die Bedeutung der lokalen Erosionsbasis korrekt und umfassend erfasst (NTB 14-02, Dossier III)?*

*Ist die abgeleitete Entwicklung der lokalen Erosionsbasis korrekt und nachvollziehbar begründet?*

Die Bedeutung der lokalen Erosionsbasis als Bezugsfläche für die Erosionsszenarien, als Randbedingung für mögliche Tiefen von neuen Durchbruchsrinnen sowie für die Identifikation von übertieften Talabschnitten ist von der Nagra korrekt und umfassend diskutiert sowie auf die relevanten Fragestellungen angewendet worden.

Ihre zukünftige Entwicklung ist vor dem Hintergrund der Erosionsszenarien und der massgebenden Prozesse korrekt und nachvollziehbar begründet. Allerdings wurden aus unserer Sicht die aus konzeptionellen Gründen bestehenden Unsicherheiten der Lokalen Erosionsbasis zu wenig in den auf ihr aufbauenden Fragestellungen berücksichtigt.

### 5.3 Leitfrage 3

*Ist die Entstehung «neuer Durchbruchsrinnen» korrekt abgeleitet und sind deren standortspezifischen Charakteristika (Lokalisierung, Tiefgang etc.) plausibel? Ist das Potenzial der glazialen Tiefenerosion nachvollziehbar abgeleitet und ausreichend konservativ bewertet?*

Die Entstehung neuer Durchbruchsrinnen wurde von der Nagra richtigerweise als ein Prozess erkannt, der im Zusammenhang mit einer Gletscherpräsenz steht und nicht das Resultat von lokal stattfindenden fluviatilen oder gravitativen Prozessen (Rückschreitende Erosion) darstellt. Mögliche Verläufe von neuen Durchbruchsrinnen sind von der Nagra für die verschiedenen Lagerstandorte diskutiert und deren Tiefgang als beschränkt auf das Niveau der "lokalen Erosionsbasis" plausibel erkannt worden.

Das Potenzial der glazialen Tiefenerosion wurde von der Nagra eingehend diskutiert und nachvollziehbar beschrieben, jedoch nicht genau quantifiziert. Insbesondere für die Standortgebiete Zürich Nordost und Nördlich Lägern sind bezüglich einer ausreichend konservativen Bewertung noch Fragen offen. Es betrifft im Wesentlichen die Frage, inwieweit die Kalke des Malm die Tiefenerosion hindern. Die Klärung dieser Frage bedarf eingehender Untersuchungen, welche für Etappe 3 SGT vorzusehen sind.

### 5.4 Leitfrage 4

*Ist die zukünftige Landschaftsentwicklung gesamthaft korrekt und ausreichend konservativ erfasst?*

Die Annahmen der Nagra für die zukünftige Landschaftsentwicklung basieren auf einer Analyse der vergangenen Landschaftsentwicklung und den daraus abgeleiteten wesentlichen Faktoren, welche zu relativ schnellen Veränderungen der Landschaft führen können (regionale Flussumlegungen und neue Durchbruchsrinnen). Ihnen liegt zugrunde, dass auch für die kommende Million Jahre von einem Andauern des Eiszeitklimas, also von weiteren zukünftigen Vergletscherungen ausgegangen wird.

Die Darlegungen der Nagra zum zukünftigen Klima wurden von uns nicht im Detail geprüft. Die daraus gewonnenen Annahmen sind aus unserer Sicht jedoch plausibel und von der Nagra ausreichend konservativ interpretiert worden.

## 6. Bemerkungen zu weiterführenden Untersuchungen für Etappe 3 SGT

Die als Grundlage für die Erosionszenarien wichtige Bezugsfläche lokale Erosionsbasis hat sich nach Ansicht der Experten als sehr wertvoll erwiesen. Sie sollte weiterentwickelt werden, mit dem Ziel eine Version zur Verfügung zu stellen, welche im Hinblick auf das Standortwahlverfahren eindeutig konservativ ist.

Das Prozessverständnis für die glaziale Tiefenerosion und deren räumliche Eingrenzung konnte seitens der Nagra mit den Arbeiten für SGT Etappe 2 markant verbessert werden. Dennoch ist eine zuverlässige Lokalisierung sowie Quantifizierung der möglichen Tiefe von zukünftigen Ereignissen weiterhin nicht möglich. Es stellt sich die Frage, ob dies angesichts der Vielzahl und begrenzten Prognostizier- und Quantifizierbarkeit von massgebenden Faktoren grundsätzlich überhaupt möglich sein kann.

Von den beiden Standortgebieten, welche gemäss dem Vorschlag der Nagra in Etappe 3 SGT weiter verfolgt werden sollen, ist das Potenzial für eine zukünftige glaziale Tiefenerosion im Gebiet Zürich Nordost wegen seiner bezüglich der bisherigen Gletscherausdehnung proximaleren Position und dem allgemein leichter erodierbaren Untergrund deutlich höher und könnte sich in diesem Sinn als wesentlich für den sicherheitstechnischen Vergleich der beiden Standorte im Rahmen von Etappe 3 SGT erweisen. Dem Standortgebiet Nördlich Lägern kommt in dieser Hinsicht eine Zwischenstellung zu.

Aufgrund der vorhandenen Informationen zu ehemaligen Vergletscherungen und den damit in Zusammenhang stehenden glazialen Übertiefungen und entsprechenden Sedimenten (vier evtl. unterschiedlich alte Übertiefungen, evtl. früher bereits reaktiviert) erscheint das Standortgebiet Zürich Nordost bestens geeignet für eine weiterführende Untersuchung dieser Thematik. Unserer Ansicht nach sollte folgenden Aspekten ein besonderes Augenmerk gelten:

Allgemein (Prozessverständnis):

- Klärung möglicher genetischer Zusammenhänge zwischen bestehender Entwässerung im Gletschervorfeld und Implikationen für die Lokalisierung von Gletschertor und in der Folge subglazialer Entwässerung und Erosion. Anwendung auf die Standortgebiete.
- Analyse der möglichen Auswirkungen einer bis auf die Malmkalke hinunterreichenden subglazialen Ausräumung, sowohl in Bezug auf die Veränderung der subglazialen Entwässerung (Verringerung, Stimulation) als auch in Bezug auf mögliche Veränderungen im vermutlich bestehenden Karstsystem.
- Abschätzung der Wirkung von chemischer Erosion bei einer bis auf die Malmkalke hinunterreichenden subglazialen Ausräumung
- Untersuchung der Verkarstung als erosionswirksamem, landschaftsbildendem Prozess.

**Standortspezifisch:**

- Stratigraphie und Alter der Sedimentfüllung aller übertieften Rinnen in den (bzw. im Umfeld der) Standortgebiete Zürich Nordost und Jura Ost als Grundlage für eine gesamthafte genetische Analyse der eiszeitlichen Ablagerungen im Umfeld der Lagerperimeter. Für Zürich Nordost sollte ebenso die Existenz und Lage der vermuteten Felshochzonen zwischen Rudolfingen und Flaach-Rinne bzw. zwischen Niderholz-Rinne und Flaach-Rinne verifiziert werden.
- Im Fall eines sich aus der Gesamtbeurteilung ergebenden Weiterzuges des Standortgebietes Nördlich Lägern in Etappe 3 SGT, sollte ein analoges, ergänzendes Untersuchungsprogramm für die eiszeitlichen Bildungen dieses Gebiets ausgeführt werden.

Im Rahmen der Prüfung der Grundlagen haben wir verschiedentlich festgestellt (vgl. Anhang), dass sich bei den Darstellungen von gewissen geologischen Elementen (z.B.: Verbreitung von Schottern etc.), welche anhand von Auswertungen unbearbeiteter geologischer Grundlagen erstellt werden, immer wieder Fehler ergeben. So verschwinden z.B. gewisse Einheiten unter Deckschichten. Wir empfehlen, die bestehenden geologischen Grundlagen vor einer GIS-Auswertung händisch zu bereinigen, um solche Datenverluste zu vermeiden. So sollten u.a. Deckschichten entfernt werden, bzw. die Verbreitung relevanter Einheiten herausgearbeitet werden.

Als Ergänzung der GIS-Analyse Basis Deckenschotter sollten Isohypsenkarten für diese Basis erarbeitet und in das DHM "Basis Quartär" integriert werden.

Im Anhang haben die Experten punktuelle Anmerkungen zur Darstellung in einzelnen Berichten der Nagra zusammengestellt. Diese sind als Anregung zu einer kritischen Auseinandersetzung zu verstehen; sie können im Rahmen der Weiterbearbeitung in Etappe 3 SGT berücksichtigt werden.

**Expertenbericht zuhanden des ENSI**

bearbeitet von  
Hans Rudolf Graf  
Stephan Frank

8600-34  
GH/SF/Ri

## ANHANG

### Anmerkungen zu einzelnen Punkten in den geprüften Berichten der Nagra

#### NAB 12-20

Seite 5, Abschnitt A.2.1.1: Konglomerate der Hörnli-Schüttungen sollen im Schnittbereich mit der Glimmersandrinne nicht existieren. Sind auf den Blättern Winterthur und Steckborn des Geologischen Atlas der Schweiz 1:25'000 aber durchaus vorhanden.

Seite 17, Abschnitt A.4.2: Für das Alter der Aare-Donau Schotter wird das Serravallian als nicht unwahrscheinlich genannt, diese somit als von vergleichbarem Alter wie das Glimmersand-System betrachtet. Die ist jedoch kaum möglich, denn diese beiden Entwässerungssysteme kreuzen sich irgendwo im nördlichen Mittelland. Die Aare-Donau-Verbindung ist sicher jünger als das Glimmersandsystem.

Seite 75, Abschnitt B.2.2.1: Unter Punkt 4 wird erwähnt, dass es für die Phase der Tieferen Deckenschotter keinen Nachweis für eine Entwässerung durch das Walenseetal gebe. Es ist unklar worauf diese Aussage beruht. Unserer Ansicht nach kann das so absolut nicht belegt werden und widerspricht auch der Darstellung in Figur 1.3-1 im NTB 14-02 III.

#### NAB 12-35

S.24, Abschnitt 4.2: Betreffend die TDS im Bereich nordwestlich des Bodensees liegen Hinweise auf neotektonische Höhenveränderungen vor (Graf 2009b). Deren Berücksichtigung könnte gewisse Erklärungen für das komplizierte Höhenlinienbild geben (sollte geprüft werden). Die Deutung des Schottervorkommens von Salen-Reutenen als HDS ist durchaus kontrovers. Es könnte durchaus wesentlich jünger sein (Graf 2009b).

S.26, Abschnitt 4.3: Die Differenz zwischen Basis DS und lokaler Erosionsbasis nimmt von E nach W und von S nach N ab, nicht zu.

Beilage 1: Viele der in blau angegebenen DS-Vorkommen sind keine (Habsburg, Reusstal zw. Mellingen-Oberrohrdorf, Bünztal, W Wiggertal, N Rheinfeldern (D)) bzw. wurden mittlerweile anders interpretiert (Blatt Schöffland). Wegen nicht entfernten Deckschichten sind sie z.T. unvollständig wiedergegeben (Dürn-Gländ, Bowald, Elsass). Es fehlen die DS im Wynatal, W Hallwylsee, N Baden-Dättwil, Altberg, Hasleren, Gubrist, Ölberg (SH), S. Thayngen, N. Irchel, Stoffel etc.).

#### NAB 14-02

S.52, Abschnitt 6.4: Die erwähnte Reduktion eines von Südosten auf das Wasserschloss zustrebenden Sporns in Beilage 17 gegenüber Beilage 16 ist nicht ersichtlich.

S.54, Figur 32: Das im NE angegebene Label "Paläotalweg 350" zeigt ins Leere.

Beilagen 7 und 8: Im nordwestlichen Bereich des Kohlfirns ist ein Aufschluss von Malm unter Tertiär angegeben (ca. 500 m ü.M.). Dieser ist uns unbekannt und erscheint unplausibel. Bei Koordinate ca. 687'000/275'500 ist ein Molasse-Aufschluss angegeben, der uns unbekannt ist.

### **NAB 14-25**

S.30, 2. Spiegelpunkt: In der dritten Linie wird ausgesagt, dass im Gegensatz zu den jüngeren Schotterablagerungen (HT und NT) die Deckenschotter an verschiedenen Stellen in grösseren Schotterkörpern erhalten sind. Tatsächlich ist es eher umgekehrt. HT und NT sind üblicherweise in wesentlich grösseren Körpern erhalten als die Deckenschotter.

S.30, 3. Spiegelpunkt: das Zitat "Dunai 2010" fehlt im Literaturverzeichnis.

S.38, Fig. 5-6: Die Klettgauschotter (Hochterrasse) sind sehr lückenhaft angegeben (verborgen unter den Deckschichten). Deckschichten entfernen oder an Figur 5-7 anpassen: Talfüllung entspricht +/- der Verbreitung der Klettgauschotter.

S.40, 2. Spiegelpunkt. In der 5. Linie steht HDS statt TDS.

S.44, Fig. 5-10: HT Ruckfeld zum Teil unter Deckschichten verborgen. Deckschichten entfernen oder die Verbreitung von HT an Figur 5-11 anpassen.

S.50 bzw. Figur 5-16.b: Die Höhe der Wasserscheide zwischen Aare- und Rhone-System wird im Text mit 450 m ü.M. angegeben, in der Figur 484 m ü.M.

S.64, 2. Spiegelpunkt und Fig. 6-5: Zu beachten: Der Durchbruch zwischen Thur- und Tösstal bei Rüdlingen wurde bereits vor der letzten Eiszeit angelegt (vgl. Niklaushalden-Formation, Graf 2009a).

S.65, Fig. 6-4: Entgegen der Figur-Unterschrift sind die Höhenlagen der kartierten Deckenschotterbasis nicht angegeben.

S.66, Fig. 6-5: Die Basis der Deckenschotter-Vorkommen sowie anderer hochgelegener eiszeitlicher Schotter (Hochterrasse auf der rechten Talseite unterhalb von Tössegg) wurde im DHM Basis Quartär offenbar nicht berücksichtigt.

S.72, Fig. 6-10: Zum besseren Verständnis Villnachern und Linn in der Karte angeben.

S.82, 1. Abschnitt: Von der Birrfeld-Übertiefung aus verlaufen nicht einer, sondern zwei Ausläufer nach Norden und durchbrechen die mesozoischen Gesteine. Westlich vom Reussdurchbruch verläuft jener im Hauser-Tal.

### **NTB 14-02/III**

Seite 11, Fig. 2.2.1: Überdeckende jüngere Schichten auf HT und NT sind in der Grundfarbe dargestellt und suggerieren so das Nicht-Vorhandensein der betroffenen Schotter. U.a. fehlen die Aathal-Schotter praktisch völlig. Ebenso: Solenberg-Schotter E Schaffhausen, Ittingen- und Buechberg-Schotter im Stammertal, NT im Wehntal-Surbtal, Limmattal bei Zürich. Auf den HDS des Heitersbergs S Baden hingegen wurde sie offenbar entfernt. Dies ergibt ein heterogenes und unvollständiges Bild.



ENSI 33/453

ENSI, CH-5200 Brugg, Industriestrasse 19, Telefon +41 56 460 84 00, E-Mail [Info@ensi.ch](mailto:Info@ensi.ch), [www.ensi.ch](http://www.ensi.ch)