

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

Sachplan geologische Tiefenlager (SGT)  
Etappe 2

---

Fachbericht zu Etappe 2

## Beilage 2:

Die bautechnische Machbarkeit der Lagerstollen  
Einfluss der Tiefenlage auf die Langzeitsicherheit  
Beurteilung der Untersuchungen der Nagra

Kalman Kovári

Januar 2016

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

## Zusammenfassung

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

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

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

Beim *vertikalen Freisetzungspfad* steht die Forderung der Nagra im Zentrum, wonach sich die plastischen Zonen – in diversen Quellen auch als Auflockerungszone bezeichnet – in der Umgebung der Lagerstollen in vertikaler Richtung nicht mehr als 5 m über die Stollenmitte erstrecken dürfen. Diese Forderung leitet sich vom nicht begründeten Postulat ab, die vertikale Distanz zwischen plastischer Zone und Schichtgrenze des Opalinustons müsse mindestens 35 m betragen. Bei einer angenommenen minimalen Schichtstärke des Opalinustons von 80 Metern und der Anordnung der Anlage in dessen Mittelebene erhält man in der Tat eine derartige vertikale Begrenzung der plastischen Zone. Aus den felsmechanischen Berechnungen der Nagra geht hervor, dass bei 700 m Tiefe die vertikale Erstreckung der plasti-

schen Zone den Grenzwert von 5 Metern nicht überschreiten würde, während dies bei 900 m Tiefe bei Weitem der Fall wäre. Aufgrund des erwähnten Postulates und rechnerisch ermittelten plastischen Zonen wird deshalb empfohlen, auf Anlagen in einer Tiefe von 900 m zu verzichten. Bei dieser Art von Rückstellungskriterium fällt sofort auf, dass die Bestimmung der Tiefenlage und somit die Bauausführung der Anlage mit einer Genauigkeit von einigen Metern erfolgen müsste. Eine solche Folgerung erscheint angesichts der dem Problem der Lagerung radioaktiver Abfälle generell innewohnenden Unwägbarkeiten paradox.

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

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

## Inhalt

1. Problemstellung .....	5
2. Auftrag .....	8
3. Grundlagen .....	10
4. Zuverlässiger Bau, Betrieb und Verschluss der Lagerstollen .....	11
5. Auswirkung der von Spritzbeton verursachten pH-Fahne auf die Langzeitsicherheit .....	15
6. Horizontaler Freisetzungspfad infolge der Zersetzung der Spritzbetonschale .....	19
7. Auswirkung der von den Stahlbögen verursachten Gasentwicklung auf die Langzeitsicherheit.....	20
8. Massgebender vertikaler Freisetzungspfad und plastische Zone.....	23
8.1 Ungestörter bzw. unbeschädigter vertikaler Freisetzungspfad $M_{\min, \text{intakt}}$ .....	26
8.2 Plastische Zone.....	29
9. Schlussfolgerungen und Empfehlungen .....	39
Referenzen .....	39
Anhänge	
1. Herleitung, Beschreibung und Anwendung der sicherheitstechnischen Kriterien für die Standortevaluation [HSK 33/001, S. 18/20 & 22]	
2. Arbeitsunterlagen pH-Fahne	
3. Errechnete maximale vertikale Ausdehnung der plastischen Zone	

## 1. PROBLEMSTELLUNG

Die Nagra kommt in ihren Arbeitsberichten [NAB 14-81, S. I-II; NTB 14-01, S. 23] zum Schluss, dass der Standort "Nördlich Lägern" wegen ungenügenden Platzangebots im bevorzugten Tiefenbereich von ca. 600-700 m und wegen der Nachteile eines Lagers in der alternativen Tiefenlage von 900 m zurückgestellt werden sollte<sup>1</sup>. Die Nachteile ergeben sich aus einer bautechnisch bedingten Verringerung der Langzeitsicherheit der Anlagen in einer solchen Tiefe. In einzelnen Berichten wird für das Standortgebiet Nördlich Lägern nicht explizit die Zurückstellung empfohlen, sondern eine tiefe Bewertung der entscheidenden Merkmale und Indikatoren vorgenommen, was jedoch auf dasselbe herauskommt. So erhält dieses Gebiet für die bautechnische Machbarkeit die geringe Note 1.3 bei einem Maximalwert von 5 [NTB 14-01, S. 335]. NTB 14-01 äussert sich hierzu folgendermassen:

*Das Standortgebiet Nördlich Lägern weist bezüglich des Merkmals "Bautechnische Machbarkeit eines Tiefenlagers unter Berücksichtigung der vorgeschlagenen Standortareale" eine klare Schwäche auf, welche auf ausgeprägte Schwächen bei den Indikatoren "Tiefenlage im Hinblick auf bautechnische Machbarkeit (z.B. Gesteinsfestigkeiten und Verformungseigenschaften)" und "Platzangebot untertags" zurückzuführen ist. Diese Schwächen werden als eindeutige Nachteile des Standortgebiets Nördlich Lägern eingestuft, da die entsprechenden Bewertungen viel schlechter ausfallen, als diejenigen der insgesamt bestbewerteten Standortgebiete (Zürich Nordost und Jura Ost) (S. 326).*

Als bautechnisch bedingte Nachteile werden folgende Aspekte aufgezählt [NAB 14-81, S. I-II]:

- a. Die Gewährleistung des sicheren und zuverlässigen Baus, Betriebs und Verschlusses der Untertaganlagen (inkl. Lagerkammern) sei nicht gegeben.
- b. Die erforderliche Menge an Baumaterialien wäre grösser, was zu einer grösseren Schädigung insbesondere der technischen Barrieren (vor allem des Bentonits als Verfüllungs- und Versiegelungsmaterial), aber auch des umliegenden Wirtgesteins führen könnte.
- c. Eine unzulässige Schädigung des Wirtgesteins im Nahbereich der Lagerkammern (BE/HAA-Lagerstollen<sup>2</sup>) und der Versiegelungsstrecken würde die vertikale Migrationsdistanz im Wirtgestein verringern. Die Bedingungen für den zuverlässigen Einbau des Verfüll- und Versiegelungsmaterials im Hinblick auf seine Wirkung als Barriere (kurz- und mittelfristig wirksamer Quelldruck) wären nicht erfüllt.

Inhaltlich wird dieser Sachverhalt anderswo, teils wiederholend, teils ergänzend, wie folgt formuliert:

*Für die Festlegung der maximalen Tiefenlage sind gewisse Forderungen aus der Sicht der Langzeitsicherheit ausschlaggebend. Diese Forderungen gelten dauerhaft, d.h. sowohl während der Realisierung als auch über den Verschluss hinaus. Dazu gehören insbesondere (i) die Begrenzung der Auflockerungszone im Wirtgestein im Nahbereich der Lagerkammern (BE/HAA-Lagerstollen) bzw. Versiegelungsstrecken (mittelfristig Begrenzung der Wasserwegsamkeit parallel zu den BE/HAA-Lagerstollen bzw. den Versiegelungsstrecken), (ii) die Begrenzung der vertikalen Ausdehnung der Gebirgsstörung bzw. der plastifizierten Zone als Teil des vertikalen Migrationsweges im Wirtgestein in der direkten Umgebung der Lagerkammern, sowie (iii) Gewährleistung geeigneter*

<sup>1</sup> Im Jahre 2008 wurde – noch unter Berücksichtigung der Mindestanforderungen an den Indikator "Mächtigkeit" – die mögliche Tiefe der Lagerebene, d.h. die "Mitte notwendiger einschlusswirksamer Gebirgsbereich mit  $\leq 900$  m u.T." angegeben [NTB 08-03, S. 68]. Für das Gebiet Nördlich Lägern beträgt die Mächtigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs infolge der geringdurchlässigen Ausbildung der Rahmengesteine 270 bis 320 m [NTB 08-03, S. 308].

<sup>2</sup> BE/HAA: Abgebrannte Brennelemente/hoch- und langlebige mittelradioaktive Abfälle.

*Bedingungen für den zuverlässigen Einbau des Verfüll- und Versiegelungsmaterials im Hinblick auf seine Barrierenwirkung (kurz- und mittelfristig wirksamer Quelldruck). [NAB 14-81, S. 101]*

Es ist zu erwähnen, dass in dieser Darstellung die schädliche Auswirkung einer von der Spritzbetonschale ausgehenden sogenannten pH-Fahne sowie eine nachteilige Gasbildung infolge des häufigeren Einbaus von Stahlbögen keine Erwähnung finden. Die Einwände der Nagra lassen sich in technischer Hinsicht auch folgendermassen zusammenfassen: In einer Tiefe von 900 m ist beim Bau der Anlagen infolge der höheren Gebirgsspannungen mit häufigeren Niederbrüchen und der Notwendigkeit stärkerer Spritzbetonschalen sowie grösserer Mengen an Stahlbögen zu rechnen. Die Niederbrüche würden die fachgerechte Erstellung der Versiegelungsstrecken erschweren und die grössere Menge des Spritzbetons würde die Quellfähigkeit (Abdichtungsvermögen) des Bentonits und der Tonmineralien im Wirtgestein beeinträchtigen. Hier geht es um die von der Spritzbetonverkleidung ausgehende pH-Fahne. Eine vermehrte Stahlkorrosion würde zu einer unerwünschten Gasbildung in den Anlagen führen. Des Weiteren sollte gemäss den Untersuchungen der Nagra in einer solchen Tiefe eine Plastifizierung des Gebirges in der Umgebung des Hohlräum (HAA-Lagerstollen) in einem derartigen Ausmasse stattfinden, dass die Distanz zwischen dem Aussenrand der plastischen Zone und der oberen bzw. unteren Schichtgrenze des Wirtgesteins (vertikaler Freisetzungspfad) einen von der Nagra postulierten Grenzwert von 35 m unterschreiten würde.

Die Ergebnisse der geomechanischen, tunnelstatischen und weiteren Untersuchungen der Nagra fliessen in den übergeordneten sicherheitstechnischen Vergleich der geologischen Standortgebiete ein [NTB 14-01, S. 323]. Das hier behandelte Thema der lagerbedingten Nachteile dient konkret der Bewertung der geologischen Standortgebiete anhand der entscheiderelevanten Merkmale und der Identifikation von eindeutigen Nachteilen [NTB 14-01, S. 324/335]. Einer der Indikatoren heisst dabei "*Tiefenlage im Hinblick auf bautechnische Machbarkeit (Gesteinsfestigkeiten und Verformungseigenschaften)*" [NTB 14-01, S. 38]. In Tabelle 1 unten ist klar erkennbar, dass die Lagerperimeter HAA-NL-aL2-r und HAA-NL-aL1r mit der maximalen Lagertiefe von 900 m u.T. hinsichtlich "*Bautechnische Machbarkeit*" eine sehr tiefe Bewertung erhalten [NTB 14-01, Anhang S. C-81]. Im Grunde könnte man deshalb die Problemstellung für diesen Bericht auch zuspitzen: Ist die tiefe Bewertung des Lagerperimeters HAA-NL-aL2-r durch die Untersuchungsergebnisse in einschlägigen Nagra-Berichten (s. Referenzen) begründet? Die Problemstellung könnte man jedoch in einen grösseren Zusammenhang stellen; wir verweisen dazu auf die diesbezüglichen Ausführungen des Berichts HSK 33/001 (November 2007) der Aufsichtsbehörde (heute ENSI)(siehe Anhang 1).

**Tunnelbautechnische Machbarkeit:** In den Berichten der Nagra wird unmissverständlich festgehalten, dass die tunnelbautechnische Machbarkeit auch in Tiefen von bis zu 900 m gegeben ist:

*Der Bau und Betrieb der Untertaganlagen kann bei Wahl eines geeigneten Bauvorgangs und bei Verwendung eines auf die geotechnischen Bedingungen ausgerichteten Ausbaus grundsätzlich sicher und zuverlässig bis in grössere Tiefen gewährleistet werden. [NAB 14-81, S. I]*

Anderswo werden ähnliche Formulierungen gewählt:

*Für die in Etappe 1 verwendeten Mindestanforderungen an die Tiefenlage der Lagerebene (800 m u.T. für das SMA-Lager und 900 m u.T. für das HAA-Lager) können die erforderlichen Untertagbauten sicher gebaut werden [NTB 14-01, S. 25]*

*In Sedimentgesteinen mit signifikanten Anteilen an Tonmineralien wird eine zuverlässige Erstellung der Lagerstollen bis in eine Maximaltiefe von 900 m u.T. als potentiell möglich erachtet. [NTB 08-05, S. A1-9]*

Tab. 1: Bewertung der entscheidungsrelevanten Merkmale und der zugehörigen Indikatoren für das geologische Standortgebiet Nördlich Lägern für das HAA-Lager (alternative Lagerperimeter und Konzeptualisierungen) [NTB 14-01, Anhang, S. C-81].

Nr.	Entscheidungsrelevante Merkmale (EM) / Entscheidungsrelevante Indikatoren (EI)	HAA- NL- mLE-r	HAA- NL- mLE-r- oRG	HAA- NL- aL1-r	HAA- NL- aL2-r	HAA- NL- mLE-u
c)	<b>Explorier- und Charakterisierbarkeit der geologischen Barriere im Standortgebiet</b>	4.4	4.4	4.4	4.4	4.4
39	Variabilität der Gesteinseigenschaften im Hinblick auf ihre Charakterisierbarkeit	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5
43	Explorationsverhältnisse im geologischen Untergrund	4.3	4.3	4.3	4.3	4.3
d)	<b>Bautechnische Machbarkeit eines Tiefenlagers unter Berücksichtigung der vorgeschlagenen Standortareale</b>	1.3	1.3	1.5	1.3	2.1
1	Tiefenlage im Hinblick auf bautechnische Machbarkeit (u.B. Gesteinsfestigkeiten und Verformungseigenschaften)	2.1	2.1	1.5	1.3	2.1
48	Geotechnische und hydrogeologische Verhältnisse in überlagernden Gesteinsformationen	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5
8	Platzangebot untertags	1.3	1.3	1.9	2.7	2.7

Spricht man hier nur von "potentiell möglich", so wird an anderen Stellen die tunnelbautechnische Machbarkeit klarer bestätigt:

*Die weltweite Erfahrung im Untertagbau zeigt, dass Hohlräume mit vergleichbaren Querschnittsflächen wie die Referenzprofile (Tab. 4.3-1) durch Gebirge mit geringer Festigkeit und hohen Überlagerungen bis 800 m (SMA-Lager) bzw. 900 m (HAA-Lager) bei geeigneter Wahl des Ausbaus und des Bauvorgangs sicher erstellt werden können. [NAB 14-81, S. 43]*

*Die Erfahrung und geomechanischen Berechnungen zeigen aber, dass mit der Wahl eines geeigneten Bauvorgangs und eines auf die lokalen Bedingungen ausgerichteten Ausbaus druckhafte Gebirgsverhältnisse sicher gemeistert und Hohlräume so auch in grosser Tiefe realisiert werden können. Dies zeigt, dass für die Festlegung der maximalen Tiefenlage die Forderungen aus Sicht der Langzeitsicherheit ausschlaggebend sind. [NAB 14-81, S. 101]*

*Erfahrungen über mehr als hundert Jahre mit Untertagbauwerken zeigen, dass die Eisenbahn- und Strassentunnel im Opalinuston (vor allem im Faltenjura) meist ohne grössere Schwierigkeiten bei Überlagerungen von bis zu 800 m realisiert werden konnten. Dies gilt auch bei vergleichsweise starker tektonischer Überprägung mit zahlreichen Störungen, wie dies im Faltenjura der Fall ist. In Tunnelabschnitten mit erhöhter Frequenz von Scherzonen erfolgten aber zum Teil grössere Niederbrüche. [NTB 08-03, S. 145]*

**"Bautechnische Machbarkeit" gemäss Nagra:** Aus den Dokumenten geht hervor, dass die Bedeutung dieses Ausdrucks im Laufe der Jahre eine wesentliche Veränderung erfahren hat. In früheren Berichten zum Projekt Opalinuston verstand man darunter ausschliesslich die tunnelbautechnische Machbarkeit, d.h. die Möglichkeit der Erstellung der Anlagen nach den Regeln der Baukunst (z.B. Standsicherheit der Lagerkammern). Wir verweisen hierfür auf die einschlägigen Kapitel "Bautechnische Machbarkeit" in NTB

02-02 (S. 61) und NTB 10-01 (S. 115). Ab 2010 wird der Ausdruck mit allen wichtigen Aspekten des Lagerkonzeptes in Verbindung gebracht [NTB 10-01, S. 115]. So spricht man neu von der *"Technischen Machbarkeit bezüglich der Standsicherheit der Lagerkammern, der Auslegung der Lagerkammern, des Platzangebotes und der untertägigen Erschliessung der Lagerfelder"*. Später wurde ausserdem der Ausdruck *"Bautechnische Machbarkeit eines Tiefenlagers unter Berücksichtigung der vorgeschlagenen Standortareale"* [NTB 14-01, S. 335, Tab. 5.2.2] verwendet. Wir halten fest, dass sich in unserem Bericht der Ausdruck *"Bautechnische Machbarkeit"* im Wesentlichen auf die lagerbedingten Einflüsse auf die Langzeitsicherheit bezieht. Allerdings wird da und dort noch heute beispielsweise von *"Sicherheit und technischer Machbarkeit"* [NTB 14-03, S. 15] gesprochen. So entsteht der Eindruck, dass die Termini *"sicherheitstechnische Eignung, bautechnische Eignung"* [NTB 08-03, S. 6; NTB 14-01, S. 26] nicht scharf unterschieden werden.

Für eine umfassendere Darlegung der hier behandelten Problemstellung sei auch auf den Bericht [NTB 14-01, S. 21-25] hingewiesen, in welchem der vermutete nachteilige Einfluss der *"maximalen Tiefenlage der Lagerebene"* ausführlich erörtert wird. Der Gegenstand gehört nicht in die Kategorie der *"Sicherheitsfunktionen"* des übergeordneten Lagerkonzeptes, sondern nur zu den *"Prinzipien"*, welche gemäss Nagra bei der Festlegung der Barrierensysteme berücksichtigt werden müssen. Bei diesen Prinzipien handelt es sich um die

*Begrenzung des Einflusses ungünstiger Phänomene, inkl. lagerbedingter Einflüsse – Mit diesem Prinzip soll sichergestellt werden, dass der Einfluss ungünstiger Phänomene auf die Langzeitsicherheit begrenzt bleibt. Dazu gehören auch lagerbedingte Einflüsse wie z.B. die Bildung einer Auflockerungszone um die Lagerkammern und die Auswirkung einer pH-Fahne, der Gasbildung und einer erhöhten Temperatur auf die technischen und geologischen Barrieren.* [NTB 14-03, S. A2]

Es sei darauf hingewiesen, dass der vorliegende Bericht das Thema der Sicherheitsfunktionen des Gesamtkonzeptes des Barrierensystems – mit Ausnahme der Versiegelungsstrecken – nicht berührt. Hier handelt es sich im Wesentlichen um die Berücksichtigung folgender Prinzipien, gemäss NTB 14-03 (S. A1-2):

- *Zuverlässige Erstellung der geologischen Tiefenlager*
- *Begrenzung des Einflusses ungünstiger Phänomene, inkl. lagerbedingter Einflüsse*

## 2. AUFTRAG

Die Arbeitsgruppe Sicherheit Kantone/Kantonale Expertengruppe Sicherheit (AG SiKa/KES) hat dem Verfasser dieses Berichtes den Auftrag erteilt, eine Beurteilung der von der Nagra vorgelegten Untersuchungen zum Einfluss der grösseren Tiefenlage auf die Langzeitsicherheit und somit zur eingangs formulierten Problemstellung vorzunehmen<sup>3</sup>.

Dem Autor dieses Berichtes wurden folgende Kernfragen formuliert (AG SiKa/KES, 29.04.2015):

- Ist die Tiefenbeschränkung der Nagra auf 600 resp. 700 Meter für SMA resp. HAA nachvollziehbar oder sind auch tiefere Lager bis 900 Meter technisch möglich und machbar mit der zur Zeit*

<sup>3</sup> Der Vertrag wurde über das Bundesamt für Energie (BFE) abgewickelt.

*vorgesehenen Lagerauslegung (Querschnitte), dies immer unter den durch die Nagra beschriebenen Randbedingungen bezüglich der Konvergenzen und Auflockerungszonen?*

*b) Welche Zusammenhänge bestehen zwischen Lagerauslegung (Querschnitte), machbarer Tiefenlage und bezüglich der Konvergenzen und Auflockerungszonen?*

*c) Sind allenfalls konzeptionelle Anpassungen der Lagerauslegung aufgrund der Tiefenbeschränkungen, resp. der Randbedingungen der Konvergenzen und Auflockerungszonen zu prüfen?*

Die Hauptaufgabe besteht somit darin abzuklären, ob baubedingte Einflüsse physikalischer und chemischer Art – wie sie in den Dokumenten der Nagra beschrieben sind – in einer Tiefe von 900 m das langfristige Rückhaltevermögen der untertägigen Anlagen derart herabsetzen würden, dass man von einer solchen Tiefenlage absehen müsste. Unsere Untersuchungen beschränken sich dabei auf die Verhältnisse bei den HAA-Lagerstollen.

In Bezug auf die Langzeitsicherheit kann man fünf Zeitabschnitte ("*Betrachtungszeiten*") unterscheiden:

- i. Erstellung der Anlagen,
- ii. Betrieb der Anlagen (ca. 50 Jahre),
- iii. Eventuelle Rückholung der Behälter (50-100 Jahre),
- iv. Theoretisches Rückhaltevermögen der Behälter (10'000 Jahre),
- v. Wirksamkeit der Bentonitverfüllung, der Versiegelungsstrecken und des Wirtgesteins (10'000-1 Million Jahre).

Die Dichtheit der HAA-Einlagerungsbehälter ist theoretisch deutlich länger als die behördlich geforderte Mindestdauer von 1'000 Jahren. Nagra rechnet mit einer "*Lebensdauer*" von 10'000 Jahren oder mehr [NTB 02-05, S. 104; NTB 10-01, S. 147]. Bis alle Behälter versagen, dauert es ca. 200'000 Jahre. Der Modellierungszeitraum muss gemäss ENSI 1 Million Jahre betragen [NTB 14-01, S. 86; ENSI 33/70, 2010, S. 53].

Man sollte stets vor Augen halten, dass vom Standpunkt der Langzeitsicherheit aus jene hydraulischen Eigenschaften des Wirtgesteins massgebend sind, welche es in der Zeitperiode 10'000-1 Million Jahre haben wird. Um diese Eigenschaften abzuschätzen, geht man vom initialen, natürlichen Zustand aus, prüft die potentiell baubedingt veränderten Eigenschaften und untersucht die möglichen Langzeitprozesse, welche für die in diesem Zeitabschnitt entscheidenden Materialeigenschaften massgebend wären. Hierfür bedient man sich der wissenschaftlichen Erkenntnisse über die wahrscheinlichsten Langzeitprozesse, welche sich nach dem Verschliessen der Anlagen bis zum Ende des gesamten Betrachtungszeitraumes (1 Million Jahre) ergeben. Wie weiter unten erläutert wird, stehen hier Prozesse im Vordergrund, welche die Selbstabdichtung des Wirtgesteins bewirken können.

Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist, die Kohärenz der von der Nagra dargelegten Argumentation und somit die Haltbarkeit der Aussagen nach wissenschaftlichen Kriterien zu überprüfen. Zu diesem Zweck werden wir wichtige Textpassagen ausführlich zitieren<sup>4</sup> und diese einander gegenüberstellen. So kann sich der Leser selber ein Bild über die Folgerichtigkeit der Aussagen der Nagra machen. Bei den Zitaten und inhaltlichen Bezügen wird auf die präzise Quelle mit Anführung der entsprechenden Seitenzahlen Wert gelegt. Falls die Anzahl Zitate zum gleichen Gegenstand einen zu grossen Umfang annimmt, führen

---

<sup>4</sup> Für Auszüge aus den Dokumenten der Nagra liegt deren schriftliche Genehmigung (vom 15. Juni 2015) vor.

wir nur einen Teil im Text auf und verweisen für die weiteren Zitate auf die Anhänge 2 und 3. Hierbei streben wir das Zitieren aller Aussagen zu einem bestimmten Argument an.

Vom Verfasser wird nicht erwartet, vertiefte Untersuchungen, insbesondere Berechnungen irgendwelcher Art, durchzuführen oder neue Sachkenntnisse zu erarbeiten. Es wird auch nicht erwartet, dass der Inhalt der Dokumente generell auf alle Aspekte überprüft werde (im Sinne eines "reviewing"). Allfällige Mängel werden somit nur insofern thematisiert, als sie für die Ausführung des Auftrags relevant sind. Da sich die Dokumente der Nagra durch zahlreiche Äusserungen und Wiederholungen zum gleichen Gegenstand auszeichnen, ist es unvermeidlich, dass im vorliegenden Bericht häufig Wiederholungen vorkommen. Eine fachliche Stellungnahme unsererseits ist nur für Aspekte der Geomechanik und des Untertagbaues möglich.

### 3. GRUNDLAGEN

Es wurden uns von der Nagra alle verlangten Dokumente (siehe Referenzen) übermittelt und in Fachgesprächen wertvolle Informationen vermittelt. Der Verfasser nahm an drei Sitzungen der AG SiKa/KES teil; er konnte dort über den Fortschritt seiner Arbeit berichten und wertvolle Anregungen erhalten.

Ein Blick auf die Liste der Referenzen zeigt die grosse Zahl der von der Nagra verfassten Dokumente, in denen die Frage der bautechnischen Machbarkeit in grösseren Tiefenlagen in geringerem oder grösserem Umfang behandelt wurde. Diese Dokumente sind durch Querverweise miteinander verknüpft. Alleine der eigens unserem Thema gewidmete Arbeitsbericht NAB 14-81 verweist in seinem Literaturverzeichnis auf 15 weitere Technische Berichte der Nagra (NTB), welche in der Zeitspanne zwischen 1996 und 2014 entstanden sind. Es kommen drei umfangreiche Dokumente des ENSI hinzu und rund 50 Literaturangaben aus unterschiedlichsten Quellen des internationalen Schrifttums. Der Umstand, dass zu den diversen Problemstellungen auch mehrere von der Nagra beauftragte auswärtige Autoren zu unterschiedlichen Zeiten einen Beitrag geleistet haben, begünstigt das Auftreten voneinander abweichender Beurteilungen und Aussagen oder gar von klaren Widersprüchen. Bei einer Arbeit dieses Umfangs und der grossen Zahl der Autoren handelt es sich nicht nur um die Überprüfung von wissenschaftlichen Diskursen (Geotechnik, Tunnelbau), sondern auch um eine eigentliche Textkritik. Das Fehlen der Angabe von Seitenzahlen beim Anführen von Referenzen in den Nagra-Berichten hat die kritische Überprüfung der Dokumente sehr erschwert. Man bedenke dabei, dass die wichtigsten Technischen Berichte je bis zu 600 Seiten aufweisen.

Der Umfang der massgebenden Referenzen mag als erster Hinweis auf die Komplexität des behandelten Gegenstandes dienen. Die Eigenheit der Problematik besteht darin, dass hier Kenntnisse und Erfahrungen aus so unterschiedlichen Fachgebieten wie Ingenieurgeologie, Hydrogeologie, Felsmechanik, Tonmineralogie, Kontinuumsmechanik, Tunnelstatik, Bautechnik, Geochemie und Physik zur Lösung des Gesamtproblems einen Beitrag leisten. Vom methodischen Standpunkt aus zeichnet sich die Problematik dadurch aus, dass sowohl die von Anschauung und Plausibilitätsüberlegungen als auch von komplexen Berechnungsmethoden gestützten Erkenntnisse miteinander zu einer Schlussfolgerung führen sollten. Wir verweisen hier einerseits auf die lange Listen der im Einengungsverfahren verwendeten qualitativen Indikatoren [NTB 08-03; NTB 10-01] sowie die qualitative Bewertung der Wirtgesteine [NTB 14-01] und andererseits auf die Ergebnisse anspruchsvoller felsmechanischer Berechnungen [NAB 14-81] sowie umfangreicher Dosisberechnungen [NTB 08-05; NTB 10-01; NTB 14-01; NTB 14-03].

Die Nagra identifizierte 61 Prozesse und Parameter, die für die Sicherheit und technische Machbarkeit relevant sind, sowie 49 Indikatoren. Sie schreibt dazu:

*Grundsätzlich sind die Indikatoren und die relevanten Prozesse und Parameter über weite Strecken zwei unterschiedliche Sichtweisen auf die gleiche Wirklichkeit. [NTB 14-03, S. 15]*

und fährt fort:

*Bei zwei unterschiedlichen Sichtweisen auf die gleiche Wirklichkeit liegt es in der Natur der Sache, dass die resultierenden beiden Begriffslisten eng miteinander verknüpft sind, dass es aber in der Regel keine eindeutigen Zusammenhänge gibt. [NTB 14-03, S. 15]*

Diese Aussage zeigt, mit welcher logischen Schwierigkeit die Nagra bei dieser Thematik kämpfen muss. Die Begriffe "Auflockerungszone", "Länge der Transportpfade", "Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf bautechnische Machbarkeit", "Gebirgsfestigkeit" und "Verformungseigenschaften Wirtgestein" erscheinen beispielsweise sowohl als Indikatoren als auch als Prozesse [NTB 14-03, S. 15 & A-151 & A-153].

Unsere Stellungnahme folgt inhaltlich der Reihenfolge der von der Nagra aufgezählten Punkte a) bis c) (siehe Kapitel 1 oben) und nicht jener der Bedeutung der vorgebrachten Argumente. Wie sich herausstellen wird, wiegt die Bedeutung des Themas c) mit der Frage nach der Schädigung des Gebirges im Zusammenhang mit dem vertikalen Freisetzungspfad am stärksten.

#### **4. ZUVERLÄSSIGER BAU, BETRIEB UND VERSCHLUSS DER LAGERSTOLLEN**

Dieser Punkt betrifft in erster Linie den Aspekt a) in der Problemstellung (Kapitel 1), tangiert jedoch auch den Aspekt c).

Die Verhältnisse bei den geplanten HAA-Lagerstollen für die Referenztiefe von 600-700 m sind in Figur 1 dargestellt. Der Durchmesser des mittels einer Teilschnittmaschine oder einer Tunnelbohrmaschine mechanisch vorgetriebenen Stollens beträgt rund 3 m. Man erkennt die im Lagerbereich angeordnete vollflächige Spritzbetonverkleidung (Profile A und C) mit einem allfälligen Einsatz von Felsankern und die in der Versiegelungsstrecke vorgesehenen Stahlbögen als einzige Stützmassnahme (Profil B). Die Versiegelungsstrecken haben die Aufgabe, im Falle der Degradierung der Spritzbetonschale eine hierdurch vermutete hydraulische Längsläufigkeit zumindest abschnittsweise zu unterbinden. Zu diesem Zweck sollte die Bentonitfüllung zwischen den Stahlbögen satt an die Ausbruchsfläche anliegen, damit die volle Wirkung einer Abdichtung erreicht wird.

Im Profil B-B in Figur 1 ist die vollständige Verfüllung des Stollens dargestellt. Orientierende Berechnungen [NTB 10-01, S. 120 & 123] haben bereits ergeben, dass für den Stollen im Opalinuston in einer Tiefe von 700 m eine durchgehende Spritzbetonschale erforderlich wäre [NAB 14-81, S. I; NTB 14-01, S. 25]. Wie Figur 2 zeigt, ging man einerseits in früheren Projektstudien [NTB 02-02, S. 68; NTB 08-05, S. A2-4] noch von der Vorstellung aus, dass der Opalinuston derart gute mechanische Eigenschaften besitze, dass trotz längerer Betriebszeiten keine Spritzbetonschale, sondern lediglich Felsanker und Netze erforderlich seien. Entsprechend Figur 2 lautet die klare Aussage:

*In den Lagerstollen BE/HAA sind keine stabilitätsbedingten Einbauten notwendig. Felsanker und Netze genügen als Arbeitsschutz. [NTB 02-02, S. 144]*

Andererseits wird im jüngeren Bericht [NAB 14-81 (S. I)] nicht ausgeschlossen, dass in einer Lagertiefe von 600-700 m bis zu 300 mm Spritzbetonstärke notwendig werden könnten: "Die Spritzbetonschale soll auf 30 cm beschränkt werden". Wir vermuten, dass die Autoren von der Annahme ausgingen, dass in einer Lagertiefe von 900 m grössere Spritzbetonstärken als 300 mm notwendig wären. Andere Autoren haben jedoch eine abweichende Meinung vertreten:

*Die orientierende Vordimensionierung wurde im vollständig zersicherten Opalinuston bei einer Überlagerung von 900 m durchgeführt, was eine sehr günstige, abdeckende Kombination darstellt. [NIB 10-20, S. 27]*

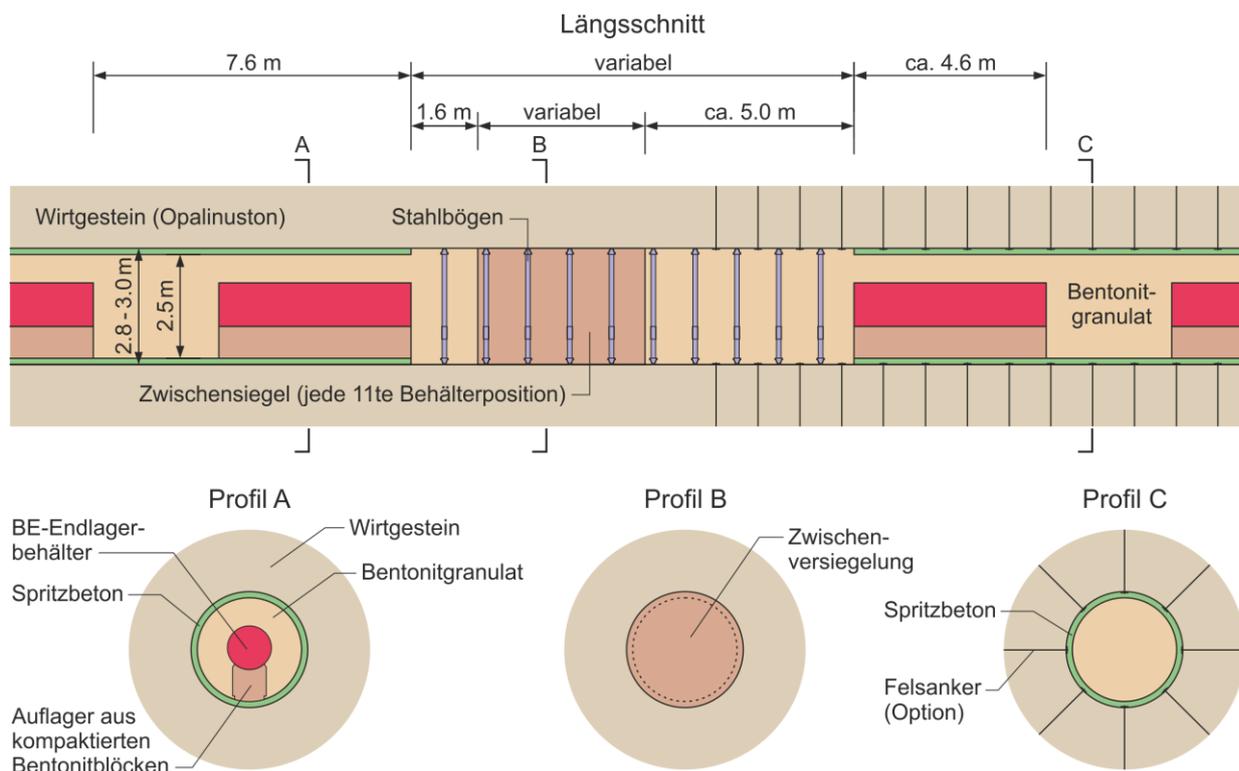


Fig. 1: Konzept für den Ausbau der BE/HAA-Lagerstollen für das Referenzkonzept in grossen Lagertiefen oder bei ungünstigen geomechanischen Bedingungen [NTB 10-01, S. 122].

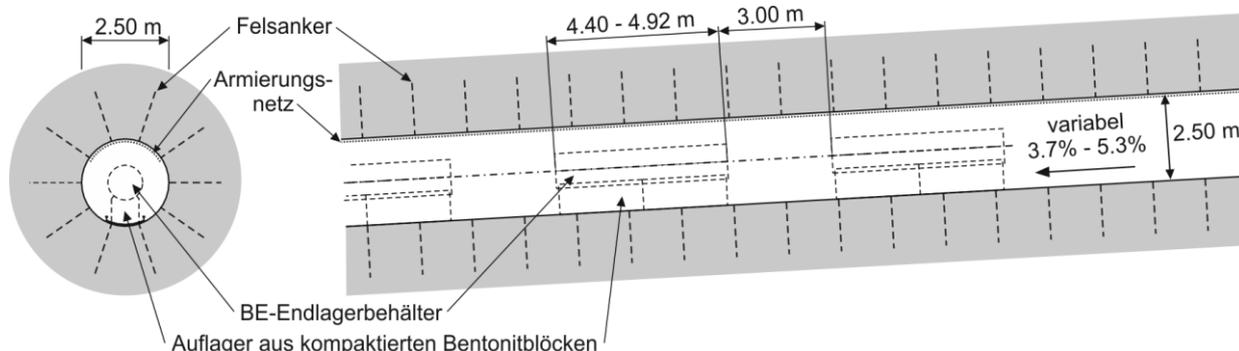


Fig. 2: Felssicherung im Lagerstollen gemäss NTB 08-05 (S. A2-4).

Diese Berechnungen führten zu einer bewehrten Spritzbetonschale von 200 mm Stärke, welche die Tragfähigkeit des Gesamtsystems gewährleisten soll. Für die Dosisberechnungen wurde denn auch später eine solche Spritzbetonstärke angenommen ("*a reasonable lining thickness is about 0.20 m*" [NTB 14-10, S. 49]).

Die Anforderungen an die Stabilität und Gebrauchstauglichkeit dieses Stollens ergeben sich aus der geplanten Betriebszeit von 50 Jahren und der Gewährleistung der Rückholbarkeit der Behälter aus dem verfüllten Stollen während einer weiteren Zeitspanne von 50 Jahren. Hieraus folgt, dass die Spritzbetonschale oder eine andere Art von Tunnelschale – wie im Tunnelbau üblich – für etwa 100 Jahre stabil bleiben sollten. Wir sind der Auffassung, dass die Rückholbarkeit der Behälter aus einem mit Bentonit vollständig verfüllten Stollen mit einer mechanisierten Vorgehensweise nur dann gewährleistet ist, wenn der Stollen seine Stabilität behält, d.h. die Verkleidung intakt bleibt und somit kein nachbrüchiger Fels ansteht.

Für die Strecken mit einer vollflächigen Spritzbetonschale dürfte eine solche Bedingung mit einer geeigneten Schalenstärke und Bewehrung im Opalinuston für 900 m Tiefe erfüllt werden<sup>5</sup>. Für die Versiegelungsstrecken mit dem alleinigen Stahlbogenausbau ohne jegliche Oberflächenversiegelung kann man die Stabilität des Hohlraumes jedoch nicht einmal für kürzere Zeiten selbst für 600 m Tiefe gewährleisten. Diese Feststellung haben wir bereits anlässlich zweier AG SiKa/KES-Sitzungen (Protokolle der Sitzungen von 01.06.2015 und 03.08.2015) sowie bei verschiedenen Besprechungen mit den Nagra-Ingenieuren P. Zuidema und T. Fries geäußert. Der Grund besteht darin, dass der Opalinuston auf die Luftfeuchtigkeit im Stollenraum durch Quellen reagiert; mit der Auswirkung der Veränderung der ursprünglich vorherrschenden Porenwasserspannungen muss ohnehin gerechnet werden. Wegen der Schichtung (Anisotropie) neigt der Opalinuston als Fels zudem ohne Ausbruchsicherung zu Niederbrüchen. Dies wurde bereits im Projekt Opalinuston des Entsorgungsnachweises 2002 [NTB-Berichte 2002] angesprochen: "*Niederbrüche können möglicherweise in den schichtparallelen Vortrieben der Stollen und Tunnel der Lagerzone im Opalinuston eintreten*" [NTB 02-02, S. 78].

Die Nagra geht von der Annahme aus, dass in einer Lagertiefe von 700 m "*geeignete Bedingungen vorliegen, die den Einbau des Verfüll- und Versiegelungsmaterials und deren technische Wirkung möglichst wenig beeinträchtigen*" [NAB 14-81, S. 7], nicht aber in einer solchen von 900 m. Da im Opalinuston selbst bei schonendem Ausbruch eine flächenhafte Sofortsicherung in beiden Tiefenlagen erforderlich ist und das Projekt hinsichtlich der Versiegelungsstrecken ohnehin überarbeitet werden muss, können wir uns der Einschätzung der Nagra in diesem Punkt nicht anschließen. Auch die folgende Bemerkung der Nagra ist nicht haltbar:

*Unter vollflächiger Ausbruchsicherung werden gebirgsstützende Massnahmen verstanden, welche im gesamten Lagerumfang einen Ausbauwiderstand erzeugen können. Eine klassische Stützung mit Stahlbögen im gesamten Umfang wird somit auch als vollflächige betrachtet.* [NTB 10-01, S. 120]

In diesem Zusammenhang sei auf die von der Nagra eingeführten sogenannten "*Entwurfsindikatoren (EI)*" hingewiesen, welche "*für die Beurteilung der maximalen Tiefenlage*" dienen sollten. Diese beziehen sich auf die Ausdehnung der "*plastifizierten Zone*", auf eine "*mittlere Konvergenz*" und auf die "*Ge-*

<sup>5</sup> Unsere Überlegungen sind hierbei bautechnischer Art und lassen eine mögliche Problematik infolge der Entwicklung hoher – abfallinduzierter – Temperaturen von bis zu 100° C in den ersten 100 Jahren ausser Acht: *Die maximale Temperatur an der Stollenwand ist nach rund tausend Jahren erreicht und beträgt ca. 95 °C.* [NTB 02-03, S. 618]

*birgstragfähigkeit und Tragwiderstand des Ausbaus*" [NAB 14-81, S. 33/34]. Man spricht von "Entwurfsindikatoren an die Gebirgsstörung" und "Entwurfsindikatoren zur Beurteilung der Gebirgsstörung bzw. -schädigung" [NAB 14-81, S. 49 & 51]. Wir lehnen diese Vorgehensweise ab, weil sie ein methodisches Vorgehen nur suggeriert, aber mit unklaren bzw. ad hoc formulierten Termini<sup>6</sup> operiert und diesbezüglich willkürlich formulierten Durchschnittswerten ("*normierte vertikale Ausdehnung der plastischen Zone*", "*normierte mittlere Konvergenz*") den Weg ebnet. Die Einführung von "*Berechnungsniveaus*" oder "*Parameterniveaus* ( $X_m$ ,  $X_k$  und  $X_d$ )" bei der Ermittlung der Form und Ausdehnung der plastischen Zone sowie der Konvergenzen ist zudem – wie weiter unten noch ausgeführt wird – fehl am Platz. Es ist bemerkenswert, dass hier eine vertikale Ausdehnung der plastischen Zone von 6.4 m zugelassen wird ("*Indikator EI-1*", S. 34), obwohl auf Seite 4 des gleichen Berichtes NAB 14-81 eine Begrenzung auf 5 m gefordert wird. Die "*angestrebte*" Beschränkung der Radialverschiebung am Ausbruchsrund bei den Versiegelungsstrecken von nur 1.6 cm (1% Konvergenz) ist von ingenieurmässigem Standpunkt aus unbegründet und unrealistisch (NAB 14-81, Tab. 4.1-1). Diese Feststellung ist durch Figur 5.5.3 in NAB 14-81 (S. 74) bzw. Figur 6-19 in NAB 14-87 (S. 168) belegt, aus welchen hervorgeht, dass man im Extremfall je nach "*Anisotropiefaktor*" und undrainierter Scherfestigkeit (GM5/6) bereits bei 700 m nahezu den 10-fachen Wert dieser Verschiebung erhält. Es ist nicht ersichtlich, ob bei den Kriterien von jenen Randverschiebungen gesprochen wird, die man im Tunnel messen könnte, oder von den totalen Werten einschliesslich der Ortsbrust vorauseilenden Verschiebungen. Obwohl alle Gebirgsmodelle eine starke Festigkeitsanisotropie aufweisen, sind sie – offensichtlich softwarebedingt – hinsichtlich Verformung dennoch isotrop. Dies ist ein Widerspruch, der die Ergebnisse der Berechnungen der Konvergenzen in allen weiteren Berichten bis zum Jahre 2014 relativiert:

*Im Gegensatz zu den Angaben zu den Gebirgseigenschaften wurde ein E-Modul von 5 GPa in allen Richtungen angenommen, was einem elastisch-isotropen Medium entspricht, weil das verwendete Rechenprogramm elastische Transversalisotropie – also unterschiedliche E-Moduli in verschiedenen Richtungen – nicht berücksichtigt. Da der E-Modul parallel zur Schichtung jedoch 10.5 GPa beträgt, werden die Deformationen vor allem in horizontaler Richtung überzeichnet. [NTB 02-02, S. 63]*

Man beachte, dass bei der Berechnung der Konvergenzen (Entwurfsindikator EI-2) ausserdem eine verschwindende Volumendilatanz angenommen wird, was die berechneten Konvergenzen in hohem Masse zu beeinflussen vermag [NAB 14-81, Anhang B-4].

**Fazit:** Aufgrund der vorhandenen Informationen über die mechanischen Eigenschaften des Opalinustons, diverser Untersuchungen der Nagra [NIB 10-14; NAB 09-07; NAB 10-42] und der Erfahrungen im Tunnelbau in grösseren Tiefen [sowie NIB 10-23] kann kein Zweifel über den zuverlässigen Bau, Betrieb und Verschluss der Lagerstollen bestehen. Diese Einschätzung wurde selbst von der Nagra so formuliert:

*Der Bau und Betrieb der Untertaganlagen kann bei Wahl eines geeigneten Bauvorgangs und bei Verwendung eines auf die geotechnischen Bedingungen ausgerichteten Ausbaus grundsätzlich sicher und zuverlässig bis in grössere Tiefen gewährleistet werden. [NAB 14-81, S. I]*

<sup>6</sup> Beispiele: "*Qualität der Ausbaubedingungen*", "*Funktionstüchtigkeit*", "*ungestörte vertikale Migrationsdistanz*", "*Langzeitsicherheit*", "*Beanspruchung des Gebirges*", "*Hohlraumstabilität im Grenzzustand*", "*Gebirgstragfähigkeit*", "*Tragwiderstand des Ausbaus*", "*Gebirgsverhältnisse*", "*Gebirgsstörung*".

Ein eigentliches Projekt steht allerdings noch aus. Insbesondere für die Konstruktion der Versiegelungsstrecken muss eine andere Lösung gefunden werden: Ein neues Konzept könnte darin bestehen, eine durchgehende Spritzbeton- oder Tübbingverkleidung angemessener Stärke und Bewehrung bis zum Zeitpunkt der Versiegelung zu belassen. In den Strecken mit der vorgesehenen Versiegelung könnte dann die Verkleidung abschnittsweise abgebrochen (Abschnittslängen 1.5-2.0 m) und dort die vollständige Verfüllung mit sattem Anliegen des Bentonits ans Wirtgestein durchgeführt werden. Es sei hier erwähnt, dass – vom Standpunkt der Langzeitsicherheit aus – die Notwendigkeit der Anordnung von Versiegelungsstrecken aufgrund der Ergebnisse der Dosisberechnungen nicht erforderlich wäre [NTB 14-10, S. 67; NTB 14-03, S. 137-144]. Die Frage der Versiegelungsstrecken kann somit als Kriterium für den Ausschluss von Lagertiefen von 900 m nicht herangezogen werden.

## 5. AUSWIRKUNG DER VON SPRITZBETON VERURSACHTEN PH-FAHNE AUF DIE LANGZEITSICHERHEIT

Diese Problemstellung, welche gemäss Nagra dem Aspekt c) entspricht, ist in den Figuren 3 und 4 erkennbar. Die an die Spritzbetonschale angrenzende Bentonitverfüllung und der Opalinuston können im Laufe der Zeit aufgrund chemischer Prozesse eine Degradierung erfahren, wodurch das Quellvermögen der Tonminerale verloren gehen oder zumindest beeinträchtigt werden könnte. Dies wiederum würde eine Verminderung des Nuklidrückhaltevermögens der Anlagen bewirken. Die Ausdehnung der so beeinflussten Materialbereiche wird als "pH-Fahne" bezeichnet.

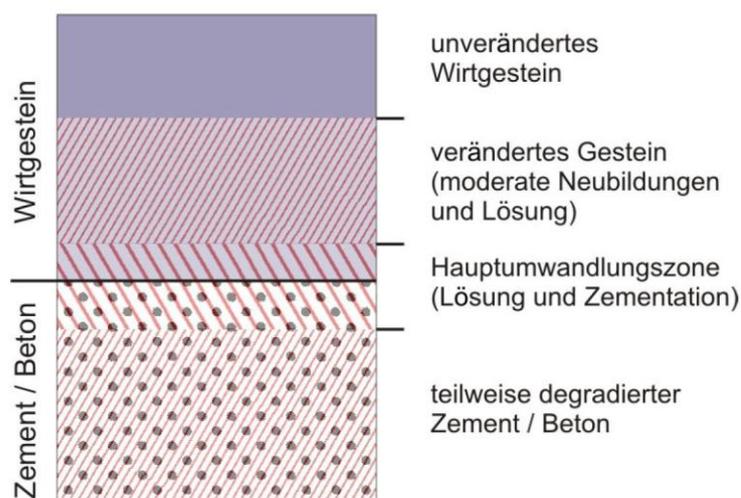


Fig. 3: Schematische Darstellung der Ausbreitung einer Hoch-pH-Fahne [NTB 02-03, S. 482].

Die Nagra hat diesem Thema umfangreiche Untersuchungen gewidmet und dazu seit 2002 in mehreren Berichten Aussagen gemacht. Diese sind jedoch inkonsistent: So soll die Mächtigkeit der Zone mit stark degradiertem Bentonit nach einzelnen Berichten nur "einige cm" [NTB 10-01, S. 147] oder "ca. 20 cm" betragen [NTB 14-03, S. A-17]. Nach anderen Berichten soll die Umwandlungszone langfristig eine maximale Ausdehnung von "wenigen Metern" [NTB 02-03, S. V] resp. "maximal 4 m" erreichen [NTB 02-05, S. 153, 164 und 175]. Gemäss anderen Quellen würde sich die pH-Fahne "weniger als 10 m" in das Gestein ausdehnen [NTB 08-05, S. 121]. Die erwähnten maximalen Eindringtiefen würden jedoch einen Zeitraum von Millionen von Jahren beanspruchen [NTB 02-05, S. 153; NTB 08-05, S. 121; NTB 10-01, S. 121].

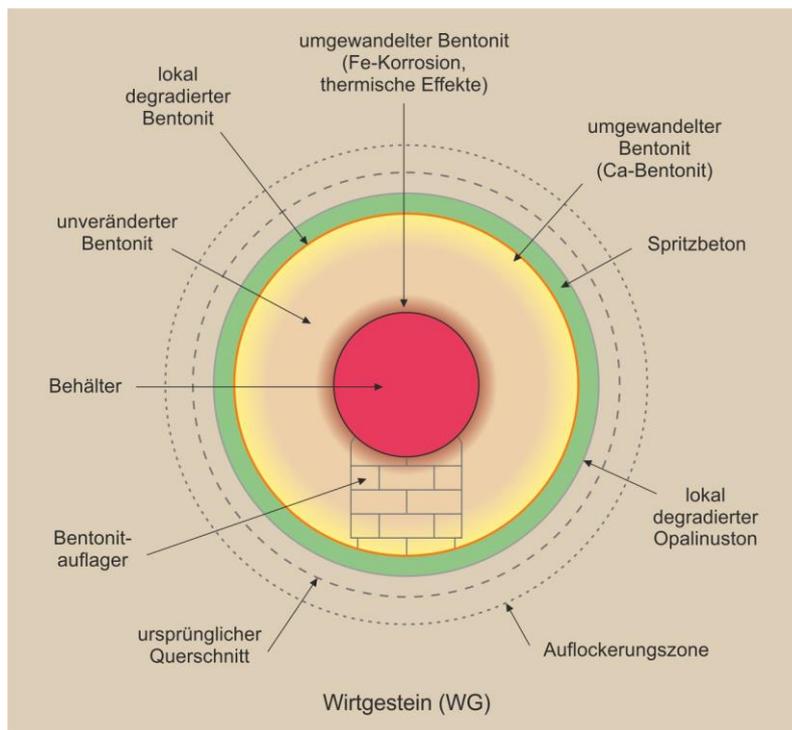


Fig. 4: Schematische Darstellung der zeitabhängigen Degradation der Bentonit-Verfüllung im Bereich der Zementverkleidung zu einem Zeitpunkt lang nach Verfüllung/Verschluss der BE/HAA-Lagerstollen [NTB 10-01, S. 148; NTB 14-03, S. A-19].

Ernsthafte Bedenken bezüglich einer Schädigung der technischen Barrieren infolge einer von der Spritzbetonschale ausgehenden pH-Fahne werden erst im Zusammenhang mit der Bewertung der Lagerperimeter in den Nagra-Berichten von 2014 zum Problem erhoben. Hier wird verlangt, dass "die Spritzbetonsstärke auf rund 30 cm beschränkt werden soll" [NAB 14-81, S. I; NTB 14-01, S. 25], da grössere Betonstärken, welche bei einer Lagertiefe von 900 m erforderlich wären, wegen der pH-Fahne nicht zugelassen werden dürften. Diese würden

*zu einer Schädigung insbesondere der technischen Barrieren (vor allem des Bentonits als Verfüll- und Versiegelungsmaterial) und nachgeordnet des umgebenden Wirtgesteins führen.* [NAB 14-81, S. I]

Auch anderswo werden ähnliche Bedenken geäussert:

*Im Sinne einer sicherheitstechnischen Optimierung soll der Einsatz von Spritzbeton und weiteren zementhaltigen Materialien bei den BE/HAA-Lagerstollen und Versiegelungstrecken soweit eingeschränkt werden, dass die Bentonitumwandlung begrenzt bleibt (kurzfristige Umwandlung von Na-Bentonit in Ca-Bentonit, langfristige Auswirkungen der pH-Fahne).* [NTB 14-01, S. 25]

Wir stossen in den Unterlagen insofern auf einen Widerspruch, als der Bericht NTB 14-03 – er beschäftigt sich mit den charakteristischen Dosenintervallen – der pH-Fahne keine nachteilige Wirkung auf das Nuklidrückhaltevermögen der Anlagen beimisst (S. A-17).

Eine durchgehende Spritzbetonschale für die HAA-Lagerstollen tritt – wie oben erwähnt – erst im Bericht NTB 10-01 (S. 122) in Erscheinung. Eine mögliche, damit verbundene Problematik, nämlich die nachteilige

ge Wirkung einer pH-Fahne, wird 2014 vertieft thematisiert [NAB 14-81]. Da eine Spritzbetonverkleidung für die SMA-Lagerkavernen wegen deren Profilgrößen von Anbeginn an vorgesehen war [NTB 02-02, S. 63], liegen allerdings entsprechende Untersuchungen und Einschätzungen über die Auswirkung einer pH-Fahne auf die Langzeitsicherheit bereits aus dem Jahre 2002 vor.

**Die pH-Fahne als irrelevantes Kriterium für eine Tiefenlagenbeschränkung:** In einigen Berichten geht man davon aus, dass *"die geochemischen Veränderungen keinen negativen Einfluss auf die Radionuklidrückhaltung hätten"* [NTB 02-03, S. V] oder *"die Gesamtretardierung der Radionuklide im Einflussbereich einer pH-Fahne der Gesamtretardierung im ungestörten Wirtgestein etwa ebenbürtig wäre"* [NTB 08-05, S. 121]. Einige Berichte gehen gar so weit, eine pH-Fahne geradezu als vorteilhaft zu bezeichnen:

*It is worth noting that in a diffusion-dominated system, a high pH plume may be to some degree beneficial, in that transport is slowed down to sealing effects and the radionuclide retention properties of the secondary minerals are at least as good as those of the original minerals. Moreover, an increased pH value leads to stronger sorption for many radionuclides.* [NTB 02-05, S. 153]

In anderen Dokumenten der Nagra finden sich Äusserungen, welche die Relevanz der pH-Fahne sowohl im Sinne eines Indikators als auch eines Prozesses [NTB 14-03, S. 151 & 153] zur Diskussion stellen. Für eine Beschränkung der Spritzbetonstärke auf 30 cm wegen einer pH-Fahne liegt allerdings keinerlei sachliche Begründung vor.

Die folgenden Zitate aus der Zeit vor 2014 – also vor den Untersuchungen, welche zur Zurückstellung des Standortes Nördlich Lägern geführt haben – zeigen eine konsequente Argumentation, welche der pH-Fahne keinerlei praktische Bedeutung beimisst. Sie beziehen sich einerseits auf die SMA-Lager, andererseits auf die HAA-Lagerstollen:

*Nach dem Verschluss des Lagers entstehen in den LMA-Tunneln durch Wechselwirkung mit dem Zementmörtel hochalkalische Porenwässer, welche mit dem Opalinuston über lange Zeiträume hinweg reagieren. Diese Umwandlungszone könnte langfristig eine maximale Ausdehnung von wenigen Metern erreichen. Die zu erwartenden Mineralneubildungen bewirken eine Reduktion der Porosität und eine Erhöhung der Sorptionskapazität. Die geochemischen Veränderungen haben somit keinen negativen Einfluss auf die Radionuklidrückhaltung.* [NTB 02-03, S. V]

*A limiting case for the spreading of a pH plume in a diffusion-dominated system involves the assumption that all of the cement in the near field will degrade and that the hydroxide released will diffuse into the Opalinus Clay and react with its component. Using a mass balance basis, a high pH plume would reach about 4 metres into the host rock, consuming about 10% of the total buffering capacity of the Opalinus Clay components (Mäder 2003). Such conditions can probably only be reached after an extremely long time span (millions of years).* [NTB 02-05, S. 153]

*In ungeklüfteten Tongesteinen ist eine pH-Fahne auf die nächste Umgebung des Zementnahfeldes beschränkt.* [NTB 10-01, S. 140]

*Die an den zementhaltigen Spritzbetonausbau angrenzende Bentonit-Verfüllung wird durch die pH-Fahne langsam und lokal degradiert. Die Mächtigkeit dieser Zone mit stark degradiertem Bentonit ist gering (ca. 20 cm), insbesondere auch weil der Einsatz von "Niedrig-pH"-Zement vorgesehen ist.* [NTB 14-03, S. A-17]

*Bezüglich des Transportes in radialer Richtung wurden Rechnungen durchgeführt, welche die potenziell degradierten Anteile der Transportbarriere in radialer Richtung berücksichtigen. Neben dem Fall "ohne Liner" wurden auch zwei Fälle "mit Liner" betrachtet. Während im Basisfall "mit Liner"*

*nur der äussere Teil der Bentonit-Verfüllung als degradiert angenommen wird, wird im abdeckenden Fall hypothetisch angenommen, dass die gesamte Bentonit-Verfüllung degradiert ist<sup>7</sup>. Der Vergleich mit Rechnungen "ohne Liner" (d.h. ohne Degradation) zeigt, dass die Barrierenwirkung des Nahfelds nur geringfügig beeinträchtigt wird und die Auswirkungen auf die berechneten Freisetzungsraten aus der Geosphäre vernachlässigbar sind. [NTB 10-01, S. 148/149; NTB 14-03, S. A-18/19]*

*Bezüglich des Transportes längs des BE/HAA-Lagerstollen kann festgehalten werden, dass allfällige axiale Wasserflüsse entlang des Interfaces Lagerstollen/Wirtgestein durch die Zwischensiegel praktisch unterbunden werden, da diese Zwischensiegel optimal ausgestaltet werden können (kein "Liner", bei Bedarf Verwendung von kompaktierten Betonitblöcken für einen grossen Teil des Querschnitts) und optimale Selbstabdichtung der Auflockerungszone besteht. Wird trotzdem ein latenter Transport entlang der BE/HAA-Lagerstollen unterstellt, so zeigen Freisetzungsberechnungen, dass selbst im Fall einer hypothetisch hohen hydraulischen Durchlässigkeit des Interfaces bzw. der Auflockerungszone von  $10^{-8}$  m/s die Änderung der berechneten Dosen gegenüber dem Basisfall (mit realistischen Parameterwerten) vernachlässigbar sind (Poller et al. 2014). [NTB 10-01, S. 149; NTB 14-03, S. A-18]*

Weitere Zitate zur Bedeutung der pH-Fahne finden sich im Anhang 2.

Das Argument mit Spritzbetonschalen von grösserer Stärke als 300 mm kann schon deshalb nicht für die Zurückstellung eines Standortes herangezogen werden, weil die statisch erforderliche Spritzbetonstärke weder für eine Lagertiefe von 700 m noch für eine solche von 900 m in einer der vorliegenden Problemstellung angemessenen Weise ermittelt wurde. Es wird diesbezüglich von stark divergierenden Berechnungsergebnissen berichtet.

Im Bericht NAB 09-07 wird für den Tiefenlagenbereich von 400-900 m eine mit Stahlfasern bewehrte Spritzbetonschale von 70 mm Stärke als eine der möglichen Ausbautypen dargestellt (S. 5 & Anhang 3). In den umfangreichen *"orientierenden felsmechanischen Berechnungen für BE/HAA-Lagerstollen"* [NAB 10-41] beträgt die Stärke der Spritzbetonschale 100 mm, und dies für eine Lagertiefe von 900 m und mit den ungünstigsten Annahmen hinsichtlich Seitendruckkoeffizient des primären Spannungszustandes (1.7) und des *"gestörten"* Gebirges. *"Die Stabilitätsnachweise der Hohlräume berücksichtigen die geplante Ausbruchssicherung."* Diese hat offensichtlich keine statische Funktion, sondern dient vor allem dazu, *"bestehende Modellungewisshheiten abzufangen und damit die bautechnischen Risiken zu verringern"* [NAB 10-41, S. 1]. Im Bericht NIB 10-20 (S. 23) wird ebenfalls im Sinne einer *"orientierenden Vordimensionierung"* für ein *"zersichertes Gebirge"* und eine Lagertiefe von 900 m eine Spritzbetonstärke von 200 mm ermittelt. Diese Spritzbetonstärke wird im Bericht NAB 14-8 (S. A-1 & C -1) übernommen.

**Fazit:** Die in einzelnen Berichten [NAB 14-81, S. I; NTB 14-01, S. 25] aufgestellte Behauptung, wonach die von einer Spritzbetonschale ausgehende pH-Fahne in Lagertiefen von 900 m schädliche Einflüsse in unannehmbarem Masse auf das Nuklidrückhaltevermögen des Bentonits und des Opalinustons ausüben könne, ist gemäss den Nagra-eigenen Untersuchungen unhaltbar.

Abschliessend verweisen wir auf eine Stellungnahme des ENSI (ehemals HSK) zur Frage der Bedeutung der pH-Fahne aus dem Jahre 2010 (S. 43):

---

<sup>7</sup> Für die degradierte Zone des Bentonits werden sehr ungünstige Annahmen bzgl. Porosität, Sorption, Diffusionskoeffizienten und Löslichkeit getroffen: Sorption um Faktor 10 reduziert, keine Löslichkeitslimitierung, Porosität für Anionen wird mit Porosität für Nicht-Anionen gleichgesetzt, Diffusionskoeffizienten für Anionen werden mit Diffusionskoeffizienten für Nicht-Anionen gleichgesetzt. [NTB 10-01, S. 149]

Das ENSI teilt die Einschätzung der Nagra, dass in einem hydraulisch gering durchlässigen homogen-porösen Wirtgestein wie z.B. Opalinuston der von der Phasenumwandlung betroffene Bereich räumlich limitiert ist und der Einfluss der Hoch-pH-Fahne auf die Rückhaltefähigkeit des Opalinustons von untergeordneter Bedeutung für die Sicherheit eines geologischen Tiefenlagers ist. [HSK 35/99, S. 216]

## 6. HORIZONTALER FREISETZUNGSPFAD INFOLGE DER ZERSETZUNG DER SPRITZBETONSCHALE

Im Bericht NAB 14-81 wird auf dieses Thema nicht explizit eingegangen. Da es mit der aufgeworfenen Problematik der Verwendung grösserer Mengen von zementhaltigen Baumaterialien zusammenhängt und in anderen Berichten thematisiert wird, widmen wir uns ihm im Folgenden.

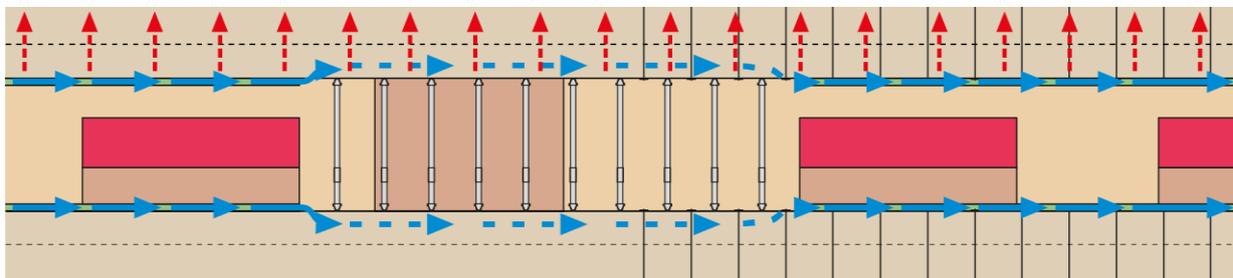


Fig. 5: Freisetzungspfad entlang der Lagerstollen und Zwischensiegel [NAB 14-81, S. 5].

Die Nagra geht von der Vorstellung aus, dass die Spritzbetonschale der HAA-Lagerstollen im Laufe der Zeit einerseits infolge Gebirgs- oder Quelldrucks oder einer gemeinsamen Einwirkung mit der Bentonitverfüllung Risse aufweisen und andererseits durch chemische Prozesse degradiert sein würde. Die Folge wäre ein präferentieller horizontaler Freisetzungspfad (Fig. 5).

*Die Zementverkleidung wird nach jeweils ca. 10 Endlagerbehältern mit einem "Zwischensiegel" unterbrochen, um einen ungehinderten Wasserfluss in der (degradierten) Spritzbetonverkleidung entlang der Stollen zu verhindern. [NTB 10-01, S. 121]*

*Die hydraulische Durchlässigkeit des zementhaltigen Spritzbetonausbaus wird im Vergleich zum Opalinuston bzw. der Bentonit-Verfüllung erhöht sein (Rissbildung, Degradation, Erhöhung der Porosität). [NTB 10-01, S. 147]*

*In a further model variant, the water flow and radionuclide transport in tunnel sections backfilled with bentonite/sand mixture is assumed to occur in the tunnel liner (shotcrete). [NTB 02-06, S. 54]*

Die Untersuchungen der Nagra zeigen, dass eine gerissene oder degradierte Spritzbetonschale zwar wegen einer möglicherweise um mehrere Potenzen erhöhten Durchlässigkeit einen präferentiellen Freisetzungspfad darstellen könnte, ihre Bedeutung für die Dosis jedoch vernachlässigbar gering ist (Fig. 6).

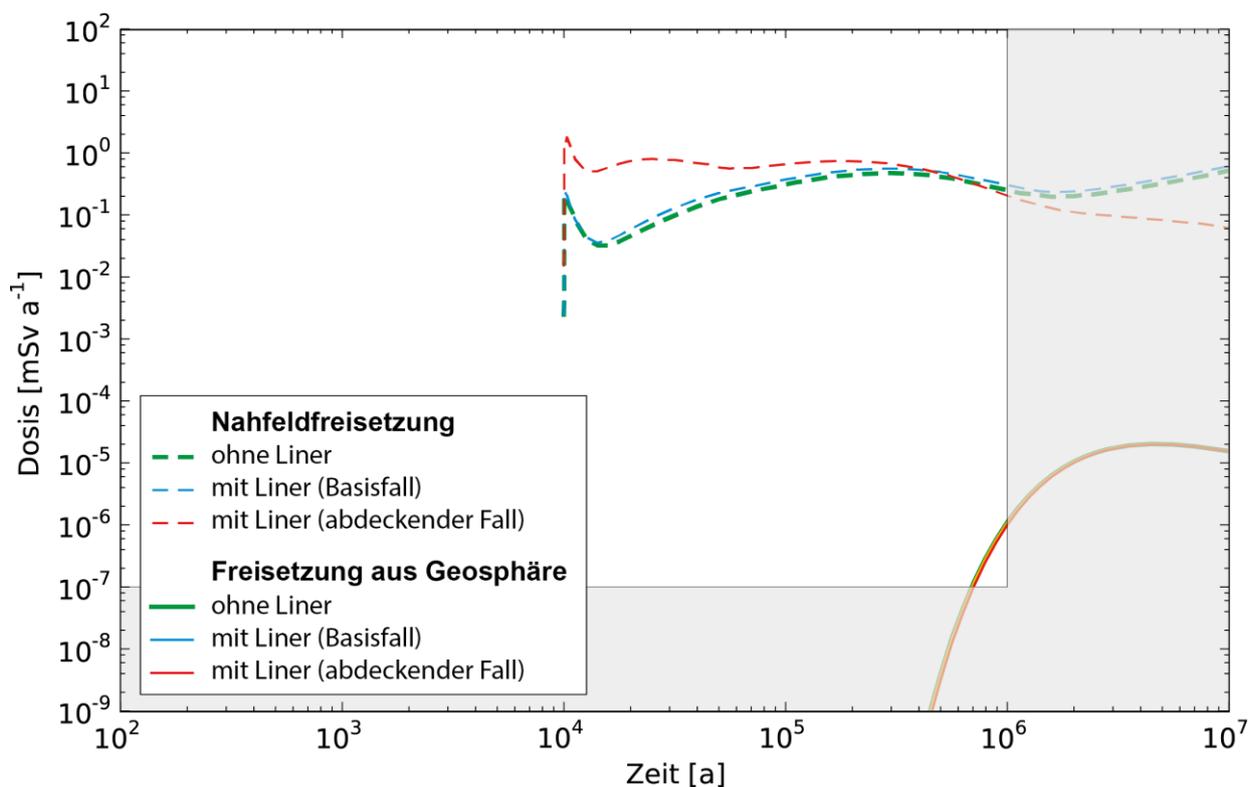


Fig. 6: Berechnete Dosen für den BE-Teil des HAA-Lagers mit und ohne Spritzbetonausbau ("Liner") [NTB 10-01, S. 149].

Im Bericht NTB 10-01 (S. 149) wird – wie erwähnt – ausgeführt:

*Wird ein lateraler Transport entlang der BE/HAA-Lagerstollen unterstellt, so zeigen die Freisetzungsberechnungen, dass selbst im Fall einer hypothetisch hohen hydraulischen Durchlässigkeit des Interfaces bzw. der Auflockerungszone von  $10^{-8}$  m/s die Änderung der berechneten Dosen vernachlässigbar ist. (Fig. 6)*

*Assuming an effective hydraulic conductivity of the fractured liner of  $10^{-7}$  m/s (10 times higher than the value assumed for the L/ILW emplacement room backfill), the flow through the liner for a unit hydraulic gradient (hydraulic conductivity times cross-sectional area) is about  $3 \times 10^{-7}$  m<sup>3</sup>/s, which is in the order of the total flow through the operations tunnel and its EDZ for unit gradient in case SA4. [NTB 14-10, S. 49]*

**Fazit:** Es ist anzunehmen, dass die erforderliche Spritzbetonstärke für eine Lagertiefe von 900 m grösser sein wird als für eine solche von 700 m. Da eine degradierte Spritzbetonschale auf die berechneten Dosen jedoch keinen massgeblichen Einfluss hat, sollte dieser Aspekt für eine Zurückstellung eines Standortes mit einer Lagertiefe von 900 m nicht in Betracht gezogen werden.

## 7. AUSWIRKUNG DER VON DEN STAHLBÖGEN VERURSACHTEN GASENTWICKLUNG AUF DIE LANGZEITSICHERHEIT

Im Schlüsselbericht NAB 14-81 zum Thema "Tiefenlage" wird dieses Problem (Aspekt c) wie folgt angesprochen:

Weiter ist auch die Menge an verwendetem Stahl aufgrund der möglichen Gasentwicklung zu begrenzen (S. 1) .... Zudem soll auch die Menge an Stahl (z.B. Armierung, Stahlbögen, Felsanker) und Organika (z.B. Zusatzmittel im Beton, GFK-Anker) aufgrund der möglichen Gasentwicklung und anderer unerwünschter Interaktionen beschränkt bleiben. (S. 7)

Gas pressure could be reduced efficiently by minimising gas generation of the tunnel installations. [NAB 14-10, S. 60]<sup>8</sup>

Ohne bauliche Massnahmen ist nicht vollständig auszuschliessen, dass das im Lager gebildete Gas die Barriereneigenschaften des Opalinustons beeinträchtigt. Durch bauliche Massnahmen (Schaffung von untertägigem Speicherraum, kontrollierte Ableitung des Gases über die Versiegelungstrecken) kann dies jedoch verhindert werden. [NTB 08-03, S. 162]

Die Freisetzung von im Lager produzierten Gasen kann einen Einfluss auf die Langzeitsicherheit der Gesteinseigenschaften und damit auf das langfristige Transportverhalten der Radionuklide im Nahfeld und in der Geosphäre haben. Wichtige Einflussgrössen sind die Gasproduktionsraten, das Gastransport- und Gasspeichervermögen des Wirtgesteins sowie die Möglichkeiten für bauliche Massnahmen zur Speicherung und Ableitung der im Lager produzierten Gase. [NTB 08-05, S. 175]

Es kann davon ausgegangen werden, dass die Korrosion relativ rasch nach Installation der Sicherungsmittel beginnt. [NAB 09-07, S. 11]

In den Technischen Berichten NTB 02-03 bis NTB 14-10 wird das Thema der Gasentwicklung infolge Korrosion der Stahlbehälter (Produktion von H<sub>2</sub>) ausführlich behandelt, nicht jedoch eigens infolge der verwendeten Baumaterialien aus Stahl. Es darf – wie weiter unten noch ausgeführt wird – angenommen werden, dass die Korrosion des Baustahls infolge seiner tieferen Qualität nicht gleichzeitig mit jener des Edelstahls der Behälter stattfindet, sodass eine gleichzeitige Erhöhung der Gasproduktion auszuschliessen ist.

In Figur 7 ist das Schema des möglichen Radionuklidtransports lateral durch das Wirtgestein und longitudinal durch eine mögliche Auflockerungszone (EDZ) dargestellt [NTB 02-05, S. 279].

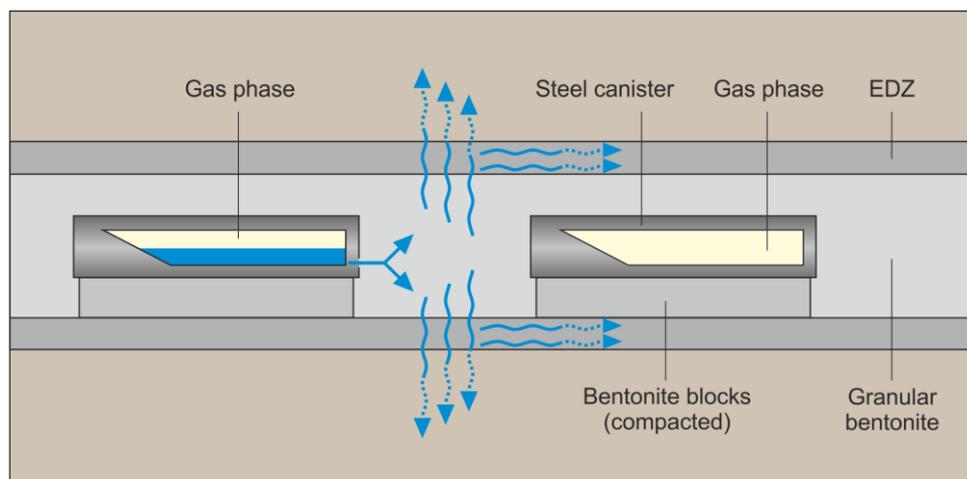


Fig. 7: Scheme with the conceptual model for gas-induced release of dissolved radionuclides through the Opalinus Clay [NTB 02-05, S. 279].

<sup>8</sup> Es wird allerdings gerade hinzugefügt: "It can be concluded that the build-up of gas-overpressures around the SF/HLW nearfields is moderate and will neither impair the safety functions of the engineered barriers nor those of the host rock".

Die Erkenntnisse über die Auswirkung der Korrosion der Stahlbehälter auf die Langzeitsicherheit der Lager können zweifelsfrei auf die Einschätzung der Auswirkung des Einsatzes von Baumaterialien aus Stahl übertragen werden. Es ist zu beachten, dass Stahlbögen gemäss den Plänen der Nagra nur in Ausnahmefällen verwendet werden sollten, da das vorliegende Konzept der Versiegelungsstrecken gemäss Figur 1 nach unserer Auffassung aufgegeben werden muss. Mengenmässig würden somit die Stahlbögen gegenüber den Stahlbehältern ohnehin zurücktreten. Eine zeitliche Überlappung der Gasproduktion der Stahlbögen mit jener der Stahlbehälter ist – wie aus der folgenden Feststellung hervorgeht – ausgeschlossen:

*For the reference gas generation rates, the peak pressure occurs after 2'000 years, when the corrosion of the tunnel installations stopped. [NAB 14-10, S. 57]*

Die nachfolgenden Aussagen in diversen Technischen Berichten seit 2002 [NTB 02-05; NTB 02-06] widerlegen eindeutig die obige Behauptung betreffend einer Verringerung der Langzeit-Barrierenwirkung infolge der Stahlkorrosion in den Lagerstollen [NTB 02-05, S. 285]:

*Gasbildung in einem geologischen Tiefenlager kann grundsätzlich die folgenden Auswirkungen auf die Langzeitsicherheit haben:*

- 1. Bildung von neuen Freisetzungspfaden für Radionuklide im Wirtgestein (graduelle temporäre Veränderung der Wirtgesteinseigenschaften)*
- 2. Auspressen von Porenwasser mit Radionukliden*
- 3. Transport von volatilen Radionukliden in der Gasphase. [NTB 08-05, S. 124]*

*Es wurde aufgezeigt, durch welche Prozesse das Gas durch das Wirtgestein transportiert wird und dass diese Prozesse die Langzeit-Barrierenwirkung des Wirtgesteins nicht signifikant beeinträchtigen. [NTB 02-03, S. 336-341; NTB 02-05, S. 155-160; NTB 04-06, S. 145]*

*Es wurde gezeigt, dass keine der beiden grundsätzlich möglichen Auswirkungen (Auspressen von Porenwasser mit Radionukliden und Transport von volatilen Radionukliden in der Gasphase) die Langzeitsicherheit in Frage stellt. [NTB 08-05, S. 124]*

Weitere Zitate bekräftigen diese Aussagen:

*Die vorhandenen Berechnungen zeigen, dass die Auswirkungen der Gasbildung (kein signifikanter Einfluss auf die Barrierenwirkung des Wirtgesteins, geringe Dosen als Folge der Verdrängung von Nahfeldporenwässern bzw. durch Transport von volatilen Radionukliden in der Gasphase) klein sind und in den Dosisberechnungen für die provisorischen Sicherheitsanalysen nicht explizit zu berücksichtigen sind. [NTB 10-01, S. 145; NTB 14-03, S. A-15]*

*Die Gasproduktionsrate (infolge Korrosion der Stahl-Behälter) ist bei den HAA deutlich geringer als bei den SMA. Die Gasfreisetzung wurde in Untertage- und Laborexperimenten untersucht. Die bisherigen Ergebnisse zeigen, dass die Freisetzungsraten bei geeigneter Auslegung des Lagers keine kritische Beeinträchtigung der Barriereneigenschaften des Opalinustons bewirkt. [NTB 14-01, S. 145]*

*The results of the experiments and studies performed illustrate that there is sufficient scientific understanding of gas production and release from a repository sited in Opalinus Clay to make reliable bounding assessments of the impacts on the disposal system and on radiological consequences. ... Diffusion and advection of dissolved gases will make no significant contribution to release of gas from the waste emplacement tunnels. [NTB 04-06, S. 145]*

Wir verweisen hier ausserdem auf eine Stellungnahme des ENSI betreffend Gasbildung und -transport aus dem Jahre 2010, in der allerdings Stahlbögen als mögliche Quelle von Gasbildung und somit als Kriterium für die Beurteilung Langzeitsicherheit nicht erwähnt werden:

*Die durch die Kriterien "Beständigkeit der Standort- und Gesteinseigenschaften" und "Lagerbedingte Einflüsse" angesprochenen gasrelevanten Aspekte für ein HAA-Lager im Opalinuston wurden bereits im Rahmen des Projekts Entsorgungsnachweis beurteilt (HSK 35/99). Die Überprüfung zeigte, dass der von der Nagra erbrachte Nachweis generell robust ist und dass irreversible Schäden im Wirtgestein durch auftretende Gasdrücke nicht zu erwarten sind. [ENSI 33/70, S. 49]*

Es soll hier noch auf das Verhältnis der Stahlmengen der Behälter zu jenen der Ausbruchsicherung (Stahlbogen, -netze, -anker) hingewiesen werden [NTB 02-02, S. 29 & 93; NAB 14-81, S. A-2]: Die BE-Behälter sind rund 30 t schwer und werden im Abstand von rund 8 m positioniert. Die HAA-Behälter haben ein Gewicht von rund 8.5 t und werden in einem Abstand von 4.0 m eingebracht. Somit beträgt die Stahlmenge der Behälter rund 3.5 t bzw. rund 2.0 t je Tunnelmeter. Die durch eine Verstärkung der Tunnelsicherung denkbare maximale Erhöhung der Stahlmengen würde kaum 200 kg je Tunnelmeter überschreiten (TH-Profil 44 statt TH-Profil 25). Die infolge der grösseren Tiefenlage allenfalls erforderlichen grösseren Stahlmengen könnten somit höchstens 10% jener der Stahlbehälter betragen. Hierbei wurden die gemäss Entsorgungsnachweis 2002 eingebrachten Stahlmengen von je 170 kg je Laufmeter (für Schienen, Schwellen, Felsanker, Sicherungsgitter etc.) ausser Acht gelassen [NAB 09-07, S. 17]. Bedenkt man weiter, dass – wie bereits erwähnt – die Korrosion des Baustahls nicht gleichzeitig mit jener der Behälter stattfindet, so ist unverständlich, warum die Nagra die Gasentwicklung infolge einer allfällig stärkeren Ausbruchsicherung überhaupt zu einem Kriterium für die Standortwahl erhoben hat.

**Fazit:** Die Behauptung, wonach eine grössere Menge an Baustahl, die zur Stabilisierung des Gebirges in einer Tiefe von 900 m verwendet werden müsste, das Rückhaltevermögen des Barrierensystems in unzulässiger Weise verringern würde, darf als unhaltbar betrachtet werden. Es wurden zudem weder für die Referenztiefe von 700 m noch für eine Tiefe von 900 m die zur Stabilisierung des Gebirges erforderlichen Stahlmengen mit einer der Problemstellung angemessenen Verlässlichkeit ermittelt.

## 8. MASSGEBENDER VERTIKALER FREISETZUNGSPFAD UND PLASTISCHE ZONE

Dieses Kapitel bezieht sich auf den im Kapitel 1 (Problemstellung) beschriebenen Aspekt c).

Eines der wichtigsten Kriterien der Nagra für die Zurückstellung eines Lagerstandortes in einer Tiefe von 900 m betrifft die Forderung nach einem *"ungestörten bzw. unbeschädigten vertikalen Freisetzungspfad von mindestens 35 m Länge"*. Man geht dabei von der Vorstellung aus, dass das Gebirge in rechnerisch ermittelten plastischen Zonen *"gestört"* bzw. *"beschädigt"* sei und deshalb eine erhöhte Durchlässigkeit aufweise. Diese Vorstellung kommt in zahlreichen Formulierungen zum Ausdruck:

*Angestrebt werden maximale Tiefenlagen, bei welchen das Gebirge unabhängig vom Ausbau nicht zu stark gestört wird, bzw. die plastifizierte Zone innerhalb der angestrebten Ausdehnung bleibt. [NAB 14-81, S. 4]*

*Indirekt werden die lagerbedingten Einflüsse wo notwendig bei der Einengung direkt berücksichtigt, z.B. durch Begrenzung der maximalen Tiefe der Lagerebene wird die Grösse der Auflockerungszone begrenzt. [NTB-01, S. 26]*

*Für die BE/HAA-Lagerstollen wird angestrebt, die plastische Zone so weit zu beschränken, dass die vertikale Migrationsdistanz im ungestörten Opalinuston ca. 35 m beträgt. [NTB 14-01, S. 25]*

*Sensitivitätsstudien zeigen, dass das Wirtgestein als Transportbarriere eine sehr hohe Wirksamkeit hat, sofern ein Schichtpaket von Opalinuston eine Mächtigkeit  $M_{min,intakt}$  von rund 35 m (HAA-Lager) hat. [NAB 14-81, S. 4]*

*Kritisch ist vor allem die Beschränkung der Ausdehnung der plastifizierten Zone ( $p/a \leq 4$ , d.h. ungestörter Migrationspfad  $>$  ca. 35 m). [NAB 14-81, S. 101]*

Die Festlegung der Zahlenwerte "5 m für die plastische Zone" bzw. "35 m für den vertikalen Freisetzungspfad" erweckt den Eindruck einer scheinbaren Leistungsfähigkeit der verfügbaren wissenschaftlichen Hilfsmittel, die jedoch wegen der dem Problem innewohnenden Unsicherheiten völlig unmöglich ist (siehe Anhang 3). In Wirklichkeit wurden die vertikale Erstreckung der plastischen Zone im Jahre 2008 von der Nagra einfach grob abgeschätzt und die Länge von 35 m für den Abstand bis zum Schichtrand mit dem unteren Eckwert der Mächtigkeit des Opalinustons (80 m) errechnet:

*Die vertikale Transportpfadlänge setzt sich aus dem Anteil innerhalb des Wirtgesteins (bestimmt durch die halbe Schichtmächtigkeit abzüglich des Radius der Lagerkammern inkl. Auflockerungszone) und aus den wirksamen Anteilen innerhalb der oberen bzw. unteren Rahmengesteine zusammen. Für den Durchmesser der Lagerkammern inkl. Auflockerungszone wird vereinfacht ein Wert von 20 m (für SMA-Lagerkavernen) bzw. 5 m (für HAA-Lagerstollen) angenommen. [NTB 08-05, S. A1-75]*

Diese Betrachtungsweise wurde 2010 und 2014 wieder aufgenommen [NTB 10-01, S. 139; NTB 14-01, S. 144; NTB 14-03, S. 44; NTB 14-10, S. 15]. Als Beispiel verweisen wir auf folgende Aussage:

*The persistence of an EDZ may also affect vertical transport of radionuclides through the host rock towards the release points at the upper and lower boundaries. Consistently with Nagra (NTB 10-01), the vertical extent of the SF/HLW emplacement rooms including the EDZ is estimated to be 5 m and the respective value for the ILW and the L/ILW emplacement is taken to be 20 m. [NTB 14-10, S. 15]*

Im Zuge der Untersuchungen zur Beurteilung der Tiefenlage bei der Abgrenzung und Beurteilung der Lagerperimeter ging man nun den umgekehrten Weg: Zuerst wurde der Freisetzungspfad aufgrund unzutreffender Argumente mit 35 m fixiert und davon die maximale vertikale Erstreckung der plastischen Zone mit 5 m abgeleitet [NTB 14-01, S. 25; NAB 14-81, 101]. Dieser Schritt öffnete den Weg zu zahlreichen Untersuchungen über die "Störung und Beschädigung" des Gebirges durch eine "Auflockerungszone", die mit wenigen Ausnahmen durch eine plastische Zone dargestellt wurde. Ohne den willkürlichen Akt einer Festlegung des Grenzwertes von 35 m hätte man geringen Anlass gehabt, umfangreiche Modellrechnungen durchzuführen, von welchen in verschiedenen Nagra-Dokumenten berichtet wird. Wir stossen hier auf den Ursprung zahlreicher Widersprüche, welche in den Nagra-Berichten zum Vorschein kommen.

Um den Sachverhalt näher zu betrachten, wenden wir uns der Figur 8 zu. Man sieht dort, wie bei einer gegebenen Mindestmächtigkeit des Wirtgesteins und einer gegebenen Länge des "unbeschädigten vertikalen Freisetzungspfads  $M_{\min, \text{intakt}}$ " die vertikale Ausdehnung der plastischen Zone  $\rho_v$  verläuft. Mit den von der Nagra angegebenen Werten von 80 m für den "unteren Eckwert des Opalinustons" [NTB 14-01, S. 79] und dem geforderten Wert von  $M_{\min, \text{intakt}} = 35$  m ergibt sich die Bedingung  $\rho_v \leq 5$  m. Bei einem Stollenradius von  $a = 1.5$  m erhalten wir so das zugelassene Verhältnis von  $\rho/a \leq 3.3$ .

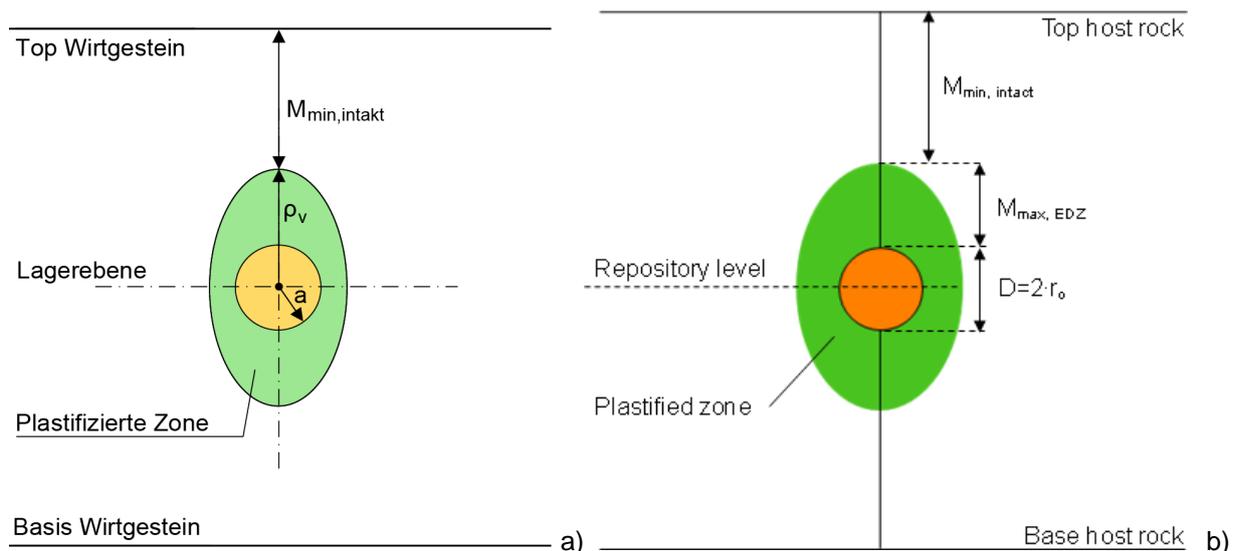


Fig. 8: Maximale Ausdehnung der plastifizierten Zone, hergeleitet aus der Mindestmächtigkeit des ungestörten Wirtgesteins, gemäss a) [NAB 14-81, S. 5] bzw. b) [NAB 14-87, S. 155].

Man beachte, dass in Figur 8b) die "plastifizierte Zone" mit "excavation damaged zone (EDZ)", d.h. "Auflockerungszone (AUZ)", gleichgesetzt ist. In der Tat werden in den Berichten der Nagra die Begriffe "Auflockerungszone" und "plastische Zone" weitestgehend als Synonyme verwendet.

Die unbegründete Forderung nach einer Beschränkung der Ausdehnung der plastischen Zone auf einen bestimmten Wert kommt in diversen Nagra-Berichten in unterschiedlichen Formulierungen vor:

*Angestrebt werden maximale Tiefenlagen, bei welchen das Gebirge unabhängig vom Ausbau nicht zu stark gestört wird bzw. die plastifizierte Zone innerhalb der angestrebten Ausdehnung beschränkt bleibt. [NAB 14-81, S. 4]*

*Für die Festlegung der maximalen Tiefenlage sind die Forderungen aus Sicht der Langzeitsicherheit ausschlaggebend. Dazu gehört insbesondere die Begrenzung des vertikalen Migrationsweges im Wirtgestein in der direkten Umgebung der Lagerkammern. [NAB 14-81, S. 101]*

*Eine übergeordnete Anforderung ist ... die Begrenzung der Störung des Wirtgesteins um die Lagerkammern auf einen beschränkten Teil der vertikalen Migrationsdistanz. [NTB 14-01, S. 23]*

*Die Störung des Wirtgesteins soll auf einen möglichst kleinen Teil des vertikalen Migrationsweges beschränkt werden; dazu ist die plastifizierte Zone um die Lagerkammern genügend klein zu halten. [NAB 14-81, S. 3]*

In einzelnen Berichten spricht man auch von einer "vertikalen Ausdehnung der HAA-Lagerstollen (ca. 5 m, inkl. Auflockerungszone)" [NTB 14-01, S. 144]. Bei einem Durchmesser des Lagerstollens von 3.0 m verbleiben somit 3.5 m für die Stärke der Auflockerungszone, in welcher für den vertikalen Freisetzungspfad offenkundig ein verschwindendes Rückhaltevermögen (unbeschränkte Durchlässigkeit) angenommen wird. Für die Dosisberechnungen in horizontaler Richtung wird hingegen eine Stärke der Auflockerungszone von nur 0.7 m und für den entsprechenden Bereich eine Durchlässigkeit  $k = 10^{-10}$  m/s angenommen. In Vertikalrichtung wird somit die Auflockerungszone nicht "als Teil des Migrationsweges" berücksichtigt, wie dies im Schlüsselbericht NAB 14-81, S. 101, behauptet wird.

## 8.1 Ungestörter bzw. unbeschädigter vertikaler Freisetzungspfad $M_{\min, \text{intakt}}$

Bereits 2002 wurde der Begriff "vertikaler Freisetzungspfad" beim Opalinuston thematisiert. Allerdings ist dort von einer Beeinträchtigung des Freisetzungspfades infolge einer plastischen Zone bzw. Auflockerungszone noch keine Rede. Man spricht vielmehr von "Transportdistanzen" von 40-50 m:

*Length of vertical transport path in Opalinus Clay above and below emplacement tunnels: Typical path length of ~ 50 m, minimum path length of 40 m. "What if" case based on 30 m path length. [NTB 02-05, Tab. 6.6.1, S. 176 & 245]*

*In the Reference Case, the transport distance in the Opalinus Clay is assumed to be at least 40 m. To test the robustness of the disposal system, the transport distance is reduced to 30 m in the present conceptualisation, which is outside the range of scientific evidence for all waste packages emplaced ("what if?"). Results: For the case of a decreased transport distance in Opalinus Clay, the summed dose maximum are  $2.1 \times 10^{-7}$  mSv  $a^{-1}$  (HLW), i.e. less than a factor 2 increased in comparison to the Reference Case doses. [NTB 02-05, S. 305]*

Die im Jahre 2008 ausgeführten Sensitivitätsanalysen bestätigen die Aussagen über den verhältnismäßig geringen Einfluss einer Reduktion der Länge des Freisetzungspfades (Fig. 9 und Fig. 10):

*In homogen-porösen Wirtgesteinen mit sehr niedriger Durchlässigkeit (diffusionsdominierte Freisetzung) reduziert sich die maximale Dosis beispielsweise um bis zu ca. eine halbe Größenordnung, wenn die Transportpfadlänge von 20 m auf 40 m erhöht wird (Fig. A5.3-1, A5.3-3 und A5.3-5). [NTB 08-05, S. A5-9]*

*Die Resultate der Dosisberechnungen basieren auf einer Transportpfadlänge im Wirtgestein von einigen Dekametern (in der Regel 40 m); wie in Kap. A5.3 gezeigt wird, hat die Transportpfadlänge in diesem Wertebereich nur einen untergeordneten Einfluss auf die berechneten Dosen. [NTB 08-05, S. A5-1]*

Im Bericht NTB 08-05 (S. 214) wird der Mindestabstand der Lagerebene zum oberen ("Top") und unteren Rand ("Basis") des Opalinustons mit je  $\geq 20$  m festgelegt. Auf Seite A1-20 des gleichen Dokuments wird differenzierter argumentiert: Als Mindestanforderung erscheint je  $\geq 20$  m und als verschärfte Anforderung je  $\geq 40$  m.

Die Ergebnisse der später durchgeführten Sensitivitätsanalysen (Fig. 9, Fig. 10 & Tab. 2 unten) bestätigen klar, dass die Festlegung eines Grenzwertes für die "Mächtigkeit  $M_{\min, \text{intakt}}$  von rund 35 m (HAA-Lager)" [NAB 14-81, S. 4] nicht begründbar ist. Man beachte, dass in Figur 10 die angenommene Durchlässigkeit  $K = 10^{-10}$  m/s beträgt. In Tabelle 2 dagegen wird der erwartete Wert von  $K = 10^{-14}$  m/s angeführt. Diese Resultate machen deutlich, dass – unabhängig von der Durchlässigkeit des Wirtgesteins – die Länge des Freisetzungspfades im Bereich von 20 bis 40 m praktisch keine Rolle spielt.

Es sei hier noch angemerkt, dass bei den Dosisberechnungen in Vertikalrichtung die Stärke der Auflocke-  
 rungszone mit 5 m und eine unbeschränkte Durchlässigkeit angesetzt wird [NTB 10-01, S. 143]. Bezüg-  
 lich des horizontalen Freisetzungspfades wird jedoch eine Stärke der Auflockerungszone von lediglich  
 0.7 m und eine Durchlässigkeit von  $10^{-7}$  -  $10^{-8}$  m/s in Betracht gezogen [NTB 14-10, S. 14]:

*In most calculation cases, the EDZ is treated as a homogeneous, isotropic porous medium, forming an  
 annular region 0.7 m thick around each of the underground openings.*

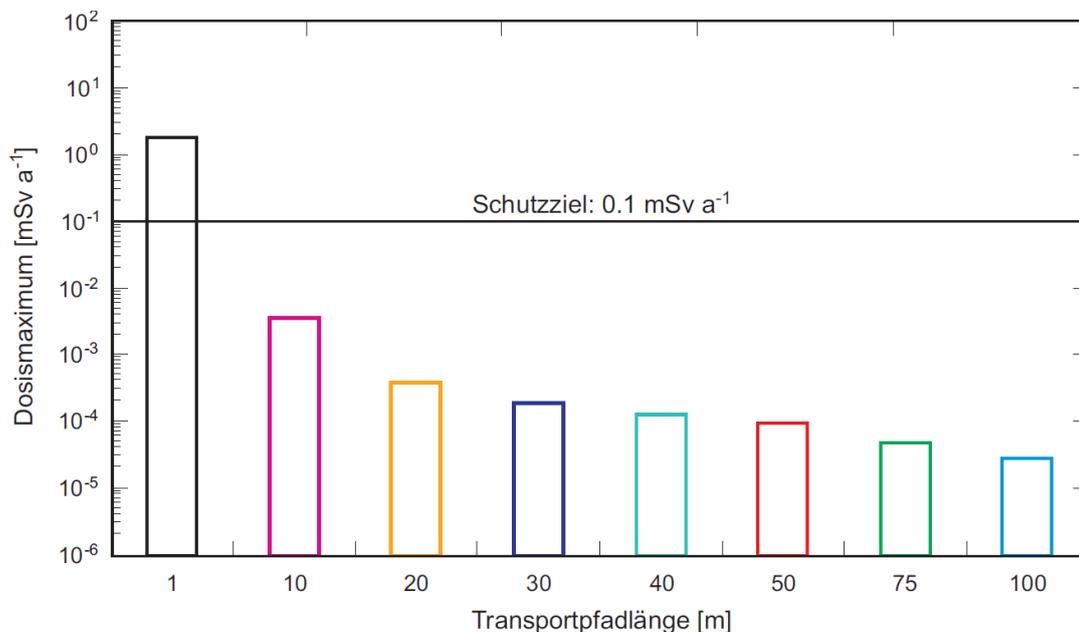


Fig. 9: Einfluss der Transportpfadlänge auf die berechneten Dosismaxima für ein HAA-Lager in einem  
 homogen-porösen Wirtgestein für  $K = 10^{-13}$  m/s und  $i = 1$  m/m [NTB 08-05, S. A5-12].

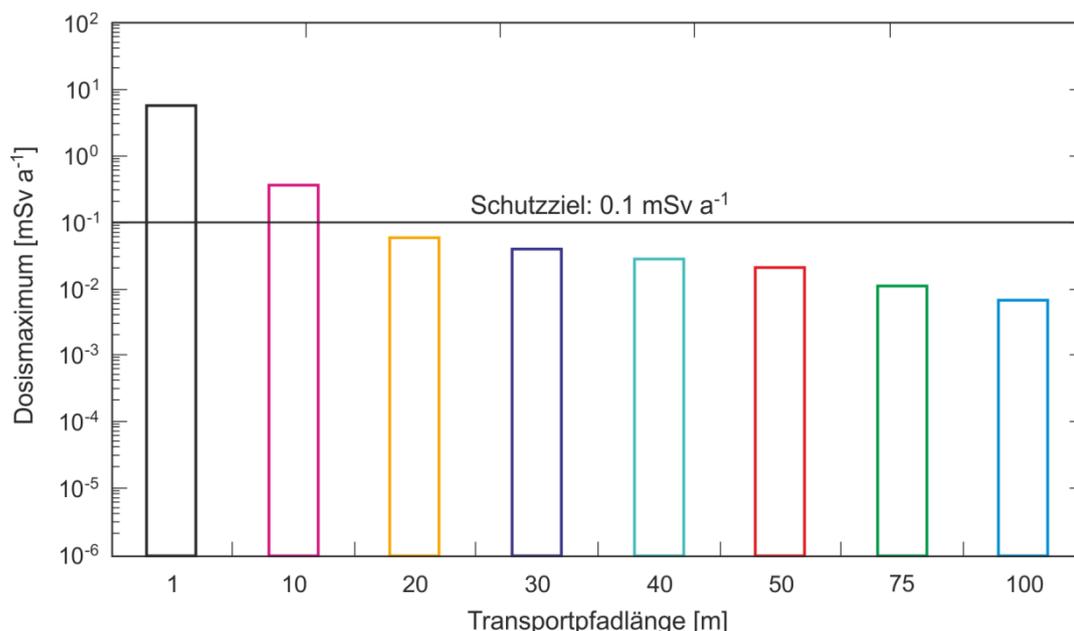


Fig. 10: Einfluss der Transportpfadlänge auf die berechneten Dosismaxima für ein HAA-Lager in einem  
 homogen-porösen Wirtgestein (kein Opalinuston) für  $K = 10^{-10}$  m/s und  $i = 0.1$  m/m [NTB 08-05,  
 S. A5-13].

Tab. 2: Dosismaxima für Rechenfälle zur Ableitung von Hinweisen für die qualitative Bewertung des Indikators "Mächtigkeit" bei der Bewertung der Standortgebiete [NTB 14-01, S. 236].

Standortgebiet	Rechenfall	Durchlässigkeit	Freisetzungspfad	Maximale Dosis
NL	mFE-uE	$2 \times 10^{-14}$	30	$4.9 \times 10^{-5}$
	mFE	$2 \times 10^{-14}$	40	$5.5 \times 10^{-6}$
	a-RF	$2 \times 10^{-14}$	40	$2.9 \times 10^{-6}$
	RF	$2 \times 10^{-14}$	67	$7.3 \times 10^{-9}$

Ausser den Ergebnissen der Dosisberechnungen gibt es weitere Gründe, den Grenzwert von 35 m abzulehnen:

Erstens hätte man für eine Standortuntersuchung nicht vom unteren Eckwert von 80 m der Mächtigkeit des Opalinustons ausgehen dürfen, sondern vom Referenzwert von 110 m, weil der obere Eckwert immerhin 130 m beträgt [NTB 14-01, S. 79; NTB 14-02, S. 136; NTB 14-03, S. A-129]. Gemäss Definition ist der Referenzwert "der aufgrund der Erfahrungsbasis plausibelste Wert" [NTB 14-01, S. 67].

Einen zweiten Grund gegen die Festlegung des Wertes von 35 m hätte man in der Vernachlässigung der unteren Rahmengesteine beim Standort Nördlich Lägern erkennen müssen. Im Bericht NTB 14-01 (S. 86) wird auf diesen Sachverhalt wie folgt hingewiesen:

*Die Dosiskurven und -maxima für die Standortgebiete Zürich Nordost und Nördlich Lägern fallen für den Opalinuston tief aus. Sowohl beim Referenzfall als auch bei den alternativen Fällen wird die Radionuklidfreisetzung wesentlich durch die Länge der massgebenden Freisetzungspfade in tonmineralreichen lithofaziellen Einheiten geprägt (insbesondere Opalinuston und Toniger Lias; der Arietenkalk im Liegenden verhindert einen längeren Freisetzungspfad).*

Weiter wird in diesem Bericht ausgeführt (S. 303):

*Im Lagerperimeter HAA-NL weist der Opalinuston eine Mächtigkeit von ca. 110 m auf und liefert den Hauptbeitrag zur Barrierenwirkung des Gesamtsystems. Die Rahmengesteine unterhalb und oberhalb des Opalinustons (Tongesteinsabfolge "Brauner Dogger" und "Effinger Schichten" bzw. "Toniger Lias") steuern zusätzliche signifikante Beiträge zur Barrierenwirkung bei.*

Auch das ENSI urteilt in ähnlicher Weise [ENSI 33/070, S. 157]:

*Durch die geringdurchlässige Ausbildung der Rahmengesteine im östlichen Bereich ist der einschlusswirksame Gebirgsbereich 270 bis 320 m mächtig und wird damit als sehr günstig bewertet. [NTB 08-03, S. 308]*

Die "Unteren Rahmengesteine" im Gebiet Nördlich Lägern [NTB 14-01, S. 79; NTB 14-02, S. 136; NTB 14-03, S. A-129] sind wegen ihres hohen Rückhaltevermögens besonders wichtig. Hierbei geht man von folgenden Schichtmächtigkeiten aus:

Referenzwert: 145 m, Unterer Eckwert: 130 m, Oberer Eckwert: 180 m

Der unmittelbar unterhalb des Opalinustons angrenzende Tonige Lias mit einem "Referenzwert" der Schichtstärke von 27 m weist infolge seines hohen Tongehalts von 20 bis 60% (Fig. 11) eine besonders

günstige, dem Wirtgestein nahezu ebenbürtig geringe Durchlässigkeit auf. Gemäss NTB 14-03 (S. A-130) betragen die Werte der "schichtquerenden Durchlässigkeit  $K_V$ ":

Referenzwert = Oberer Eckwert =  $10^{-13}$  m/s (Opalinuston =  $2 \times 10^{-14}$  m/s bzw.  $10^{-13}$  m/s)

Auch in NTB 14-02 wird diese Tatsache wie folgt klar bestätigt:

*Packertests wurden über die gesamte Mächtigkeit des Lias (einschliesslich Arietenkalk) in den Bohrungen Schafisheim, Riniken und Benken durchgeführt und ergaben bei Tiefen von > 450 m Durchlässigkeiten von  $\leq 10^{-13}$  m/s. (S. 116)*

Geht man von der Tatsache aus, dass der Tonige Lias dem Wirtgestein hinsichtlich Rückhaltevermögen ebenbürtig ist, so könnte man – um den vertikalen Freisetzungspfad zu verlängern – die Lagerebene von der Mittelebene der Schicht um 5 bis 10 m nach unten verschieben. Auf diese Weise fielen die Einschränkungen für die vertikale Ausdehnung einer errechneten plastischen Zone weg.

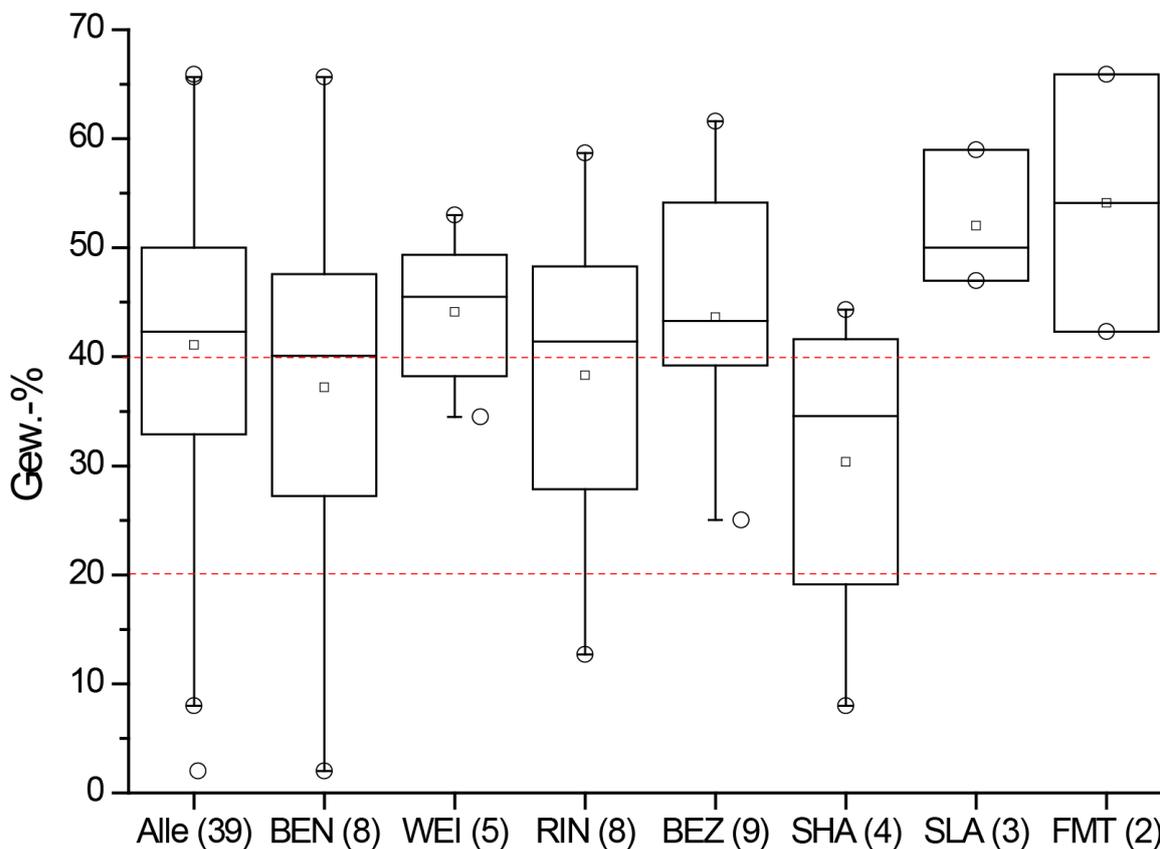


Fig. 11: Tonmineralgehalte der Einheit Toniger Lias aus den Bohrungen; die roten Linien bezeichnen Referenz- und Eckwert [NAB 12-40, S. 16].

## 8.2 Plastische Zone

Der in Figur 8 als "plastifizierte Zone" [NAB 14-81, S. 5 & 34] angedeutete Gebirgsbereich wird in der Regel als "plastische Zone" bezeichnet, die in den Berichten der Nagra meistens auch als "Auflockerungszone (AUZ)", "geschädigte" bzw. "gestörte" Zone oder im Englischen als "excavation damaged zone" bzw. "excavation disturbed zone (EDZ)" genannt wird. Dies wird auch durch die Darstellung in Figur

8b) oben bestätigt, wo für die *"plastified zone"* das Kürzel *"EDZ"* steht. Diese Termini werden sehr häufig auch in unterschiedlichem Sinne verwendet, was zu Missverständnissen und widersprüchlichen Aussagen führen kann. Im Folgenden soll die Verwendung des Begriffs *"plastische Zone"* für die Beurteilung des Einflusses der Tiefenlage auf die Langzeitsicherheit der Lagerstollen aus verschiedenen Blickwinkeln kritisch hinterfragt werden.

In der technischen Mechanik bezeichnet eine *"plastische Zone"* einen Bereich in einem Material mit elastisch-plastischem Verhalten, in dem infolge Überbeanspruchung plastische, das heisst bleibende Verformungen stattfinden. Diese würde man nach einer vollständigen Entlastung als solche erkennen.

Im Untertagbau kann die Schaffung des Hohlraumes eine Überbeanspruchung des Gebirges bewirken, was zur Ausbildung einer plastischen Zone führen könnte. Sie gilt natürlich nicht für das Gebirge als solches, sondern für das der Spannungsanalyse zugrunde gelegte Materialmodell. Auf die Diskussion, inwiefern sich solche vereinfachten Materialmodelle zur Erfassung von Bruchvorgängen in der Umgebung der Lagerstollen im Opalinuston eignen, gehen wir hier nicht ein. Wir wollen zunächst lediglich zeigen, mit welchen Unwägbarkeiten die Verwendung dieser Materialmodelle verbunden sind und welcher Grad an Verlässlichkeit in den Berechnungsergebnissen zu erwarten ist.

Welchem Zweck dient die plastische Zone in den diversen Berichten der Nagra – insbesondere in NTB 02-03 und NAB 14-81? Sie dient ausschliesslich dazu, jenen Gebirgsbereich in der Umgebung der Lagerstollen abzugrenzen, wo infolge des Stollenausbruchs resp. der dadurch möglichen Ausbildung einer plastischen Zone eine erhöhte Durchlässigkeit des Materials vermutet wird. Das Wort *"Vermutung"* betonen wir schon aus dem Grund, als es keine physikalischen Gesetzmässigkeiten (Stoffgesetze) gibt, aufgrund derer man auf die Bestimmung der Durchlässigkeitsbeiwerte einer *"plastischen Zone"* – geschweige denn auf deren Verlauf innerhalb dieser Zone – schliessen könnte. Die Richtigkeit dieser Aussage wird besonders augenfällig, wenn man bedenkt, dass der Opalinuston als Festgestein betrachtet werden kann und dennoch infolge des hohen Tongehalts auch Züge eines Lockergesteins aufweist. Die Bruchmodi (Spröbruch, Scherbruch) sind in hohem Masse beeinflusst von den Materialeigenschaften und durch den vorherrschenden Spannungszustand, der sich jedoch – vom Ausbruchrand ausgehend – stark verändert. Im Grunde wird mit einem hohen mathematischen Aufwand die plastische Zone ermittelt, um danach rein subjektiv einen einzigen (reduzierten) Durchlässigkeitsbeiwert zu bestimmen. Empirische Befunde in situ (Mont Terri, Überlagerung ca. 300 m) deuten jedoch auf eine sehr geringe Zunahme des Durchlässigkeitskoeffizienten im Opalinuston hin, und dies erst noch in einem schmalen Randbereich der Stollen. Bedenkt man zudem, dass die Durchlässigkeit dieser als *"geschädigt"* oder *"gestört"* gedachten Zone erst in ihrem Zustand ab 10'000 Jahren<sup>9</sup> von Interesse ist, relativiert sich die Bedeutung der nachfolgende Diskussion über die Unwägbarkeiten bei der Ermittlung der vertikalen Ausdehnung der plastischen Zone. Auf die Dimension *"Zeit"* wird zwar in den Nagra-Berichten häufig hingewiesen (*"Selbstabdichtungsvermögen"*), doch findet sie in vielen Überlegungen nicht konsequent Eingang:

*Für die Langzeitsicherheit eines Tiefenlagers sind nur diejenigen Eigenschaften der Auflockerungszone (AUZ) massgebend, die zum Zeitpunkt der Radionuklid-Freisetzung vorherrschen werden. [NTB 02-03, S. 594]*

<sup>9</sup> Nimmt man eine Lebensdauer von nur 1'000 Jahre für die Behälter an, so beträgt die interessierende Zeitspanne 1'000-1 Million Jahre. Die physikalischen Prozesse, welche im Opalinuston in unmittelbarer Umgebung der Lagerstollen zu erwarten sind, lassen erkennen, dass die Selbstabdichtung viel früher als in 1'000 Jahren abgeschlossen sein dürfte.

Weitere typische Äusserungen über die plastische Zone in den Berichten der Nagra sind folgende:

*Bei zunehmenden In-situ-Gebirgsspannungen kommt es in Abhängigkeit der Gebirgsfestigkeit und [des] Verformungsverhalten[s] ab einer bestimmten Tiefe zu Entfestigungen und zur Ausbildung einer plastifizierten Zone um den Hohlraum. Dies führt zu einer Störung bzw. Schädigung des Wirtgesteins im Umfeld der Lagerkammern, die ab einer gewissen Grösse aus der Sicht der Langzeitsicherheit unerwünscht sind, da das Barrierensystem in und direkt um die Lagerkammern und Schlüsselzonen für Versiegelungen beeinträchtigt wird. [NAB 14-81, S. 101]*

*Beschränkung der Ausdehnung der Gebirgsstörung und -schädigung im Umfeld der Lagerkammern, so dass die hervorragende Barrierenwirkung des Opalinustons nicht signifikant herabgesetzt wird bzw. ungestörte Wirtgesteinsbereiche ausreichender Mächtigkeit verbleiben. [NAB 14-81, S. 4]*

*Beschränkung des hydraulischen Leitvermögens der AUZ längs der BE/HAA-Lagerstollen und der Versiegelungstrecken (Schlüsselzonen) im Hinblick auf die Wirkung der AUZ als möglicher Freisetzungspfad für Radionuklide. [NAB 14-81, S. 4]*

*Die Ausdehnung der Gebirgsstörung soll weder während dem Bau noch dem Betrieb, noch nach dem Verschluss des Lagers überschritten werden. [NAB 14-81, S. 4]*

*Neben der beschränkten Beeinflussung der vertikalen Migrationsdistanz ist zusätzlich zu gewährleisten, dass der Wasserfluss entlang der BE/HAA-Lagerstollen und um die Versiegelungstrecken/Schlüsselzonen (für beide Lagertypen HAA und SMA) genügend klein bleibt. Daraus leitet sich eine sicherheitstechnische Anforderung bezüglich der Auflockerungszone (AUZ) ab. [NAB 14-81, S. 5]*

*Mit den anzustrebenden maximalen Tiefenlagen soll sichergestellt werden, dass die Anforderungen an die plastifizierte Zone und an Eigenschaften der Auflockerungszone auch ohne Berücksichtigung der Sicherung (d.h. für Berechnungen ohne Ausbau) erfüllt werden. [NAB 14-81, S. 101]*

*Die Bewertung (bezüglich Tiefenlage) "sehr günstig" liegt im Bereich von  $\leq 600$  m u.T. für das HAA-Lager und  $\leq 500$  m u.T. für das SMA-Lager. Mit diesen Optimierungsanforderungen wird erreicht, dass die Gebirgsstörung bzw. -schädigung auch im direkten Umfeld der Lagerkammern bzw. der Versiegelungstrecken beschränkt bleibt. [NAB 14-81, S. 103]*

Häufig wird die "Auflockerungszone" nicht im Sinne einer plastischen Zone, sondern nach dem Verständnis des ingenieurmässigen Tunnelbaus angesprochen:

*Die AUZ weist aufgrund des Ausbruchs spannungsinduzierte Extensionsbrüche und Scherbrüche auf. [NAB 14-81, S. 98]*

*Im Falle des HAA-Lagers kommt der EDZ im Bereich der Lagerstollen eine grosse Bedeutung zu, da die hydraulische Durchlässigkeit in der Stollenverfüllung klein ist. Die EDZ kann hier weder ausgeräumt noch mit anderen baulichen Massnahmen abgedichtet werden oder verstärkt werden. Eine derartige Massnahme bleibt im HAA-Lager daher auf den Bereich der Versiegelungen beschränkt. [NTB 08-05, S. A1-104]*

*Die Auflockerungszone im Nahbereich der Untertagbauten kann im Opalinuston durch technische Massnahmen weitgehend kontrolliert werden. Diese Massnahmen umfassen gegebenenfalls die Ausräumung der Auflockerungszone und anschliessend die Abdichtung mit quellfähigem Versiegelungsmaterial. [NTB 08-03, S. 162]*

Ein "Ausräumen" kann sich hier natürlich nur auf den Firstbereich beziehen, wo man eben Ablösungen unabhängig von der Tiefenlage erwarten muss. Unter Auflockerung werden gelegentlich "das Einknicken der Schichten in der Firste" [NAB 14-81, S. 46] oder generell auffällige Brucherscheinungen verstanden.

In den folgenden Äusserungen fallen die Begriffe Auflockerungszone und plastische Zone gänzlich auseinander:

*In grösseren Tiefenlagen könnten die Gebirgsstörung bzw. Gebirgsschädigung das angestrebte Mass überschreiten, d.h. sowohl die Auflockerungszone ... als auch die Ausdehnung der plastifizierten Zone könnten zu gross werden. [NAB 14-81, S. 81]*

*Die AUZ mit vernetzen Rissen wurde bis 1.5 a [Stollenradius], die plastifizierte Zone bis 4 a beobachtet. Die Gebirgsstörung war also beträchtlich. [NAB 14-81, S. 44]*

*Die normierte Ausdehnung der AUZ mit einer signifikanten Durchlässigkeitserhöhung betrug 2.2 a [Stollenradius], mögliche plastifizierte Zonen wurden bis zu einer Ausdehnung von 3.5 a und darüber hinaus gemessen. Die Gebirgsschädigung war demnach schon relevant. [NAB 14-81, S. 44]*

Man spricht auch von "plastischen Dehnungen innerhalb der Auflockerungszone", von den "Folgen der Gebirgsschädigung und der Auflockerung" oder von der "Ausdehnung der plastifizierten Zone und den Eigenschaften der Auflockerungszone" oder von der "vertikalen Ausdehnung der Gebirgsstörung bzw. der plastifizierten Zone" etc. und meint dabei zum einen Mal die plastische Zone, d.h. den Modellbegriff, zum andern Mal den tunnelbautechnischen Terminus.

Gänzlich irreführend ist, wenn von der "Volumenzunahme und Auflockerung innerhalb der plastifizierten Zone" berichtet wird – dies umso mehr, als in allen uns bekannten felsmechanischen Berechnungen ein verschwindender Dilatanzwinkel angenommen wird. [NAB 10-41, S. 15/16]. In einigen Berichten steht die Auflockerungszone in überhaupt keinem Zusammenhang mehr mit der plastischen Zone:

*The Excavation damaged zone (EDZ) is a zone with significant irreversible processes and significant changes in flow and transport properties. [NAB 13-94, S. 3]*

*The Excavation Disturbed Zone (EdZ) is a zone with hydromechanical and geochemical modifications, without major changes in flow and transport properties. The Excavation Damaged Zone (EDZ) is a zone with hydromechanical and geochemical modifications inducing significant changes in flow and transport properties. These changes can, for example, include one or more orders of magnitude increase in flow permeability. [NAB 14-87, S. 3]*

Gegen die Verwendung der plastischen Zone als Teil eines Kriteriums zur Beurteilung der bautechnischen Sicherheit sprechen mehrere Gründe, die im Folgenden einzeln diskutiert werden.

**Unsicherheit in den Modellannahmen:** Zur rechnerischen Ermittlung der Ausdehnung der plastischen Zone werden gemäss Figur 12 Gebirgsmodelle mit unterschiedlichen Bruchbedingungen und Festigkeitsparametern angenommen [NAB 14-81, S. 31]. Diese Gebirgsmodelle wurden nicht aufgrund irgendwelcher tieferer Erkenntnisse "abgeleitet", wie dies da und dort behauptet wird, sondern stellen das Resultat subjektiver Annahmen dar, bei denen allerdings die Ergebnisse von Laborversuchen an Bohrkernen in Betracht gezogen wurden. Die Art der vorgeschlagenen Bruchbedingungen ist für die Höchstfestigkeiten sowohl der "Matrix" als auch für die "Schichtung" bilinear und fordert deshalb je mindestens 5 Materialparameter (Kohäsion, Winkel der inneren Reibung und Zugfestigkeit). Für die Restfestigkeiten werden lineare Bruchbedingungen (ohne Zugfestigkeit) angenommen, welche somit nur je zwei Festigkeitsparameter benötigen [NTB 14-02, S. 78; NAB 14-81, S. B6-B9]. Für ein einziges Gebirgsmodell wären damit mindestens 14 Festigkeitsparameter erforderlich, und so müssten für die Ausführung eines Berechnungsprogramms mit den 8 Gebirgsmodellen gemäss den Figuren 12 und 13 mindestens 112 solche

Parameter zur Verfügung stehen. In den obigen Betrachtungen wurden jene mindestens 4 Hilfsparameter nicht berücksichtigt, welche den verformungsbedingten Übergang von der Höchst- zur Restfestigkeit regeln müssten [NAB 10-41, S. 14, Fig. 8].

*Ähnlich wie bei der Entfestigung im Nachbruchbereich (Vermeer & DeBorst 1984) erfolgt hier im Vorbruch-Bereich eine über die akkumulierte plastische Scherdeformation gesteuerte Änderung der Kohäsion und des Reibungswinkels, und zwar sowohl für die Matrix als auch für die Schichtung. [NTB 02-03, S. 302]*

*Der initial zulässige Spannungsraum schrumpft mit zunehmenden plastischen Dehnungen auf den residual zulässigen Spannungsraum zusammen. [NAB 10-41, S. 13]*

Man kann noch einen Schritt weiter gehen und für die Berechnungen geradezu 20 geschätzte Festigkeitsparameter je Gebirgsmodell einführen [NAB 05-15, S. 3; NAB 10-41, S. 14/15/16; Amman und Löw, 2009, A.2, S. II].

Die Nagra erweitert in ihrem Schlüsselbericht NAB 14-81 zum Thema "Tiefenlage" die Vielfalt der möglichen Berechnungsannahmen nochmals und zieht – wie oben erwähnt – gemäss der Norm SIA 260 für die effektiv verwendeten Materialparameter sog. "Mittelwerte  $X_m$ , Charakteristische Werte  $X_k$  und Bemessungswerte  $X_d$ " heran [NAB 14-81, S. 32]. Hier wird verkannt, dass die Bestimmung der plastischen Zone zur Abschätzung der Gebirgsbereiche mit der vermuteten erhöhten Durchlässigkeit nichts mit der Tragwerksicherheit von Konstruktionen wie Brücken, Fundationen, Böschungen etc. zu tun hat. So wird beispielsweise ein geschätzter Wert (GM3 in Fig. 12) der Kohäsion von  $c = 7.1$  MPa aufgrund sachfremder Überlegungen auf 5.6 MPa bzw. 3.7 MPa reduziert [NAB 14-81, S. B-2/3].

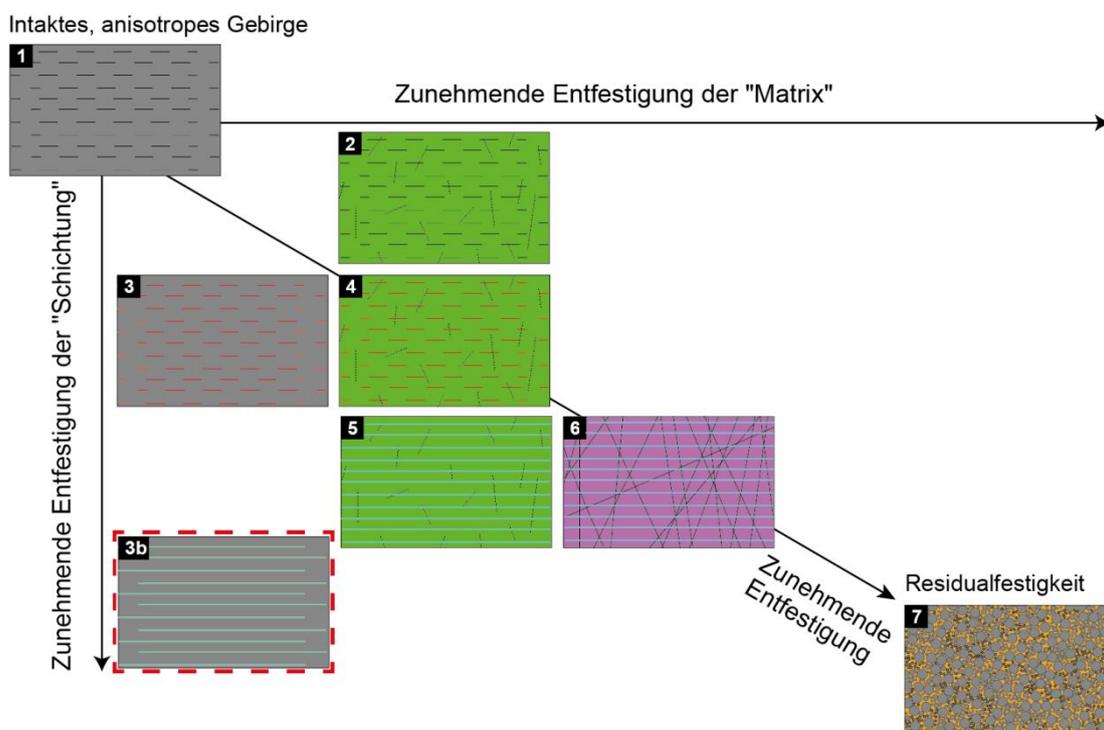


Fig. 12: Gebirgsmodelle zur Berücksichtigung der möglichen Entfestigung im Opalinuston als Folge der tektonischen Überprägung [NAB 14-81, S. 31].

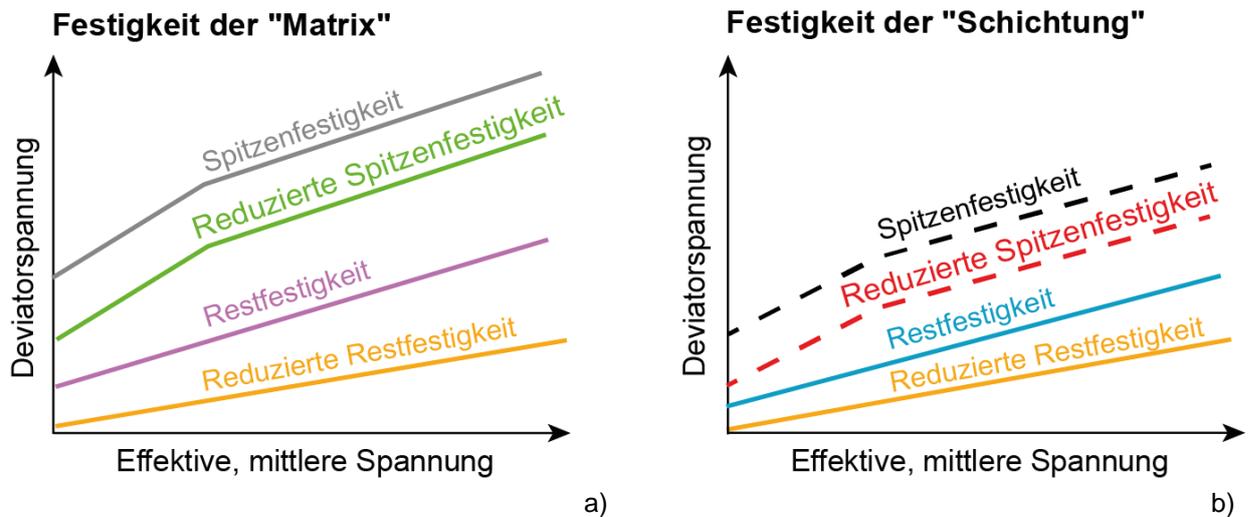


Fig. 13: Bruchbedingungen mit Höchst- (= "Spitzen-") und Restfestigkeit sowohl für die Matrix als auch für die Schichtung [NAB 14-81, S. 31].

Es darf nicht unerwähnt bleiben, dass einzelne Autoren zur Beeinflussung der Ausbildung von Form und Ausdehnung der plastischen Zone zusätzlich auf Variationen des Schermoduls in Richtung der Schichtung und senkrecht dazu zurückgreifen. Ausserdem sei hier ein weiterer Eingabeparameter erwähnt, der einen entscheidenden Einfluss auf die Form und Ausdehnung der plastischen Zone ausübt: Es handelt sich um den Seitendruckbeiwert  $K$  beim primären Spannungszustand, d.h. um das Verhältnis zwischen Horizontal- und Vertikalspannung. Gemäss NAB 14-81 (S. 24) kann dieses Verhältnis folgende Werte annehmen:

$$0.9 \leq K \leq 1.3 \text{ (Referenzwerte)}$$

$$0.8 \leq K \leq 1.9 \text{ (Alternativwerte bei hohen tektonischen Spannungen)}$$

In der Tat wurden Berechnungen für Werte von bis zu  $K = 1.4$  [NAB 05-15, S. 3] und  $K = 1.7$  [NAB 10-41, S. 19/20] durchgeführt.

Hiermit ergeben sich nun neue Möglichkeiten, weitere plastische Zonen zum Zwecke der Begrenzung der Tiefenlage der HAA-Lagerstollen zu generieren. Eine Auswahl plastischer Zonen, welche aufgrund unterschiedlicher Materialmodelle, Materialparameter, Tiefenlagen, Seitendruckkoeffizienten und Ausbruchssicherung etc. errechnet wurden, sind in den Figuren 14 und 15 zusammengestellt; sie werden im Rahmen dieses Berichtes im Einzelnen nicht diskutiert. Es sei aber erwähnt, dass die Erzeugung von plastischen Zonen auch stark vom Software-Angebot sowie von rein numerischen Effekten beeinflusst wird.

*Die Verwendung von Strain-Softening Materialgesetzen innerhalb numerischer Modelle birgt das Risiko unerwünschter numerischer Artefakte. So treten z.B. Dehnungskonzentrationen auf, die gleichzeitig die Ausbildung plastischer Elemente bevorzugen, was sich oft in einer Netzabhängigkeit der Ergebnisse manifestiert. [NAB 10-41, S. 14]*

Hierfür betrachte man als Beispiel Figur 14 b) mit den asymmetrischen Fließ-Elementen, welche infolge der Symmetrie nicht zulässig wären.

**Selbstabdichtungsvermögen des Opalinustons:** Das sogenannte "Selbstabdichtungsvermögen" wird als eine der wichtigsten Eigenschaften dieses Wirtgesteins angeführt. Mit diesem vagen Terminus, der seinen Ursprung weder in der Boden- noch in der Felsmechanik hat, wird die Erwartung ausgedrückt, dass sich offene Strukturen im Fels (Klüfte, Risse, Spalten an den Schichtgrenzen, etc.), die sich vornehmlich durch den Ausbruch des Hohlraumes in seiner Umgebung gebildet haben sollen, durch Quellen bestimmter Tonminerale im Laufe der Zeit schliessen würden. Hierdurch würde das Gebirge spätestens nach dem Versagen der Stahlbehälter (d.h. nach 1'000 bis 10'000 Jahren) seine ursprünglich geringe Durchlässigkeit nahezu oder vollständig wieder erlangen. Man spricht richtigerweise von der "*Phänomenologie der Selbstabdichtung*" [NTB 02-03, S. 331], bei der neben der Quellfähigkeit der Tonminerale namentlich auch der jeweils herrschende Spannungszustand, der Wasserzutritt (Aufsättigung) und die Gesteinsfestigkeit eine wichtige Rolle spielen dürften. Der wichtigste Faktor, der zu diesem Ergebnis führen würde, ist zweifelsfrei die Quellfähigkeit der Tonminerale im Opalinuston:

*Tonminerale sind auch bestimmend für die Festigkeit und insbesondere das Quellverhalten (Selbstabdichtung). Rund 1/6 des Gesamtanteils der Tonminerale und damit etwa 10 Gew.-% des Gesamtgesteins bestehen aus quellfähigen Illit-Smektit-Wechselagerungen.* [NTB 02-03, S. 230]

Die im Labor an Opalinuston-Proben ermittelten Werte der unbehinderten Quelldehnung betragen 0.1-7.5% *senkrecht* und 1.4-4.5% *parallel* zur Schichtung und der Quelldruck bei behinderter Dehnung beträgt 0.8-1.4 MPa *senkrecht* und 0.1-0.2 MPa *parallel zur Schichtung* [NTB 02-03, S. 269]. Das eher bescheidene Quellpotenzial des Gesteines ist auf den verhältnismässig geringen Anteil von 10 Gew.-% des Gesamtgesteins zurückzuführen. Zur Komplexität der vermuteten Prozesse bezüglich "*Selbstabdichtung und hydraulisches Langzeitverhalten*" äussert sich die Nagra so:

*Das hydraulische Langzeitverhalten der Auflockerungszone im Opalinuston kann nicht gemessen, sondern nur abgeschätzt werden. Dabei ist zunächst zu untersuchen, welche Langzeitprozesse das hydraulische Verhalten der Auflockerungszone beeinflussen könnten:*

- *Änderungen des Spannungsfelds,*
- *Quellen des Verfüllmaterials (Bentonit, Bentonit-/Sandgemisch),*
- *Quellen des Opalinustons,*
- *Desintegration (als Reaktion auf das Quellen),*
- *Ausfällungen und Verstopfung der Fliesswege,*
- *Temperatureintrag durch wärmeproduzierende Abfälle.* [NTB 02-03, S. 472]

Im Zusammenhang mit den "*lagerbedingten Einflüssen*" wird ausgeführt:

*Während bei SMA ausschliesslich die Auflockerungszone im Nahbereich der Versiegelungszone relevant ist, wird bei HAA die Auflockerungszone im Nahbereich der BE/HAA-Lagerstollen betrachtet. Auch dort wirkt sich ähnlich wie bei Versiegelungsstrecken der Quelldruck der Bentonitverfüllung positiv auf die Selbstabdichtung der Auflockerungszone aus. Weiter ist bei den BE/HAA-Stollen die Länge der Stollen mit quellfähigem Versiegelungs- bzw. Verfüllmaterial sehr gross, was die Wasserführung in der Auflockerungszone stark reduziert. Unter Berücksichtigung des ausgeprägten Selbstabdichtungsvermögens des Opalinustons fällt die Beurteilung des Indikators "Auflockerungszone im Nahbereich der Untertagebauten" für die BE/HAA-Lagerstollen günstig bis sehr günstig aus.* [NTB 10-01, S. 143]

Wir wollen einige charakteristische Sichtweisen bezüglich des Themas "Selbstabdichtung" wiedergeben, die in den diversen Nagra-Berichten zu finden sind:

*Das Selbstabdichtungsvermögen ist wichtig in Zusammenhang mit der Beständigkeit der Standort- und Gesteinseigenschaften, weil es die Auswirkungen allenfalls entstehender Klüfte (auf die hydraulische Durchlässigkeit) und Störungszonen (auf die Transmissivität) im Hinblick auf die Wasserführung im Wirtgestein begrenzt. In diesem Sinne hat das Selbstabdichtungsvermögen auch ei-*

*nen massgeblichen Einfluss auf die Transporteigenschaften der präferenziellen Freisetzungspfade im Wirtgestein bzw. im einschlusswirksamen Gebirgsbereich, insbesondere durch seinen Beitrag zur Verringerung der Wasserführung und zur Begrenzung der Auswirkungen von lagerbedingten Einflüssen (Auflockerungszone), und damit auch auf die Rückhaltung und Freisetzung von Radionukliden. [NTB 08-05, S. A1-84]*

*Beim Bau der Tunnel entwickeln sich im Umfeld der Bauwerke signifikante Auflockerungszonen, deren Auswirkungen auf das Wirtgestein und seine Barrierenwirkung allerdings räumlich und zeitlich beschränkt sind. Die lokale Durchlässigkeit der Auflockerungszone ist in der Bau- und Betriebsphase um mehrere Grössenordnungen erhöht. Es wird aber erwartet, dass eine Selbstabdichtung aufgrund von Quell- und Kriechvorgängen (Desintegration) erfolgt. Dies bewirkt, dass sich die effektive axiale Durchlässigkeit der Auflockerungszone nach der Aufsättigung nur noch wenig vom intakten Gebirge unterscheidet. [NTB 02-03, S. 530]*

*Die Durchlässigkeit der Auflockerungszone ist erst im Zeitpunkt der Nuklidfreisetzung für die Sicherheit von Relevanz. Bis zu diesem Zeitpunkt ist die Aufsättigung des Nahfelds schon weit fortgeschritten und der Quelldruck des Versiegelungsmaterials aufgebaut (bei den Versiegelungstrecken bzw. in den BE/HAA-Lagerstollen), sodass die Selbstabdichtung zum Tragen kommt. Damit ergeben sich andere Verhältnisse in der Auflockerungszone als direkt nach dem Ausbruch der Untertagebauten. [NTB 10-01, S. 143; NTB 14-03, S. A-12]*

*Bis zum Zeitpunkt der Radionuklidfreisetzung in das Wirtgestein wird sich die anfänglich erhöhte hydraulische Durchlässigkeit dank dem Selbstabdichtungsvermögen wieder auf Werte nahe der Durchlässigkeit für das ungestörte Wirtgestein zurückbilden. [NTB 10-01, S. 147]*

*Die Auflockerungszone homogenisiert sich durch Kriechen und Quellen, d.h. die Sprödstrukturen verlieren durch Selbstabdichtungsprozesse ihre hydraulische Bedeutung. Die Auflockerungszone kann deshalb aus hydraulischer Sicht langfristig wieder als "poröses Medium" betrachtet werden. [NTB 02-03, S. 595]*

*Nach erfolgter Aufsättigung und Konvergenz der Untertagebauwerke ist die hydraulische Durchlässigkeit der Auflockerungszone infolge Selbstabdichtungsprozesse nur noch geringfügig höher als die des intakten Wirtgesteins. [NTB 02-03, S. 504]*

*Nach der Aufsättigung des Lagers wird die hydraulische Durchlässigkeit der Auflockerungszone, die sich während der Bau- und Betriebsphase eingestellt hat, durch Selbstabdichtungsprozesse kontinuierlich reduziert. [NTB 02-03, S. 594]*

Abschliessend zu diesem Thema sei auf einen der logischen Brüche in der Argumentation der Nagra in Bezug auf die "Langzeitsicherheit" hingewiesen. Einerseits wird die Wiederherstellung einer hohen Dichtigkeit in der Auflockerungszone (plastische Zone) als Folge der Selbstdichtung des Opalinustons hervorgehoben. Andererseits wird von der Ausbildung von Freisetzungspfaden in horizontaler und vertikaler Richtung gewarnt, welche eben dieselbe Auflockerungszone AUZ (plastische Zone) ermöglichen würde. Man geht sogar so weit, die Wahlmöglichkeit für Lagerstandorte unter Nichtbeachtung der erwarteten "Selbstabdichtungsprozesse" einengen zu wollen<sup>10</sup>.

**Fazit Kapitel 8:** Das Kriterium mit der Festlegung der vertikalen Ausdehnung der plastischen Zone gemäss Figur 8 ist aus mehreren gänzlich unterschiedlichen Gründen unhaltbar. Die angegebene Begrenzung des vertikalen Freisetzungspfades auf 35 m entbehrt jeglicher Grundlage, und die plastische Zone ist als theoretisches Konstrukt unbrauchbar.

<sup>10</sup> Der logische Fehler bei der Überbetonung der Rolle einer gedachten AUZ wird noch auffälliger, wenn man bedenkt, dass die Dosisberechnungen für den horizontalen Freisetzungspfad ohnehin eine erhöhte Durchlässigkeit (bis zu  $10^{-7}$  m/s) zulassen würden [NAB 14-81, S. 6].

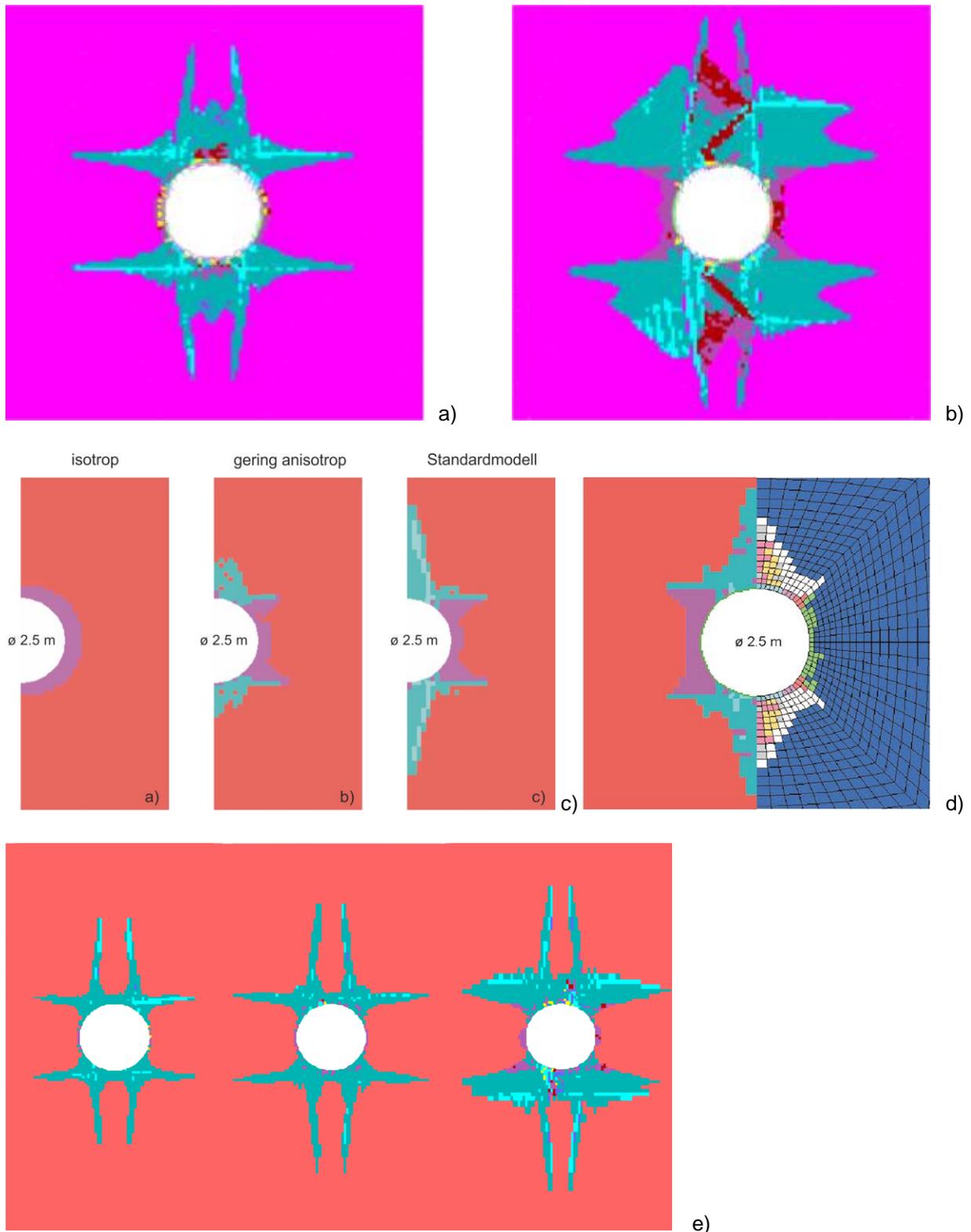


Fig. 14: Beispiele aus Berichten für die Ausbildung von plastischen Zonen: a) und b) [NAB 14-81, S. 47]; c) [NTB 02-03, S. 449; NIB 03-08, S. 87]; d) [NIB 03-08, S. 82]; e) [NAB 10-41, S. 30; NAB 14-81, S. 90].

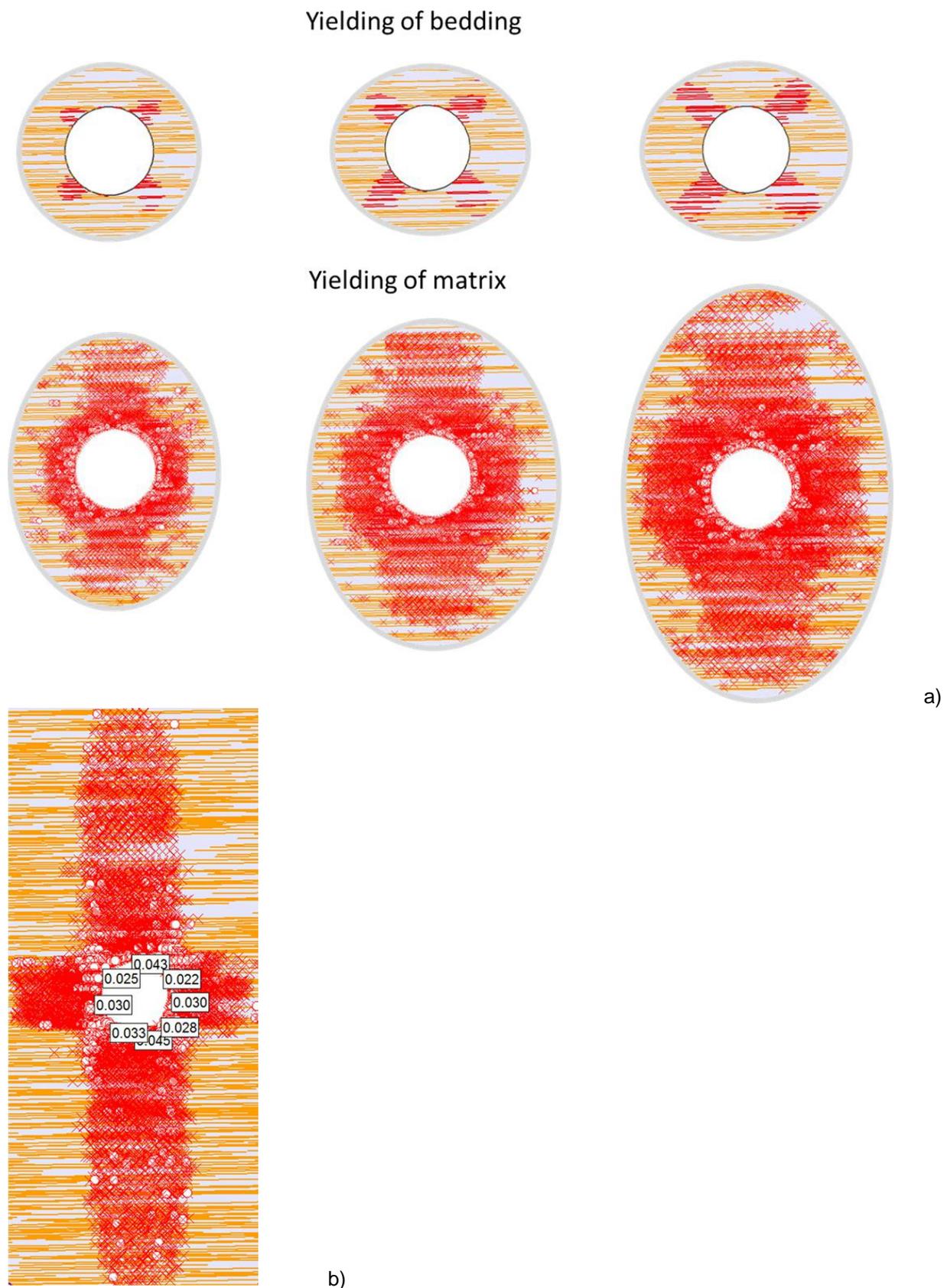


Fig. 15: Weitere Beispiele aus Berichten für die Ausbildung von plastischen Zonen: a) [NAB 14-87, S. 163; NAB 14-81, S. 75]; b) [NAB 14-87, S. 174].

## 9. SCHLUSSFOLGERUNGEN UND EMPFEHLUNGEN

Die Beschränkung der maximalen Tiefenlage auf 700 m für HAA-Lagerstollen erfolgte aufgrund unhaltbarer Prämissen und inkohärenter Argumentation. Das Fehlen eines ausgereiften bauingenieurmässig bearbeiteten Referenzprojektes selbst für eine Lagertiefe von 700 m hat zum Scheitern einer korrekten Bewertung von Lagerstandorten mit Tiefen von 900 m beigetragen. Es bedarf keiner weiteren vertieften und sorgfältiger ausgeführten Untersuchungen, um zu entscheiden, dass beispielsweise der Standort Nördlich Lägern aus Sicht der *"bautechnischen Machbarkeit"* und der *"Langzeitsicherheit"* beibehalten werden darf. Es wird empfohlen, Referenzprojekte mit einer angemessenen Bearbeitungstiefe sowohl für Lagertiefen von 700 m als auch für solche von 900 m auszuarbeiten. Eine Bereinigung des auf dem Gebiet der Geomechanik benutzten Begriffssystems wäre für künftige Untersuchungen zu begrüssen.

## REFERENZEN

- Amman, F. und Löw, S: Vorschlag geologischer Standortgebiete für das SMA- und das HAA-Lager: Beurteilung und Anwendung der bautechnischen Auswahlkriterien. ENSI Expertenbericht, November 2009
- ENSI 33/70: Sicherheitstechnisches Gutachten zum Vorschlag geologischer Standortgebiete, Januar 2010
- HSK 33/001: Sachplan geologische Tiefenlager: Herleitung, Beschreibung und Anwendung der sicherheitstechnischen Kriterien für die Standortevaluation, November 2007
- HSK 35/99: Gutachten zum Entsorgungsnachweis der Nagra für abgebrannte Brennelemente, verglaste hochaktive sowie langlebige mittelaktive Abfälle (Projekt Opalinuston), August 2005
- NAB 05-15: Felsmechanische Modellierungen, Opalinuston im Rahmen EP-05
- NAB 10-41: Standortunabhängige Grundlagen, Anlagen und Betrieb SGT Etappe 2 – Orientierende felsmechanische Berechnungen für BE/HAA-Lagerstollen in 400 m, 650 m und 900 m im intakten und gestörten Opalinuston
- NAB 10-42: Standortunabhängige Grundlagen, Anlagen und Betrieb SGT-ZE / SUG 2.2 – Orientierende felsmechanische Berechnungen und Vordimensionierung für SMA-Lagerkavernen in 300 bis 800 m Tiefe im intakten und gestörten Opalinuston, in der Palfries-Formation und den Effinger-Schichten für Kavernentypen K06, K09, K12 und K16
- NAB 12-40: Untere Rahmengesteine des Opalinustons: Hydrologische Einheiten, Gesteinsparameter und Mächtigkeiten
- NAB 14-10: Sensitivity analyses of gas release from a SF/HLW repository in the Opalinus Clay in the candidate siting regions of Northern Switzerland
- NAB 14-81: Beurteilung der Tiefenlage in Bezug auf die geotechnischen Bedingungen: Grundlagen für die Abgrenzung und Bewertung der Lagerperimeter
- NAB 14-87: Development and evolution of the Excavation Damaged Zone (EDZ) in the Opalinus Clay – A synopsis of the state of knowledge from Mont Terri
- NIB 00-51: Endlager BE/HAA/LMA: Opalinuston Konzeptstudie Anlagen und Betrieb – Felsmechanische Berechnungen und Dimensionierung der Ausbruchsicherung zum Nachweis der baulichen Machbarkeit
- NIB 03-08: Opalinuston – Felsmechanische Untersuchungen
- NIB 10-14: Zusammenstellung von geotechnischen Erfahrungen bei Tunnel- und Schachtbauwerken in der Schweiz

- NIB 10-20: Standortunabhängige Grundlagen, Anlagen und Betrieb SGT-ZE / SUG 2.3 – Orientierende Vordimensionierung für BE/HAA-Lagerstollen in 900 m Tiefe im intakten und gestörten Opalinuston für verschiedene Ausbaukonzepte
- NIB 10-23: Geotechnische Probleme und deren Lösungen im österreichischen Tunnelbau – Erfahrungen aus Tunnel-, Stollen- und Schachtbauwerken in Österreich
- NTB 02-02: Projekt Opalinuston: Entsorgungsnachweis für abgebrannte Brennelemente, verglaste hochaktive sowie langlebige mittelaktive Abfälle – Konzept für die Anlage und den Betrieb eines geologischen Tiefenlagers
- NTB 02-03: Projekt Opalinuston: Synthese der geowissenschaftlichen Untersuchungsergebnisse – Entsorgungsnachweis für abgebrannte Brennelemente, verglaste hochaktive sowie langlebige mittelaktive Abfälle
- NTB 02-05: Demonstration of disposal feasibility for spent fuel, vitrified high-level waste and long-lived intermediate-level waste (Entsorgungsnachweis)
- NTB 02-06: Models, codes and data for safety assessment – Demonstration of disposal feasibility for spent fuel, vitrified high-level waste and long-lived intermediate-level waste (Entsorgungsnachweis)
- NTB 04-06: Effects of post-disposal gas generation in a repository for spent fuel, high-level waste and long-lived intermediate level waste sited in Opalinus Clay
- NTB 08-03: Vorschlag geologischer Standortgebiete für das SMA- und das HAA-Lager – Darlegung der Anforderungen, des Vorgehens und der Ergebnisse
- NTB 08-05: Begründung der Abfallzuteilung, der Barrierensysteme und der Anforderungen an die Geologie – Bericht zur Sicherheit und technischen Machbarkeit
- NTB 10-01: Beurteilung der geologischen Unterlagen für die provisorischen Sicherheitsanalysen in SGT Etappe 2
- NTB 14-01: Sicherheitstechnischer Vergleich und Vorschlag der in Etappe 3 weiter zu untersuchenden geologischen Standortgebiete
- NTB 14-02: SGT Etappe 2: Vorschlag weiter zu untersuchender geologischer Standortgebiete mit zugehörigen Standortarealen für die Oberflächenanlage, Dossiers 1-8
- NTB 14-03: Charakteristische Dosisintervalle und Unterlagen zur Bewertung der Barrierensysteme
- NTB 14-09: Provisional safety analyses for SGT Stage 2: Models, codes and general modelling approach
- NTB 14-10: Modelling of radionuclide transport along the underground access structures of deep geological repositories

#### Weitere konsultierte Referenzen:

Bock, H., Dehandschutter, B., Martin, D., Mazurek, M., Haller, A., Skoczylas, F. und Davy, C.: Self-sealing of fractures in argillaceous formations in the context of geological disposal of radioactive waste, review and synthesis; Nuclear Energy Agency, OECD 2010, NEA No. 6181

Martin, C., Lanyon, G., Bosshart, P. and Blümling, P.: Excavation disturbed zone (EDZ) in clay shale: Mont Terri Technical Report TR 2001-01

**ANHANG 1:**

Herleitung, Beschreibung und Anwendung der sicherheitstechnischen  
Kriterien für die Standortevaluation [HSK 33/001, S. 18/20 & 22]

Kriterien zur Standortevaluation hinsichtlich Sicherheit und technischer Machbarkeit (Tab. 4-1, S. 18).

Kriteriengruppe	Kriterien
1. Eigenschaften des Wirtgesteins bzw. des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches	1.1 Räumliche Ausdehnung 1.2 Hydraulische Barrierenwirkung 1.3 Geochemische Bedingungen 1.4 Freisetzungspfade
2. Langzeitstabilität	2.1 Beständigkeit der Standort- und Gesteinseigenschaften 2.2 Einfluss Erosion 2.3 Lagerbedingte Einflüsse 2.4 Nutzungskonflikte
3. Zuverlässigkeit der geologischen Aussagen	3.1 Charakterisierbarkeit der Gesteine 3.2 Explorierbarkeit der räumlichen Verhältnisse 3.3 Prognostizierbarkeit der Langzeitveränderungen
4. Bautechnische Eignung	4.1 Felsmechanische Eigenschaften und Bedingungen 4.2 Untertägige Erschliessung und Wasserhaltung

Tab. 4-6, S. 20

<i>Kriteriengruppe</i>	<b>2 Langzeitstabilität</b>
<i>Kriterium</i>	<b>2.1 Beständigkeit der Standort- und Gesteinseigenschaften</b>
<i>Zu beurteilende Aspekte</i>	Beurteilt wird die geologische Langzeitstabilität des Standortes und der Gesteinseigenschaften, insbesondere die Möglichkeit einer Beeinträchtigung und Veränderung des Isolationsvermögens des Wirtgesteins bzw. des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches durch geologische Prozesse wie Störung des Gesteinverbandes durch differenzielle Bewegungen (Zerschering, Reaktivierung von Brüchen und Störungszonen, Bildung neuer Wasser- und Gaswegsamkeiten) verursacht durch neotektonische Aktivität (u.a. Seismizität), geochemische Vorgänge (Lösungsprozesse, Karstbildung, Wasser-Gesteins-Wechselwirkungen) oder seltene geologische Ereignisse wie Bruchbildung im Zusammenhang mit starken Erdbeben oder Vulkanismus.
<i>Relevanz für die Sicherheit</i>	Günstig sind Gebiete und Gesteine, die über den für die Sicherheitsbewertung zu betrachtenden Zeitraum die erforderliche Barrierenwirkung gewährleisten können. Günstig sind Gesteine mit einer geringen Neigung zur Bildung neuer Wasserwegsamkeiten und die bei Deformation eine Selbstabdichtung von Rissen/Klüften/Störungen aufweisen. Günstig sind geologische Situationen, bei denen differenzielle Bewegungen innerhalb des Lagerbereiches unwahrscheinlich sind.

Tab. 4-13, S. 22

<i>Kriteriengruppe</i>	<b>4 Bautechnische Eignung</b>
<i>Kriterium</i>	<b>4.1 Felsmechanische Eigenschaften und Bedingungen</b>
<i>Zu beurteilende Aspekte</i>	Beurteilt werden die felsmechanischen Eigenschaften und Bedingungen für Bau, Betrieb, Überwachung und Verschluss des geologischen Tiefenlagers (u.a. Gesteins- und Gebirgsfestigkeiten, Verformungseigenschaften der Gesteine, Tiefenlage und Gebirgsspannungen, Stabilität der Hohlräume, natürliche Gasführung).
<i>Relevanz für die Machbarkeit</i>	Günstig sind bautechnisch einfach beherrschbare Verhältnisse, bei denen sich durch die Tiefenlage keine extremen Anforderungen bei der Erstellung, beim Betrieb, bei der Überwachung (inkl. einer eventuellen Rückholung) oder beim Verschluss des Lagers ergeben. Günstig ist, wenn der Verschluss der Lagerteile ohne technische Probleme mit der erforderlichen Abdichtung realisiert werden kann.

**ANHANG 2:**

Arbeitsunterlagen pH-Fahne

**ENSI 33/70, SEITE 43:**

*"Beurteilung des ENSI: Der Einfluss der Hoch-pH-Fahne wurde bereits im Rahmen des Entsorgungsnachweises für den Opalinuston (HSK 35/99) und im Rahmen des Projekts Wellenberg für die Mergel-Formationen des Helvetikums (HSK 30/26) vom ENSI überprüft. Die Auswirkungen der Hoch-pH-Fahne auf die Sicherheit des Tiefenlagers können aufgrund der heute vorhandenen Kenntnisse der Vorgänge durch umhüllende Szenarien mit entsprechenden Kd-Werten abgeschätzt werden, obwohl die durch den Einfluss von Zementwasser im Wirtgestein entstehenden Umwandlungsprodukte erst teilweise im Detail bekannt sind. Das ENSI teilt die Einschätzung der Nagra, dass in einem hydraulisch gering durchlässigen homogen-porösen Wirtgestein wie z.B. Opalinuston der von der Phasenumwandlung betroffene Bereich räumlich limitiert ist und der Einfluss der Hoch-pH-Fahne auf die Rückhaltefähigkeit des Opalinustons von untergeordneter Bedeutung für die Sicherheit eines geologischen Tiefenlagers ist (HSK 35/99, S. 216)."*

**NAB 14-81, SEITE I:**

*"Diese würde zu einer Schädigung insbesondere der technischen Barrieren (vor allem des Bentonits als Verfüll- und Versiegelungsmaterial) und nachgeordnet des umgebenden Wirtgesteins führen."*

**NTB 02-02, SEITE 61:**

*"Für die Lagerzone stellt sich die Frage, ob die Lagerstollen BE/HAA möglichst ohne schwerere stabilitätsbedingte Einbauten machbar sind. Aus Gründen der Langzeitsicherheit sind zementgebundene Fels-sicherungsmassnahmen wie z.B. Spritzbeton zumindest in jenen Bereichen der Lagerzone nicht erwünscht, wo Abfälle (BE/HAA) einzulagern sind. Die Verwendung von Stahleinbauten als Fels-sicherung ist zwar grundsätzlich zulässig, sollte aber aus verschiedenen Gründen wie z.B. Entstehung von Korrosionsgasen in der Langzeitentwicklung möglichst sparsam erfolgen."*

**NTB 02-03, SEITE V:**

*"Nach dem Verschluss des Lagers entstehen in den LMA-Tunneln durch Wechselwirkung mit dem Zementmörtel hochalkalische Porenwässer, welche mit dem Opalinuston über lange Zeiträume hinweg reagieren. Diese Umwandlungszone könnte langfristig eine maximale Ausdehnung von wenigen Metern erreichen. Die zu erwartenden Mineralneubildungen bewirken eine Reduktion der Porosität und eine Erhöhung der Sorptionskapazität. Die geochemischen Veränderungen haben somit keinen negativen Einfluss auf die Radionuklidrückhaltung."*

**NTB 02-03, SEITE 88:**

*"Beobachtungen an natürlichen, über etwa hunderttausend Jahre aktiven hoch-pH-Fliesssystemen zeigen eine sehr beschränkte diffusive Eindringtiefe (cm-dm) von Mineralumwandlungen in angrenzendes Gestein. Die Umwandlungszone ist demnach kein Negativfaktor für die Sicherheit und führt allenfalls zu einer erhöhten Sorptionskapazität für Radionuklide und örtlich reduzierter Porosität und somit auch zu einer Reduktion der effektiven Diffusionskoeffizienten für Stofftransport."*

**NTB 02-03, SEITE 482:**

*"Die Frühphase der Degradation von Portlandzement ist durch K-Na-reiche Ca(OH)<sub>2</sub>-gesättigte Hydroxidlösungen gekennzeichnet als Folge der präferenziellen Auslaugung der Alkalien (pH > 13). Eine mittlere,*

*langanhaltende Phase kann durch chemisch einfache Ca-Hydroxid-Lösungen dargestellt werden (pH = 12.5) bis alles Ca(OH)<sub>2</sub> verbraucht ist, gefolgt von einer Spätphase, gekennzeichnet durch die Auflösung der Ca-Si-Hydrate (pH < 12). Hochalkalische Porenwässer gelangen diffusiv ins angrenzende Wirtgestein resp. in die Auflockerungszone der Untertagebauten. Figur 7.5-2 stellt die Merkmale einer sich ausbreitenden hoch-pH-Fahne unabhängig vom Gesteinstyp dar. Das hydraulische Regime ist diffusiv (homogen poröses Medium)."*

**NTB 02-03, SEITE 486/487:**

*Zur Eindringtiefe der pH-Fahne: "Dies ergäbe dann eine maximale Eindringtiefe der Hauptumwandlungszone parallel zur Schichtung von etwa 4 m (1.8 m senkrecht zur Schichtung) nach 106 Jahren. Diese tendenziell übertreibende Abschätzung nimmt ein unendliches Reservoir für hochalkalische Lösungen an (pH = 13.2) und vernachlässigt zwar die erhöhte Diffusivität, aber auch die erhöhten Reaktionsraten bei der Lagertemperatur (Mäder 2002b). ... Sowohl Modellrechnungen des reaktiven Transports wie auch Laborexperimente und Feldbeobachtungen an natürlichen Analoga deuten auf eine Zementationszone unmittelbar beim Eintritt der Hoch-pH-Wässer ins Tongestein hin. Für ein rein diffusives Regime breitet sich die Umwandlungszone über einen Zeitraum bis 106 Jahre höchstens wenige Meter ins angrenzende Wirtgestein aus. Kommt es zur vermuteten Zementierung, unter Ausbildung von Zonen mit drastisch reduzierter Porosität, ist die Ausbreitung der Hoch-pH-Fahne noch stärker gehemmt."*

**NTB 02-05, SEITE 153:**

*"In the limiting case for the spreading of a pH plume in a diffusion-dominated system involves the assumption that all of the cement in the near field will degrade and that the hydroxide released will diffuse into the Opalinus Clay and react with its component. Using a mass balance basis, a high pH plume would reach about 4 metres into the host rock, consuming about 10% of the total buffering capacity of the Opalinus Clay components (Mäder 2003). Such conditions can probably only be reached after an extremely long time span (millions of years). ... It is worth noting that in a diffusion-dominated system, a high pH plume may be to some degree beneficial, in that transport is slowed down due to sealing effects and the radionuclide retention properties of the secondary minerals are at least as good as those of the original minerals (Bradbury & Baeyens 1997 and 2003c). Moreover, an increased pH value leads to stronger sorption for many radionuclides."*

**NTB 02-05, SEITE 164:**

*"In the vicinity of the ILW repository, sorption may be affected by high pH plume generated by the cementitious backfill in the emplacement tunnels. The rate of high pH front propagation is small. The propagation rate, however may be faster than the migration of many strongly sorbing radionuclides, but the ultimate extent of propagation will be small (maximum ≈ 4 m) due to the limited amount of degradable cement in the ILW repository and the low diffusivity of Opalinus Clay. The principal pH induced effects include changes in the composition of the porewater and changed mineralogy (Mäder 2003), which may influence sorption of radionuclides, although retention properties of alteration products are also good (Bradbury & Baeyens 1997 and 2003c)."*

**NTB 02-05, SEITE 175:**

*"High pH migration into rock / Porosity reduction in rock, self-sealing (conservatively neglected), depth of reaction front very limited / 4 maximum disturbance of Opalinus Caly based on mass balance."*

**NTB 08-03, SEITE 164:**

*"Im Unterschied zu SMA spielt bei HAA die Hoch pH-Fahne im Referenzfall keine Rolle (keine Verwendung von Zementhaltigen Materialien). Der Indikator "chemische Wechselwirkungen" darf deshalb mit sehr günstig bewertet werden."*

**NTB 08-03, SEITE 175:**

*"Bei den BE/HAA-Lagerstollen sollen zu ihrer Sicherung zementhaltige Baumaterialien (speziell Portlandzement) möglichst sparsam verwendet werden."*

**NTB 08-05, SEITE 121:**

*"Bei einem homogen-porösen Gestein mit diffusionsdominiertem Transport wie etwa Opalinuston verlaufen die Zementdegradation und die Entwicklung einer Hoch-pH Fahne wegen des geringen Wasseraustauschs zwischen dem Gestein und dem zementhaltigen Nahfeld sehr langsam über Millionen von Jahren. Eine Hoch-pH-Fahne ist örtlich beschränkt und würde sich weniger als 10 Meter in das Gestein ausdehnen, selbst wenn sämtlicher Zementstein in Lagerkammern degradiert würde. ... Durch die Mineralumwandlung im Wirtgestein und die vom Nahfeld verursachte Porenwasserzusammensetzung wird sich die Sorption elementspezifisch verändern: die Gesamtretardierung der Radionuklide im Einflussbereich einer pH-Fahne ist aber der Gesamtretardierung im ungestörten Wirtgestein etwa ebenbürtig (Bradbury & Baeyens 1997 and 2004). Durch den Einbau von Sekundärmineralen können Radionuklide sogar längerfristig immobilisiert werden."*

**NTB 08-05, SEITE171:**

*"Der pH-Wert hat einen massgeblichen Einfluss auf die Rückhaltung und die Transporteigenschaften der Radionuklide in den technischen Barrieren (insbesondere Sorption der Radionuklide durch Oberflächenkomplexierung)."*

**NTB 08-05, SEITE A1-107:**

*"Für die BE/HAA-Lagerstollen im Opalinuston mit flächendeckendem niedrig-pH Spritzbetonausbau und Zwischensiegel sind Auswirkungen einer pH-Fahne auf das Wirtgestein noch geringer und werden deshalb ebenfalls nicht explizit in den Dosisberechnungen abgebildet (Bradbury et al. 2004)."*

**NTB 10-01, SEITE 140:**

*"In ungeklüfteten Tongesteinen ist eine pH-Fahne auf die nächste Umgebung des Zementnahfeldes beschränkt".*

**NTB 10-01, SEITE 144:**

*"Für ein SMA- bzw. LMA-Lager in einem homogen-porösen Gestein mit diffusionsdominiertem Transport wie Opalinuston verlaufen die Zementdegradation und die Entwicklung einer Hoch-pH-Fahne wegen des geringen Wasseraustauschs zwischen dem Gestein und dem zementhaltigen Nahfeld sehr langsam über*

*Millionen von Jahren ab. Eine pH-Fahne ist örtlich beschränkt und würde sich weniger als 10 Meter in das Gestein ausdehnen, selbst wenn sämtlicher Zementstein in den Lagerkammern degradiert würde."*

**NTB 10-01, SEITE 147:**

*"Die Sicherheitsrelevanten Auswirkungen der Wechselwirkungsprozesse zwischen Zement und Bentonit bzw. Opalinuston lassen sich wie folgt zusammenfassen: Die hydraulische Durchlässigkeit des zementhaltigen Spritzbetonausbau wird im Vergleich zum Opalinuston bzw. der Bentonit-Verfüllung erhöht sein (Rissbildung, Degradation, Erhöhung der Porosität). Die an den zementhaltigen Spritzbetonausbau angrenzende Bentonit-Verfüllung wird durch die pH-Fahne langsam und lokal degradiert. Die Mächtigkeit dieser Zone mit stark degradiertem Bentonit ist gering (Zentimeterbereich), insbesondere auch weil der Einsatz von "Niedrig-pH"-Zement vorgesehen ist. Das Quellvermögen wird in dieser Zone aber lokal stark reduziert, und es wird konservativ angenommen, dass auch das Quellvermögen der Verfüllung etwas reduziert, aber keine Auswirkungen auf das Radionuklid-Rückhaltevermögen hat. Für den Opalinuston gelten sinngemässe Aussagen, allerdings sind die sicherheitstechnischen Auswirkungen aufgrund der weit grösseren Mächtigkeit der geologischen Barriere nicht von Belang. Zwischen der durch die pH-Fahne degradierten bzw. veränderten Zone und der thermisch/chemisch veränderten Zone in der Umgebung der BE/HAA-Behälter bleiben die vorteilhaften Eigenschaften der Bentonit-Verfüllung für längere Zeit praktisch unverändert."*

**NTB 10-01, SEITE 148/149:**

*"Bezüglich des Transportes in radialer Richtung wurden Rechnungen durchgeführt, welche die potenziell degradierten Anteile der Transportbarriere in radialer Richtung berücksichtigen. Neben dem Fall "ohne Liner" wurden auch zwei Fälle "mit Liner" betrachtet. Während im Basisfall "mit Liner" nur der äussere Teil der Bentonit-Verfüllung als degradiert angenommen wird, wird im abdeckenden Fall hypothetisch angenommen, dass die gesamte Bentonit-Verfüllung degradiert ist. Der Vergleich mit Rechnungen "ohne Liner" (d.h. ohne Degradation) zeigt, dass die Barrierenwirkung des Nahfelds nur geringfügig beeinträchtigt wird und die Auswirkungen auf die berechneten Freisetzungsraten aus der Geosphäre vernachlässigbar sind."*

**NTB 10-01, SEITE 159:**

*"Bentonit-Nahfeld des HAA-Lagers: Von den Porenwasserparametern im Opalinuston kann der Einfluss des pH-Wertes (PG-16) und der Redox-Bedingungen (PG-17) auf die Advektion und Diffusion vernachlässigt werden. Eine Ionenstärke (PG-18) von über 0.7 Mol/L ist im Opalinuston nicht zu erwarten. Eine Beeinträchtigung der Quellfähigkeit des Bentonits und eine Erhöhung der hydraulischen Durchlässigkeit kann deshalb ausgeschlossen werden."*

**NTB 10-01, SEITE 166:**

*"Es wurde aufgezeigt, dass bei geeigneter Lagerauslegung die lagerbedingten Einflüsse und die Einflüsse von bautechnischen Auslegungsvarianten die Sicherheit des HAA- oder SMA-Lagers nicht massgebend beeinflussen oder dass sie durch eine geeignete Parametrisierung der Rechenfälle abdeckend erfasst werden. Deshalb werden sie in den Testrechnungen im vorliegenden Bericht nicht explizit berücksichtigt."*

**NTB 10-01, SEITE 189:**

*"Für die BE/HAA-Lagerstollen zeigen die Abklärungen, dass auch ein vollflächiger Ausbau mit "Niedrig-pH-Spritzbeton" keine signifikanten Auswirkungen auf die Langzeitsicherheit hat, auch dann nicht, wenn extrem ungünstige Parameterwerte verwendet werden."*

**NTB 14-01, SEITE 25:**

*"Im Sinne einer sicherheitsgerichteten Optimierung soll der Einsatz von Spritzbeton und weiteren zementhaltigen Materialien bei den BE/HAA-Lagerstollen und Versiegelungsstrecken soweit eingeschränkt werden, dass die Bentonitumwandlung begrenzt bleibt (kurzfristige Umwandlung von Na-Bentonit in Ca-Bentonit, langfristige Auswirkungen der pH-Fahne). Die Spritzbetonstärke soll deshalb auf rund 30 cm beschränkt werden, und auch die Menge an verwendetem Stahl soll genügend klein gehalten werden."*

**NTB 14-01, SEITE 109:**

*"Die wichtigsten lagerbedingten geochemischen Effekte sind Langzeitauswirkungen von alkalischen Zementporenwässern auf das Umfeld der Lagerkammern und die Oxidation des Wirtgesteins während der Bau- und Betriebsphase. Die Umwandlungszone als Folge der alkalischen Zementporenwässer ist räumlich sehr beschränkt und nicht nachteilig für die Langzeitsicherheit; die gebildeten Sekundärminerale führen allenfalls zu einer erhöhten Sorptionskapazität für Radionuklide."*

**NTB 14-01, SEITE 145:**

*"Aufgrund der Verwendung von Spritzbeton für die BE/HAA-Lagerstollen und LMA-Lagerkammern sind die wichtigsten geochemischen Effekte Langzeitwirkungen von alkalischen Zementporenwässern auf das Umfeld und Oxidation des Wirtgesteins während Bau- und Betriebsphase; die Effekte werden als unproblematisch beurteilt. Der Indikator "Chemische Wechselwirkungen" darf deshalb in allen Standortgebieten mit sehr günstig bewertet werden."*

**NTB 14-01, SEITE 147:**

*"Die HAA-Lagerstollen werden voraussichtlich in allen Standortgebieten mit einem vollflächigen Ausbau gesichert, allerdings ist es – anders als im Falle der SMA-Lagerkammern – aus sicherheitstechnischen Gründen vorteilhaft, den Einbau von zementhaltigen Materialien (speziell Portlandzement) auf das notwendigste Mass zu beschränken."*

**NTB 14-01, SEITE 147:**

*"Für die BE/HAA-Lagerstollen im Opalinuston mit flächendeckendem niedrig-pH Spritzbetonausbau und Zwischensiegel sind Auswirkungen einer pH-Fahne auf das Wirtgestein noch geringer und werden deshalb ebenfalls nicht explizit in den Dosisberechnungen abgebildet (Bradbury et al. 2014)."*

**NTB 14-03, SEITE A-17/18:**

*"Die an den zementhaltigen Spritzbetonausbau angrenzende Bentonit-Verfüllung wird durch die pH-Fahne langsam und lokal degradiert. Die Mächtigkeit dieser Zone mit stark degradiertem Bentonit ist gering (ca. 20 cm), insbesondere auch weil der Einsatz von "Niedrig-pH"-Zement vorgesehen ist."*

**NTB 14-03, SEITE A-17/18:**

*"Das Quellvermögen wird in dieser Zone aber lokal stark reduziert. Das Radionuklid-Rückhaltevermögen bzw. -Transportvermögen (Sorption, Löslichkeitslimitierung, Diffusion) in dieser Zone wird gegenüber dem ursprünglichen Bentonit nur geringfügig verändert, weil die hohe Pufferkapazität des Bentonits sicherstellt, dass der pH nur minim erhöht wird. Deshalb werden die Transportparameter in den Dosisberechnungen als unverändert angenommen. In grösserem Abstand zum Spritzbetonausbau findet nur eine Umwandlung von Na- zu Ca-Bentonit statt, was zwar das Quellvermögen der Verfüllung etwas reduziert, aber keine Auswirkungen auf das Radionuklid-Rückhaltevermögen hat. Für den Opalinuston gelten sinn-gemässe Aussagen, allerdings sind die sicherheitstechnischen Auswirkungen aufgrund der weit grösseren Mächtigkeit der geologischen Barriere nicht von Belang."*

**NTB 14-09, SEITE 102:**

*"There may be some mineral alteration in the Opalinus Clay host rock at its interface with the tunnel due to interaction with the degradation products of cementitious and ferrous materials used for tunnel reinforcement. Its impact on nuclide release and transport is, however, assumed to be negligible in view of the fact that any altered zone will be small compared with the transport path lengths in the undisturbed host rock."*

**ANHANG 3:**

Errechnete maximale vertikale Ausdehnung der plastischen Zone

Bei der Diskussion der erlaubten minimalen Länge des vertikalen Freisetzungspfades sollte die maximale vertikale Ausdehnung der plastischen Zone 5 m nicht überschreiten. Man gewinnt aufgrund der Erläuterungen in NAB 14-81 (S. 1 & 4) den Eindruck, bei einer Tiefenlage von 900 m würde sich eine relevant grössere Ausdehnung der plastischen Zone als 5 m ergeben. Dies ist jedoch weder aufgrund der Berechnungen der Nagra [NAB 14-81, S. 83-87; NAB 14-81, S. 88/89] noch jener anderer Autoren und EN-SI-Experten [Amman und Löw 2009, S. 29] der Fall<sup>1</sup>:

*Mit zunehmender Überdeckung nimmt die Ausdehnung der plastischen Zone signifikant zu und erreicht bei 900 m Überlagerung rund 3-3.5 m vertikale Erstreckung (Firste & Sohle) und etwa 1-1.5 m horizontale Erstreckung (Ulmen). [Amman und Löw 2009, S. 29]*

Die vertikale Ausdehnung der plastischen Zone bei 900 m Überlagerung übersteigt selbst für den Berechnungsfall mit "vollständig tektonisch beanspruchtem Opalinuston" und mit dem Höchstwert des Seitendruckkoeffizienten von  $K = 1.7$  den Wert von 5 m nicht. [NAB 10-41, S. 36; NAB 14-81, S. 88]

Rechnet man mit einer undrainierten Scherfestigkeit ( $S_u = 8$  MPa) unter Berücksichtigung der "kompaktionsbedingten Zunahme mit der Tiefe", so ergibt sich für 900 m Tiefe ein Wert der vertikalen Ausdehnung der plastischen Zone von lediglich 5.1 m [NAB 14-87, S. 164; NAB 14-81, S. 76, Tab. 5.5-1, S. 77, Fig. 5.5-6]. Selbst aufgrund eines völlig anderen Berechnungsmodelles (FEMDM) mit "spatial distribution of equivalent fracture density" weist die Ausdehnung der so eigenwillig interpretierten Auflockerungszone für einen sehr ungünstigen primären Spannungszustand ( $\sigma_v = 19.6$  MPa,  $\sigma_h = 25.5$  MPa) nicht über die Grenze von 5 m:

*A characteristic common to all FEMDMs is that fracture density drops dramatically to almost negligible values after a radial distance ~ 4.25 m (radial distances are always measured with respect to the center of the gallery). [NAB 13-94, S. 54 & 60]*

---

<sup>1</sup> Wir gehen auf die Ergebnisse, welche man mit dem Kennlinienverfahren erhalten, nicht ein, da die Voraussetzungen der Modellbildung und die angenommenen Parameter nicht begründbar sind [NAB 14-81, S. 59 & 65].