

Endlagerforschung und Standortsuche: Quo Vadis

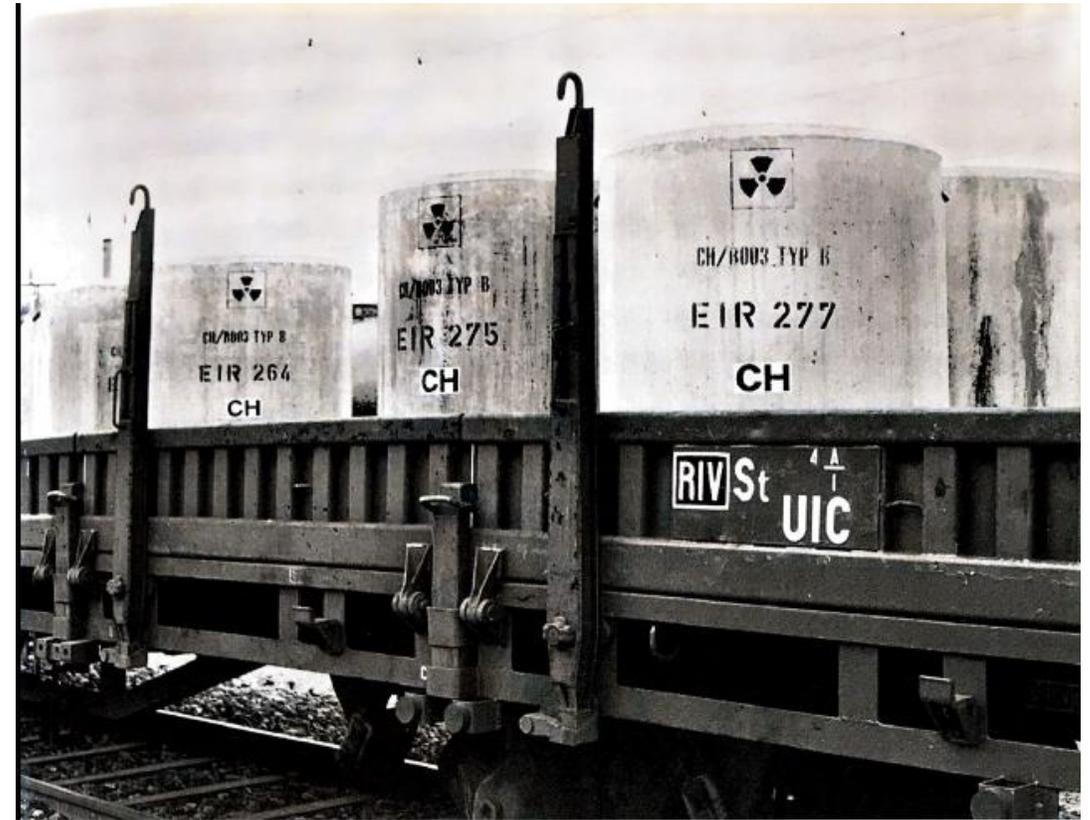
Simon Löw, Professur für Ingenieurgeologie, ETH Zürich

Inhalt

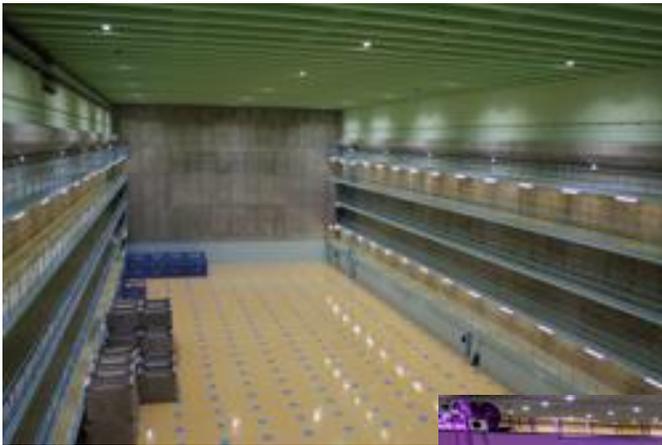
- Die Standortsuche der letzten 40 Jahre
 - Endlagerprogramm für hochaktive und langlebige mittelaktive Abfälle HAA/LMA
 - Endlagerprogramm für kurzlebige schwach und mittelaktive Abfälle SMA
 - Der Sachplan Geologische Tiefenlager
- Heutige Schlüsselfragen und Forschung zur Langzeitsicherheit
 - Gekoppelte Prozesse im Nahfeld
 - Korrosionsgase und das EGTS
 - Felsmechanische Eigenschaften und PF Experiment
- Schlussbemerkungen und Ausblick

Die Schweiz versenkt 1969 bis 1982 schwach- und mittelaktive Abfälle im Nordatlantik (200-730 Tonnen pro Jahr).

Hadermann et al. 2014



Die hochaktiven Abfälle aus der Wiederaufarbeitung müssen ab 1992 zurückgenommen werden. 2006 verbietet das Parlament die Wiederaufbereitung. Die Abfälle werden im Zwiilag (AG) gelagert.



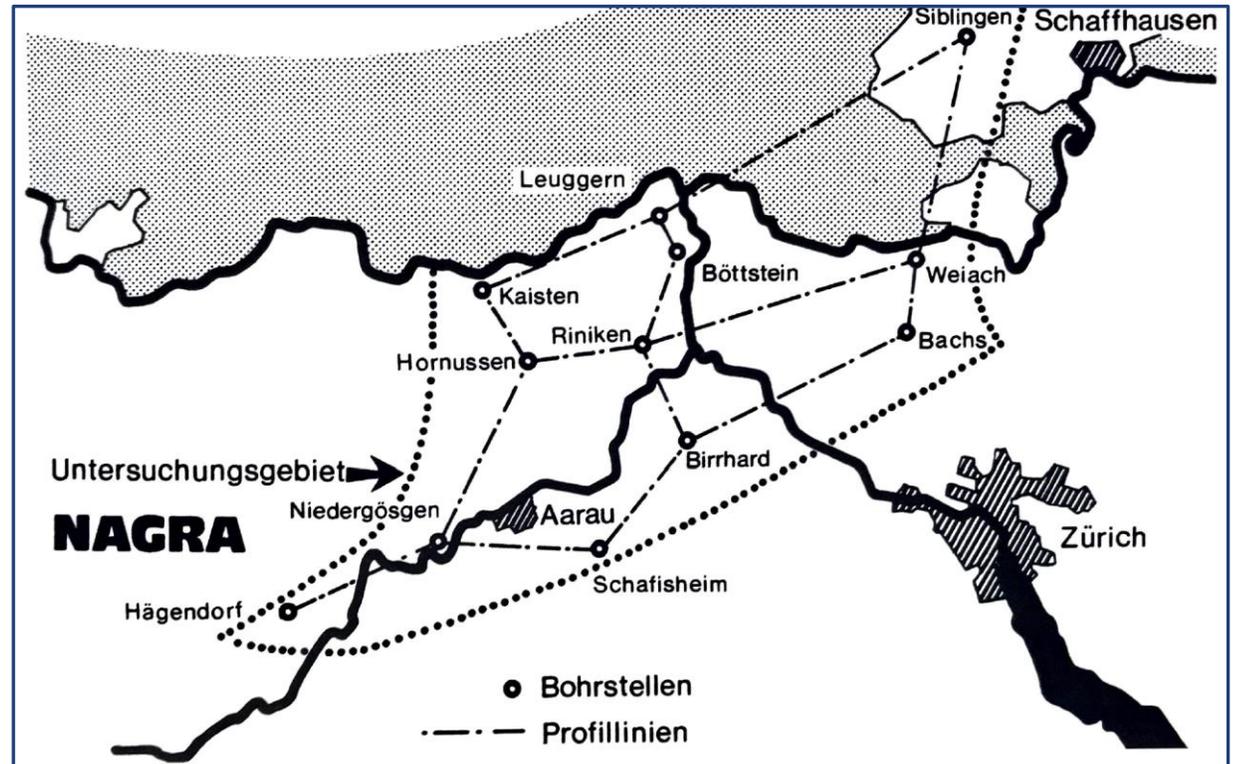
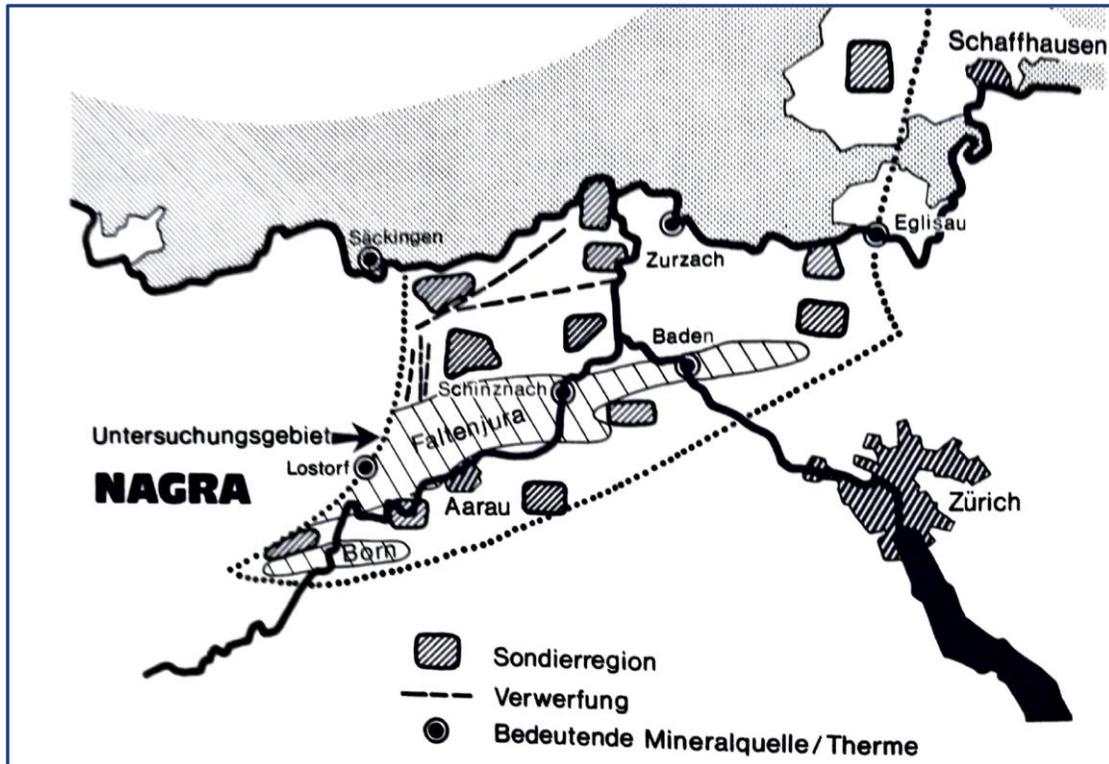
Entsorgungsnachweis für ein Endlager für kurzlebige radioaktive Abfälle (Projekt Gewähr, Nagra NGB 85-01, HSK 1986)

- Der Bundesbeschluss von Oktober 1978 zum Schweizer Atomgesetz verfügt, dass für den weiteren Betrieb der Kernkraftwerke bis zum 31.12.1985 ein Nachweis der dauernden sicheren Entsorgung und Endlagerung der radioaktiven Abfälle zu erbringen ist.
- Die ASK/HSK erarbeitet schrittweise (1980, 1993) detaillierte Anforderungen an diesen Nachweis und führt im Jahr 1993 explizite probabilistische Schutzziele ein.
- Für SMA reicht die Nagra mit dem „Projekt Gewähr 1985“ einen Entsorgungsnachweis am Standort „Oberbauenstock“ ein, welcher von der HSK überprüft und 1986 gutgeheissen wird. Der Bundesrat bestätigt diesen Entsorgungsnachweis für SMA im Jahr 1988.

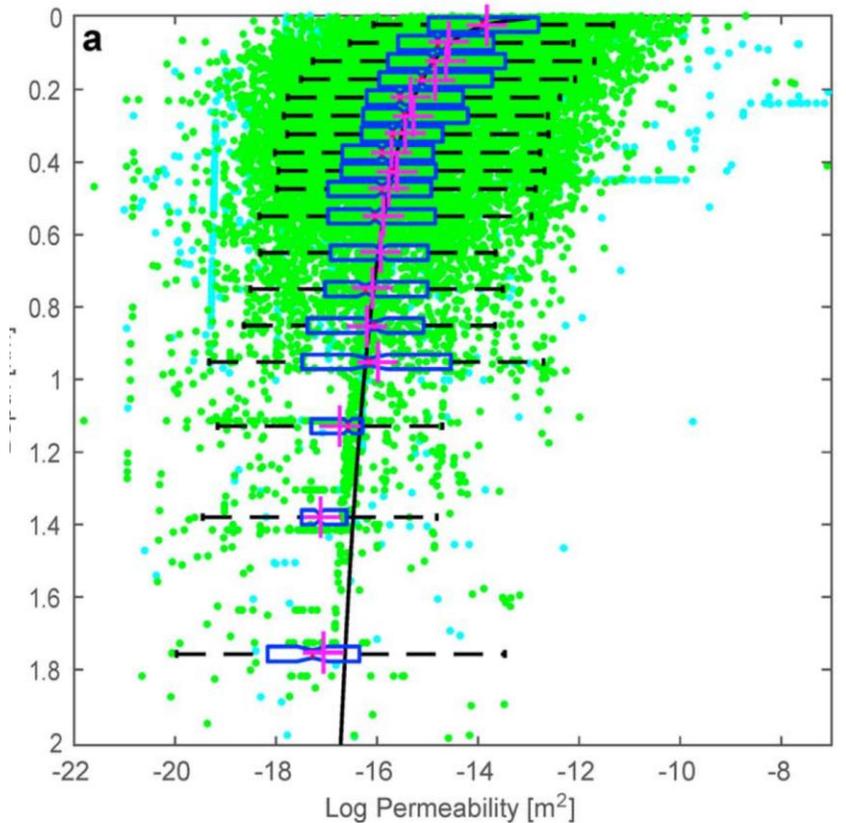
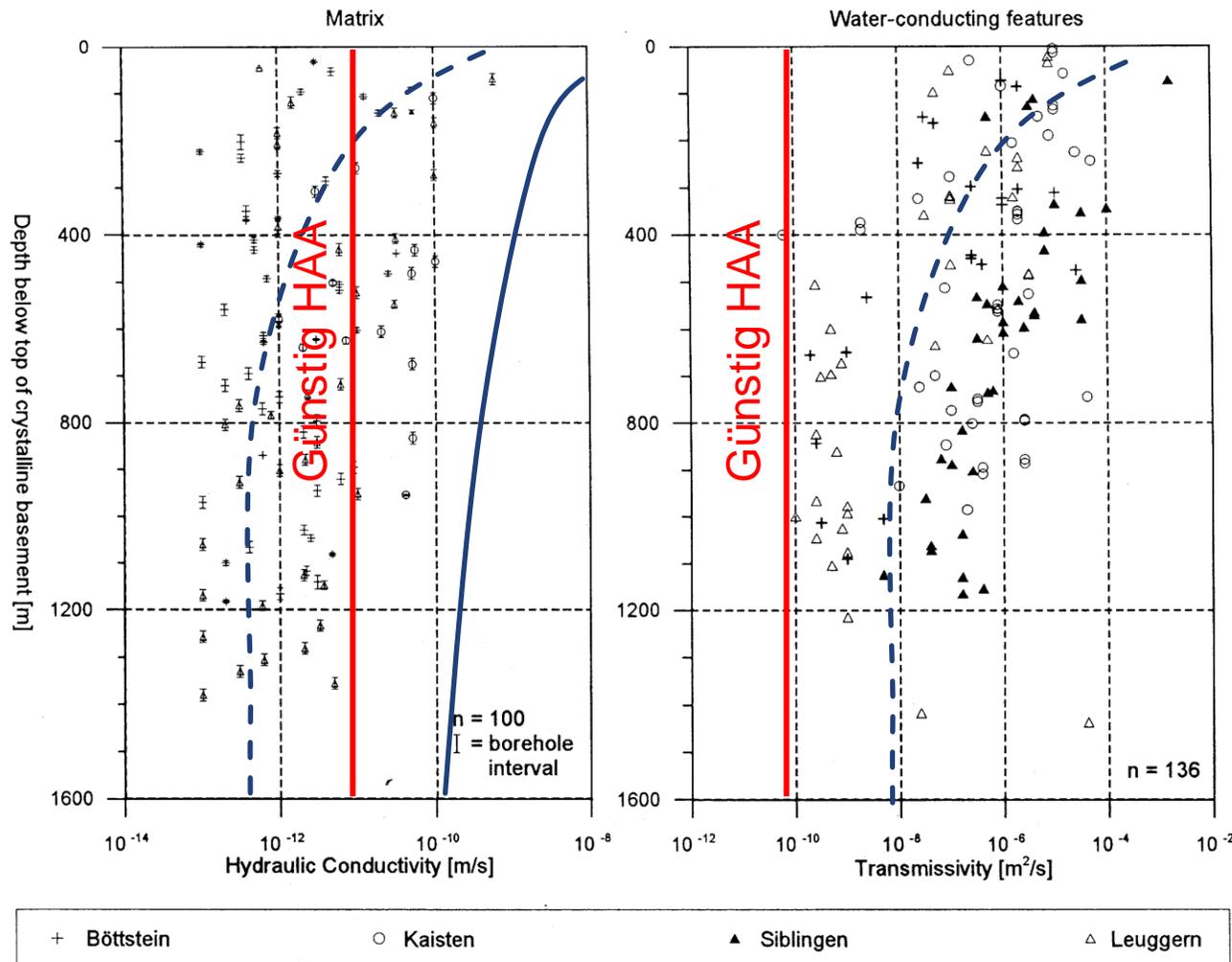
Entsorgungsnachweis für ein Endlager für hochaktive Abfälle (Nagra NGB 85-01, NTB 02-02, HSK 1986, HSK 2005, KNE 2005)

- Im Jahr 1985 wird von der Nagra ein Entsorgungsnachweis für HAA Abfälle im Kristallin der Nordschweiz eingereicht. Die HSK und KNE beurteilen im Jahr 1986 die Suche nach einem geeigneten Standort im kristallinen Grundgebirge der Nordschweiz als schwierig, aufwendig und ohne Garantie auf Erfolg.
- Der Bundesrat schliesst sich diesem Urteil in seiner Entscheidung zum Projekt Gewähr an und fordert die Nagra auf, ihre Erkundungen auf Sedimentgesteine auszuweiten. Die Nagra konzentriert ihre Arbeiten deshalb ab 1988 auf Sedimentgesteine und führt im Jahr 1997 3D Seismik und 1998/99 die Bohrung Benken aus.
- 2002 wird von der Nagra ein Entsorgungsnachweis für ein geologisches HAA-Tiefenlager im Opalinuston des Zürcher Weinlandes eingereicht, 2005 von HSK/KNE/KNS positiv beurteilt und 2006 vom Bundesrat genehmigt.

12 Sondierregionen und Bohrstandorte im Kristallin 1980



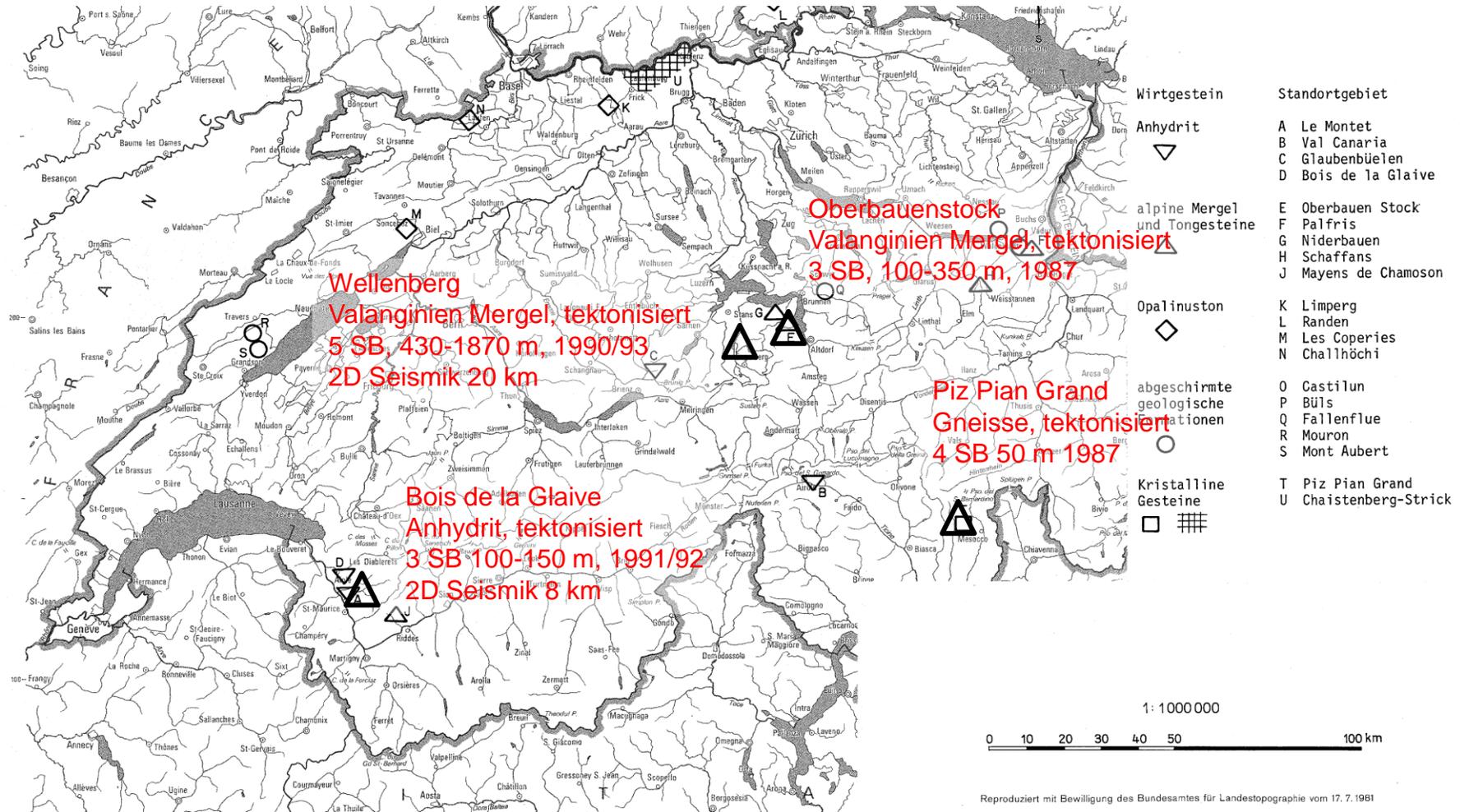
Hydraulische Durchlässigkeiten im Kristallin der Nordschweiz (NTB 93-01), globaler Vergleich und heutige Bewertungskriterien



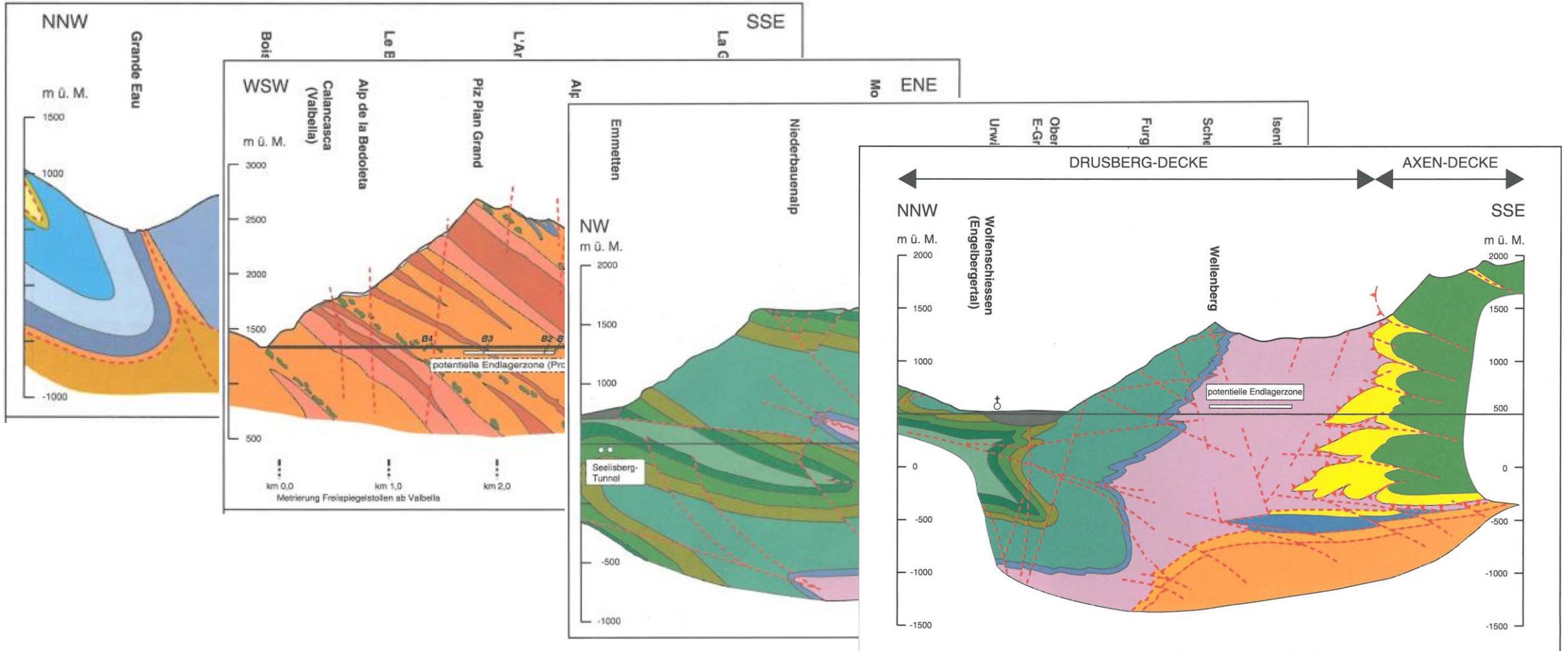
Standortwahl und Rahmenbewilligung für ein Endlager für kurzlebige radioaktive Abfälle (NTB 93-15, GNW 1994, HSK 1996)

- Das Verfahren der Nagra zur Standortevaluation beginnt bereits 1978. Aus den ursprünglich 100 Standortoptionen werden in mehreren Zwischenschritten insgesamt vier potentielle Standorte in drei verschiedenen Wirtgesteinen gewählt.
- Für diese Standorte unterbreitet die Nagra in den Jahren 1983, 1987, 1988 dem Bundesrat Gesuche um die Erteilung von Bewilligungen für Sondierstollen, Schacht, Bohrungen und geophysikalische Messungen. Stollen und Schacht in die Endlagerzone werden nicht bewilligt.
- Bei den Standorten Bois de la Glaive, Oberbauenstock und Piz Pian Grand werden nur wenige kurze (50-150 m) Sondierbohrungen ausgeführt. Das Sondierprogramm am Wellenberg ist wesentlich umfangreicher als an den übrigen drei Standorten.
- Die unterschiedliche politische Akzeptanz verursacht grossen zusätzlichen Zeitaufwand für rechtliche Schritte. Am Bois de la Glaive muss zur Durchführung der erforderlichen Untersuchungen der Weg einer Enteignung beschritten werden.

SMA Standortgebiete der engeren Wahl 1981 (NTB 81-04) und Sondiergesuche 1983



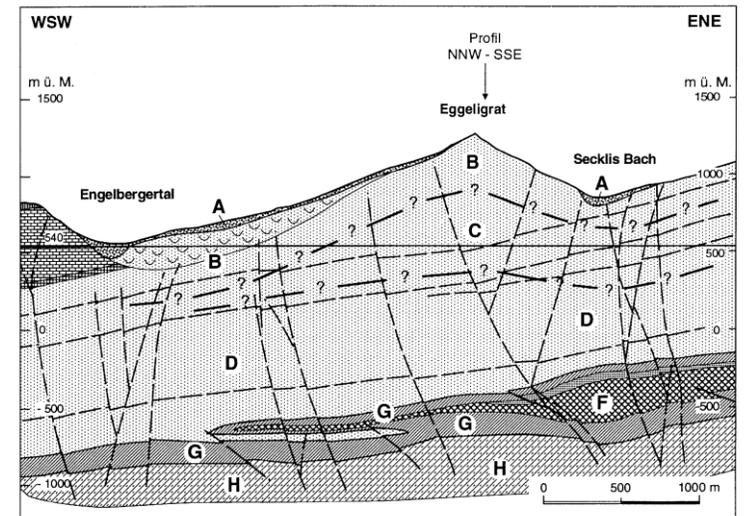
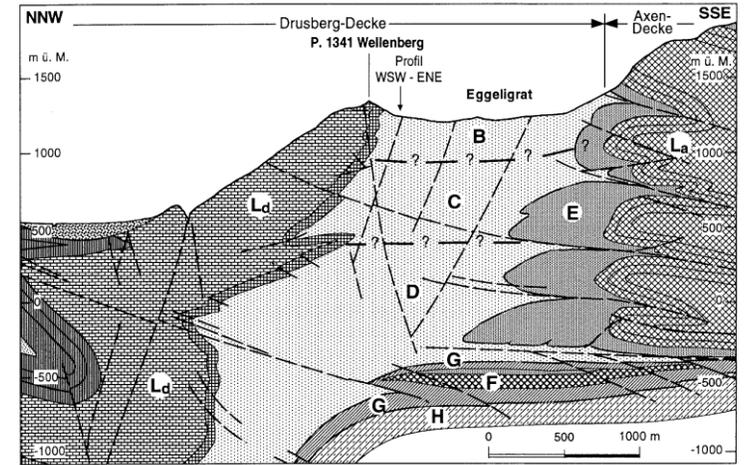
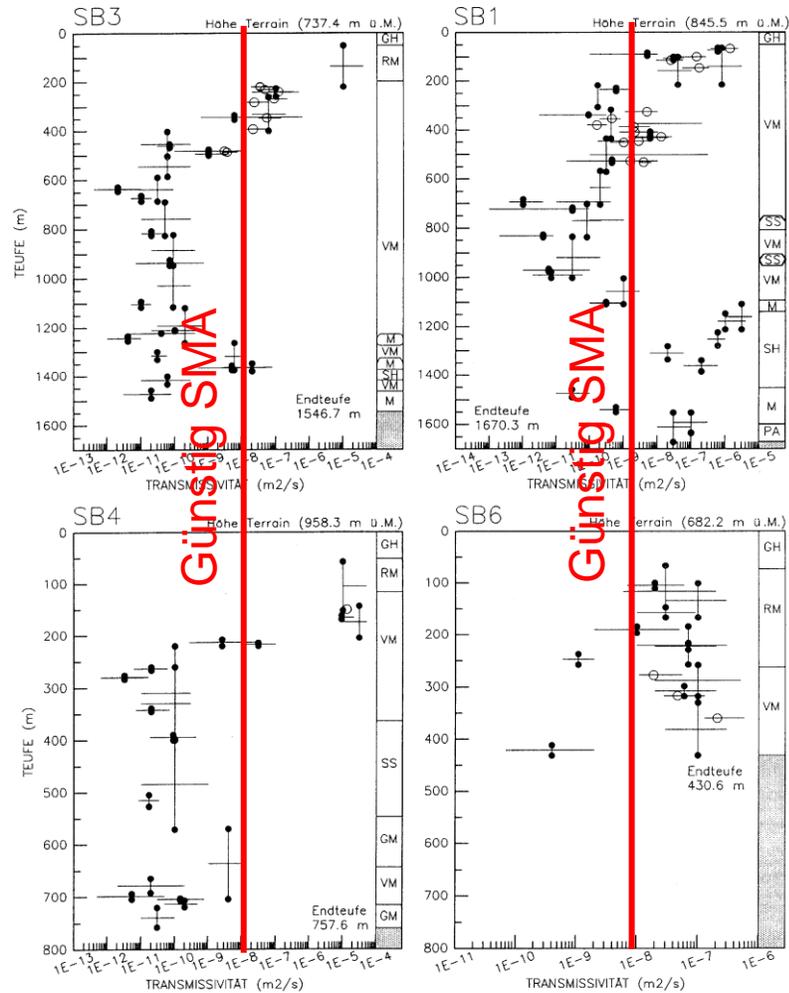
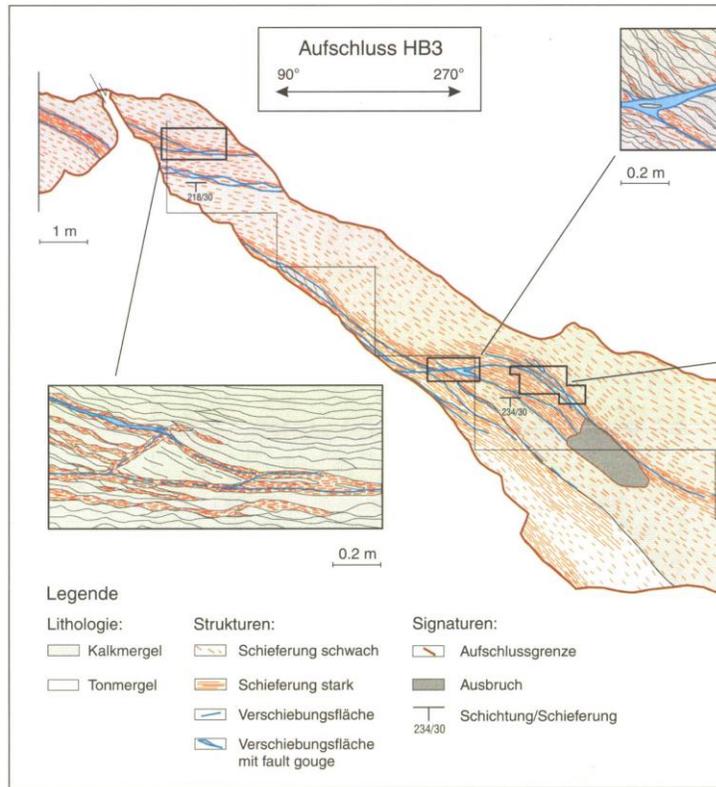
Geologische Profile mit SMA-Lager auf/über Niveau Vorfluter in tektonisierten Alpen Deckenstapeln (NTB 93-1)



Standortwahl und Rahmenbewilligung für ein Endlager für kurzlebige radioaktive Abfälle (NTB 93-15, GNW 1994, HSK 1996)

- Die geologischen Verhältnisse am Standort Wellenberg werden von der Nagra am geeignetsten bewertet (insb. gute Explorierbarkeit, grosses Platzangebot, gute Verkehrserschliessung)
- Das Rahmenbewilligungs-Gesuch für ein SMA Lager am Standort Wellenberg wird im Juni 1994 durch die Nagra (GNW) eingereicht, und im Mai 1996 positiv durch die HSK geprüft (mit Auflagen).
- Am 25. Juni 1995 lehnen jedoch die Nidwaldner Stimmbürger/innen die Stellungnahme der Nidwaldner Regierung zum Rahmenbewilligungsgesuch und die Erteilung der Konzession zur Nutzung des Untergrundes knapp (52%) ab.
- Am 4. Juni 1997 sistiert das UVEK das Rahmenbewilligungsverfahren.
- Die Standortsuche für ein SMA/LMA Lager ist über Jahre blockiert

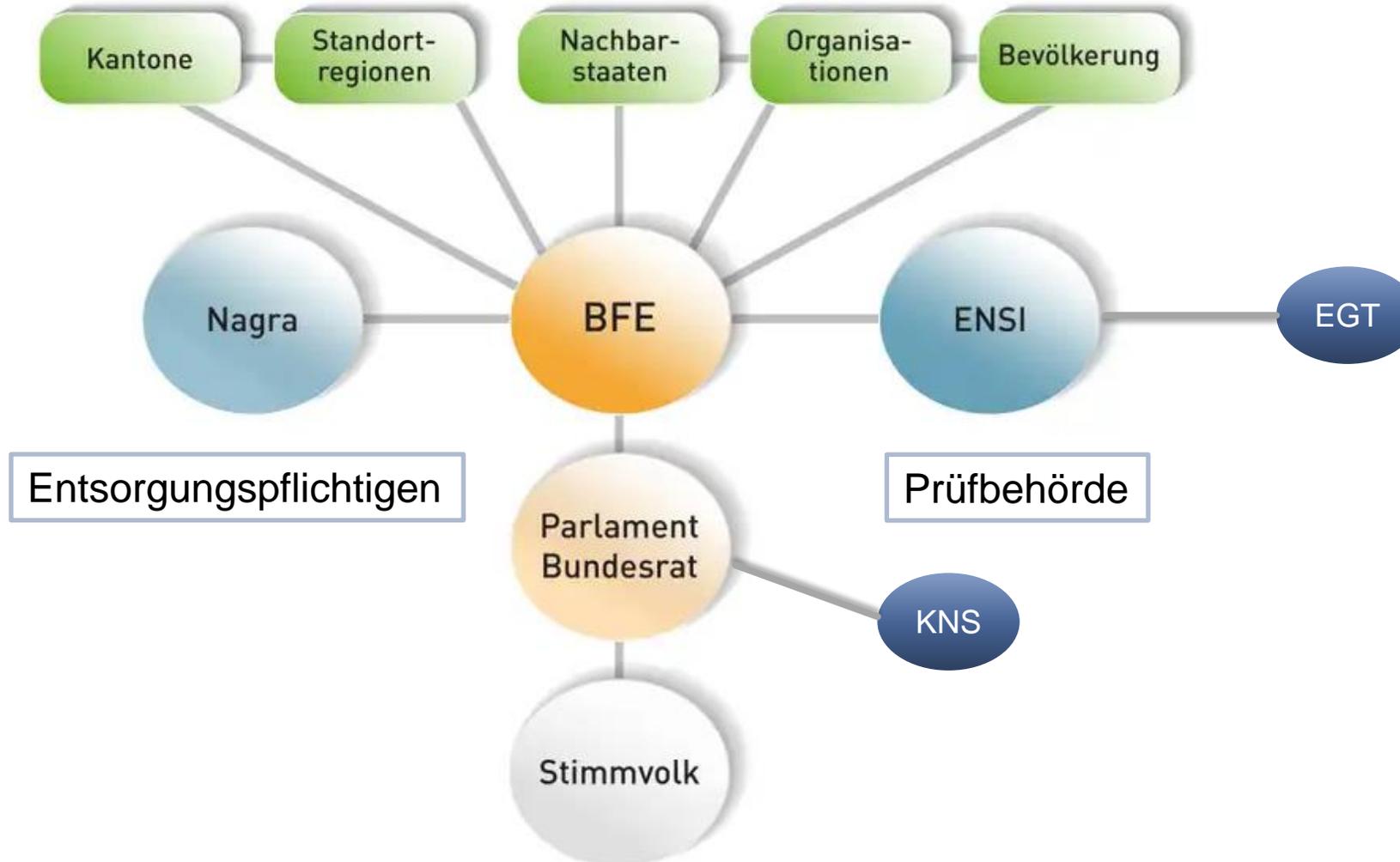
Tektonische, lithologische und hydraulische Komplexität am Standort Wellenberg (NTB 93-28, 96-01)



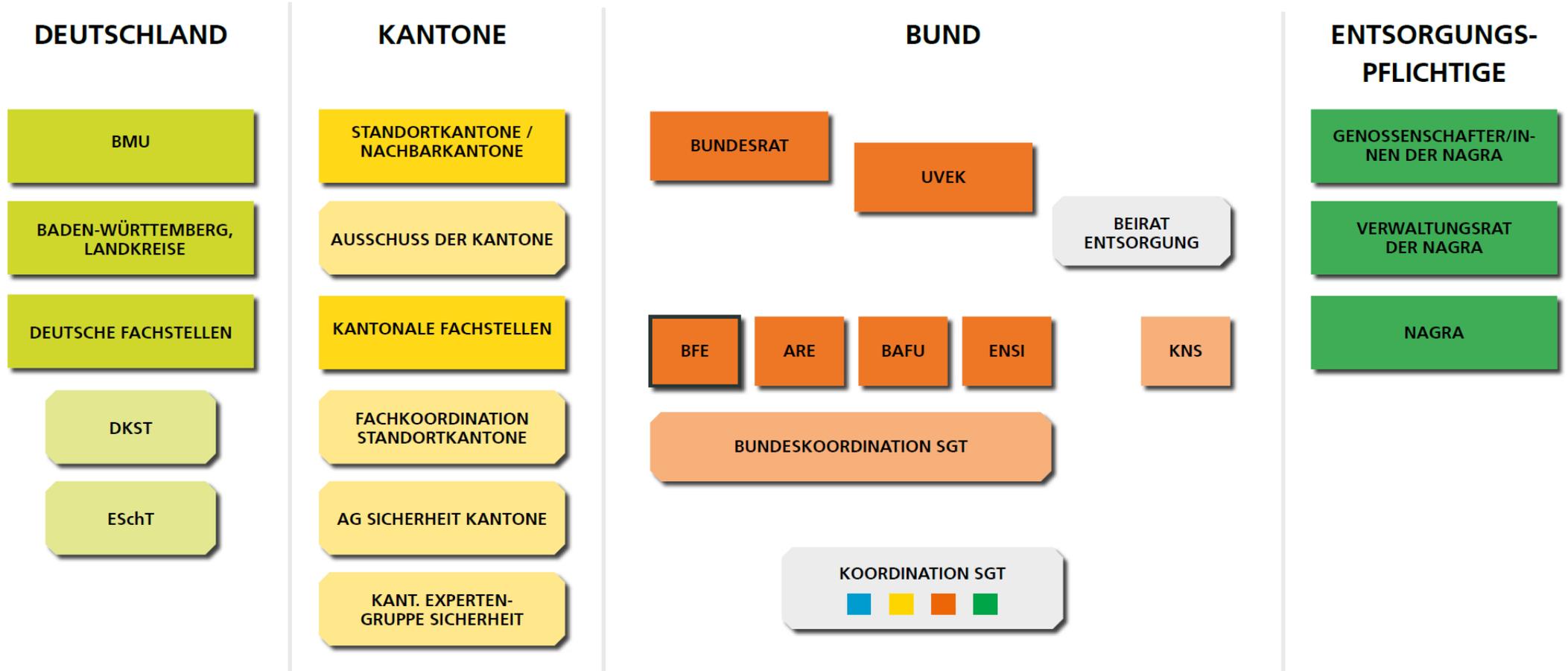
Das Kernenergiegesetz vom 21. März 2003 (KEG) und die Kernenergieverordnung vom 10. Dezember 2004 (KEV)

- KEG und KEV traten am 1. Februar 2005 in Kraft und ersetzen das Atomgesetz vom 23. Dezember 1959. Sie regeln die Entsorgung der radioaktiven Abfälle neu und umfassend.
- Neu obliegen die Bewilligungen für Kernanlagen und erdwissenschaftliche Untersuchungen nur dem Bund. Beschwerdeinstanz ist ein verwaltungsunabhängiges Gericht. Die Sicherheitsbehörden werden vom Bundesamt für Energie getrennt.
- In Anlehnung an die EKRA sollen die Abfälle in ein „geologisches Tiefenlager“ mit langjähriger Beobachtungsphase und einfacher Rückholbarkeit sowie einem Pilotlager und Testbereichen verbracht werden.
- Der Bund übernimmt im sog. „Sachplan geologische Tiefenlager“ eine Führungsrolle bei der Standortwahl ohne den Verursachern die Verantwortung für die Entsorgung der Abfälle abzunehmen.

Hauptakteure im Sachplan Geologische Tiefenlager (SGT)



Eine umfassende Partizipation im Sachplan Geologische Tiefenlager



Etappen und Zeitplan des Sachplans Geologische Tiefenlager

Etappen

Erarbeitung des **Konzeptteils SGT** unter breitem Einbezug

Zeitdauer

Dezember 2004
bis April 2008

Etappe 1 (Vorschlag und behördliche Prüfung von sechs SMA und 3 HAA Standortgebieten, Aufbau der regionalen Partizipation)

April 2008
bis Dezember 2011

Etappe 2 (Platzierung der Oberflächenanlagen, Mitwirkung der Regionalkonferenzen, Vorschlag und behördliche Prüfung von 3 Standortgebieten, Nachforderungen zur Bautechnik, 3D Seismik)

Dezember 2011
bis November 2018

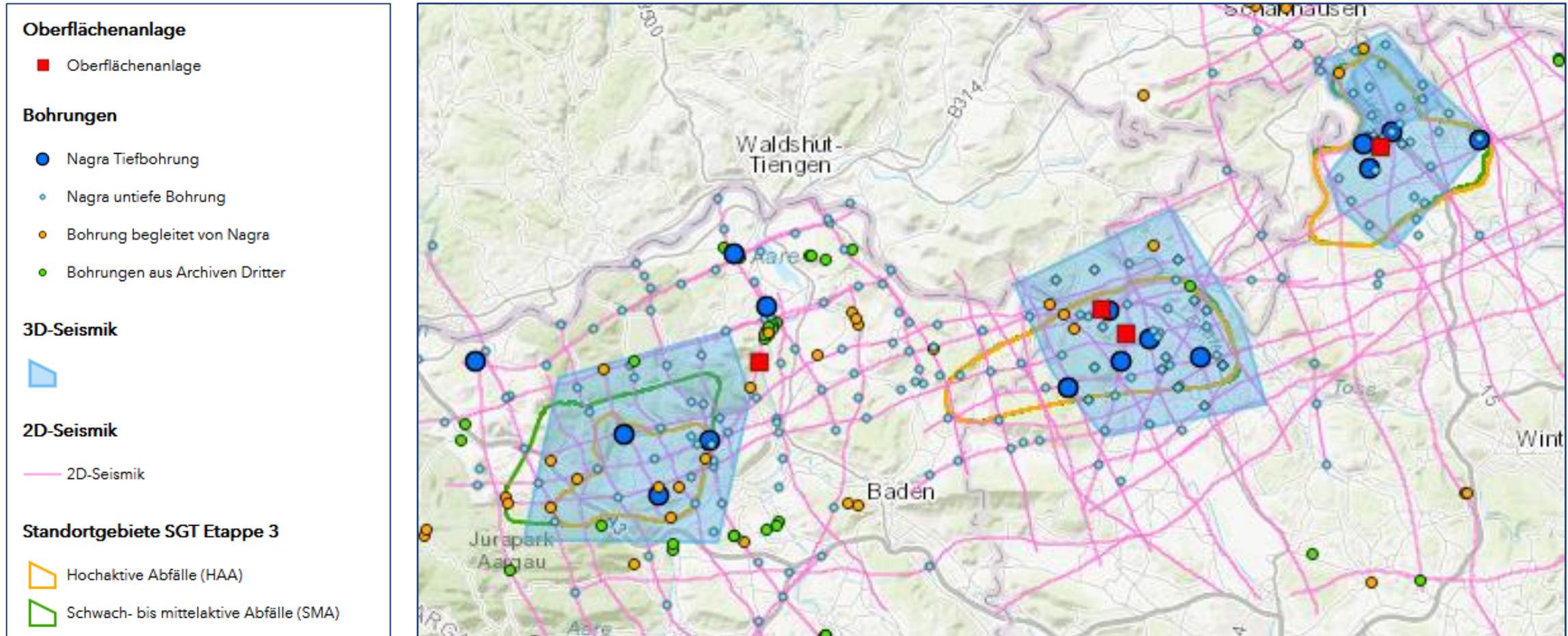
Etappe 3 (22 Bohrgesuche, 9 Tiefbohrungen, ASR, Erarbeitung und Überprüfung der Rahmenbewilligungsgesuche, Festsetzung der Standorte, Erteilung der Rahmenbewilligungen)

November 2018
bis Ende 2029

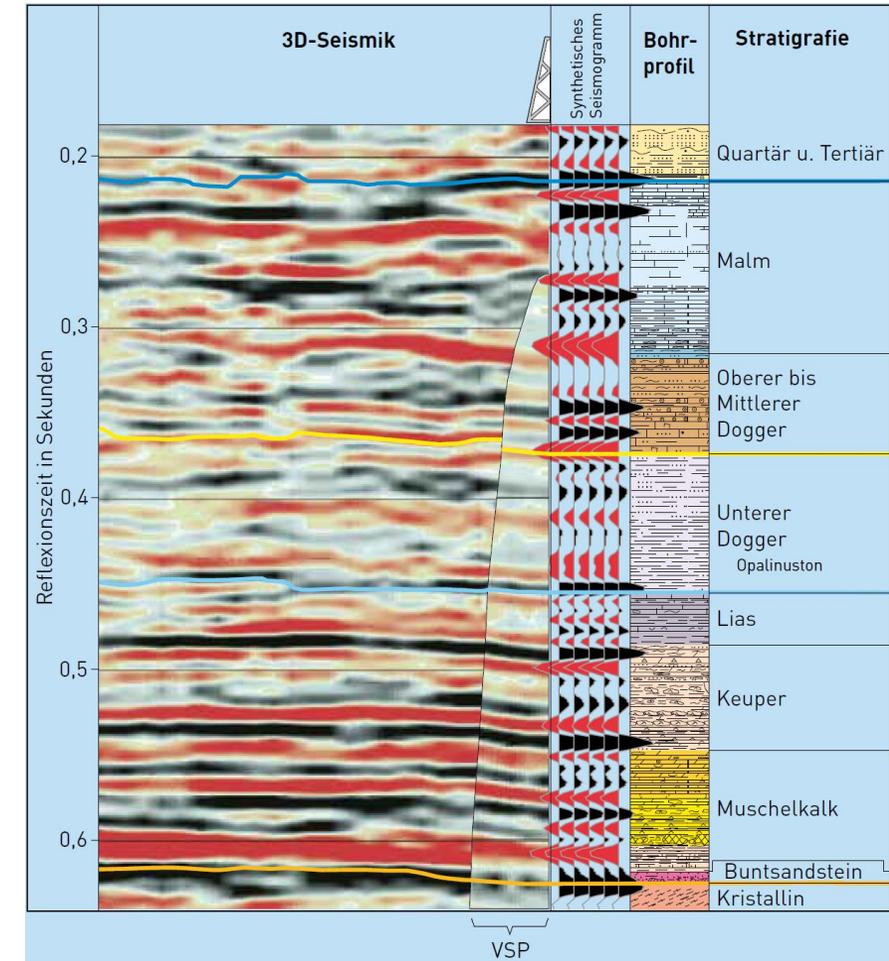
Genehmigung des Bundesratsentscheids zu den **Rahmenbewilligungen** durch das Parlament und evtl. nachfolgende Volksabstimmung

Anfang 2030
bis Ende 2031

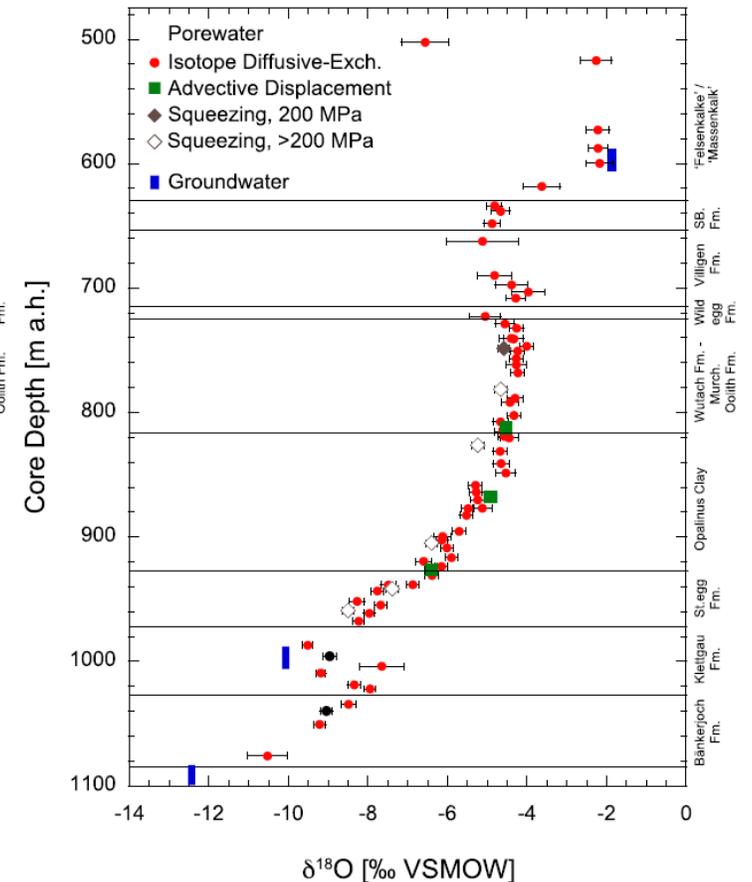
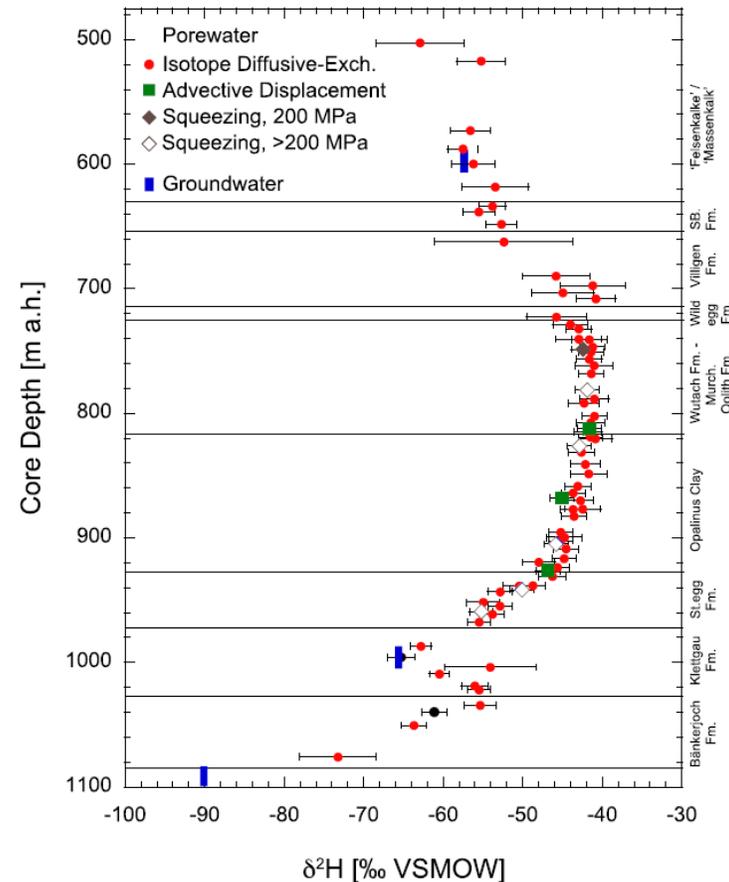
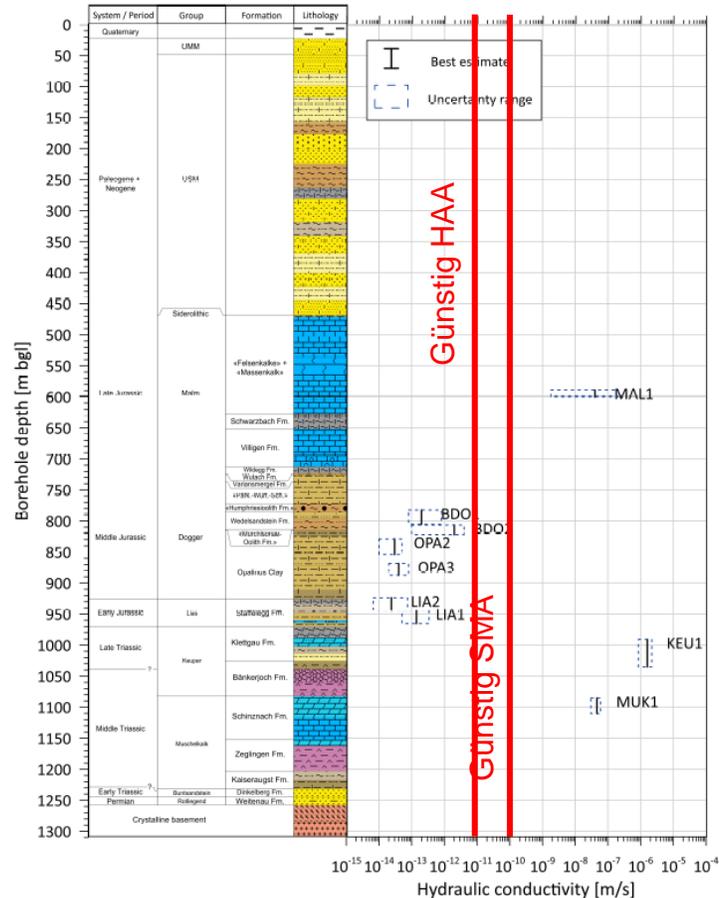
SGT Etappe 3 (2019 bis 2021): 3D-Seismik und 9 Tiefbohrungen in 3 Standortgebieten, 1 Bohrung abgelenkt (Nagra 2021)



Hohe Datendichte, umfassende Kernanalysen, hohe Bohrkerndqualität und meist sehr ruhige Lagerung im Opalinuston

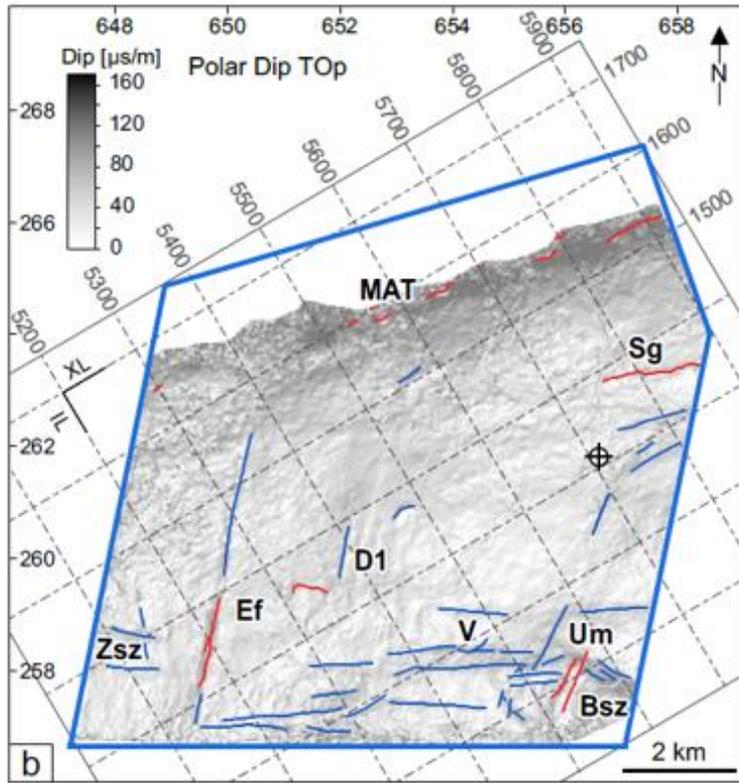


Bohrlochtests und Kernanalysen bestätigen die sehr guten Barriereigenschaften des Opalinustons (NAB 20-09, Trüllikon)

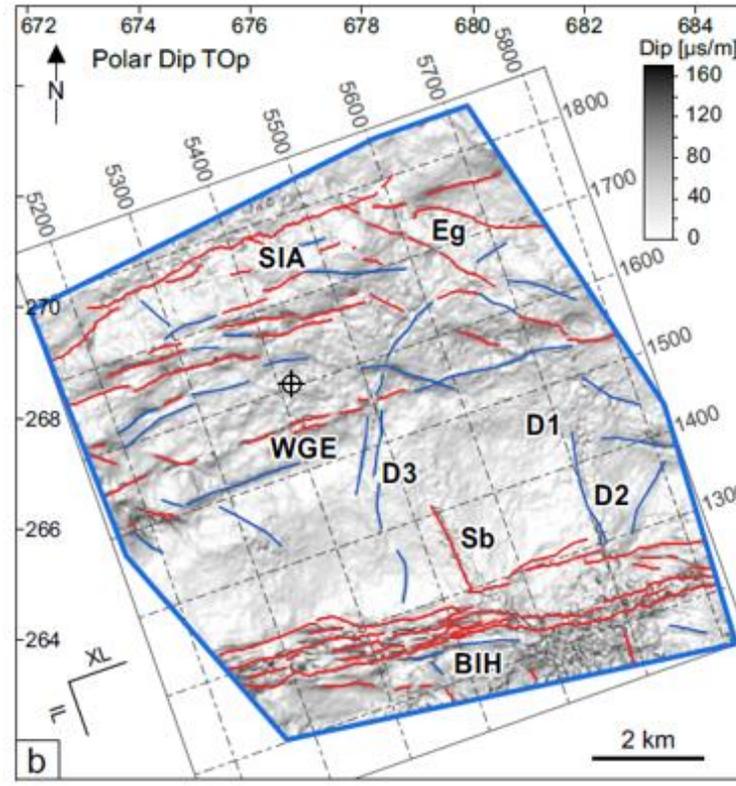


Seismische Attributkarten ergeben detaillierte Informationen über Vorkommen steilstehender Störungen in den Standortgebieten

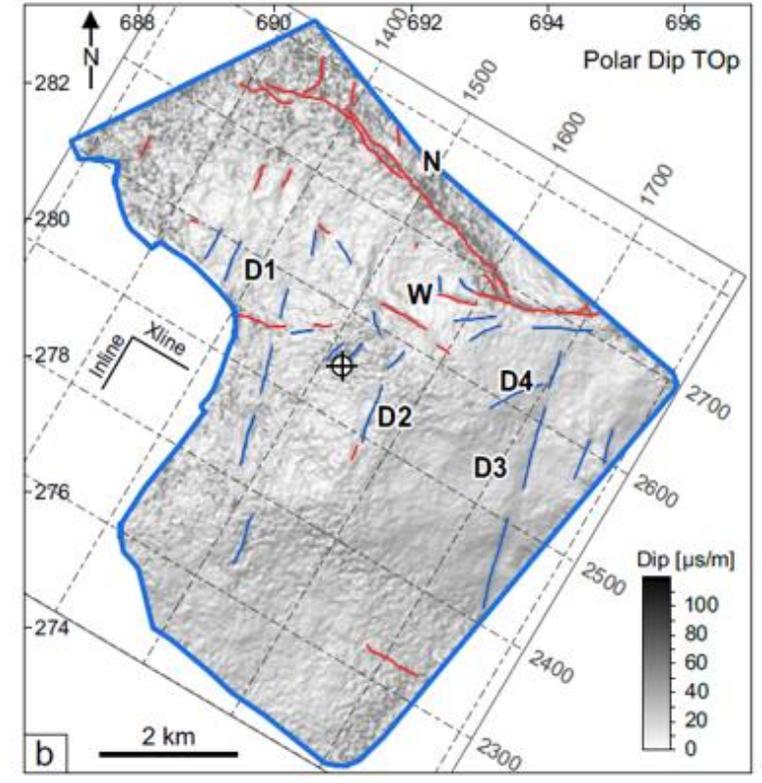
JO



NL

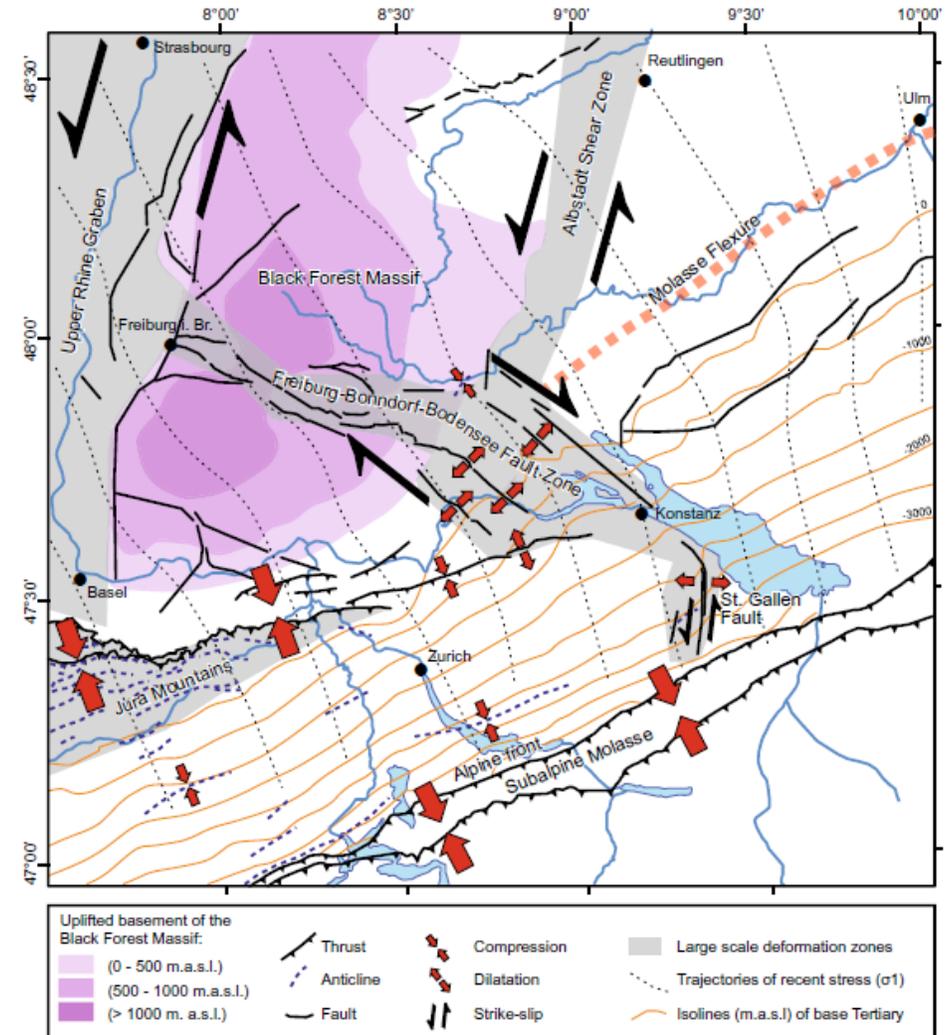


ZNO



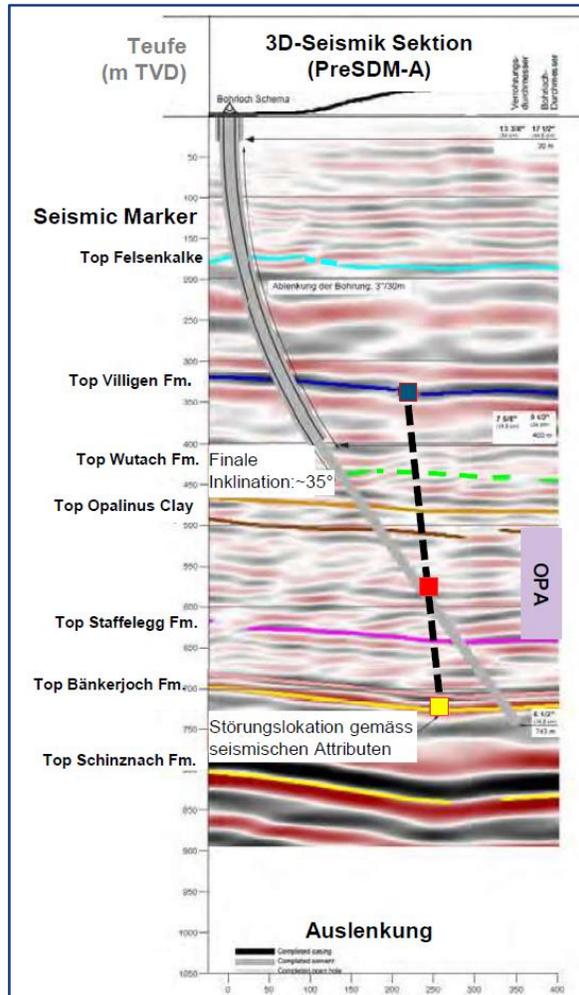
Potenziell kritischer Spannungszustand auf steilstehenden NS-streichenden Störungen

NS-streichende Blattverschiebungen sind vermutlich kritisch gespannte, dilatante und aktive Strukturen im heutigen tektonischen Regime.



Egli et al. (2017)

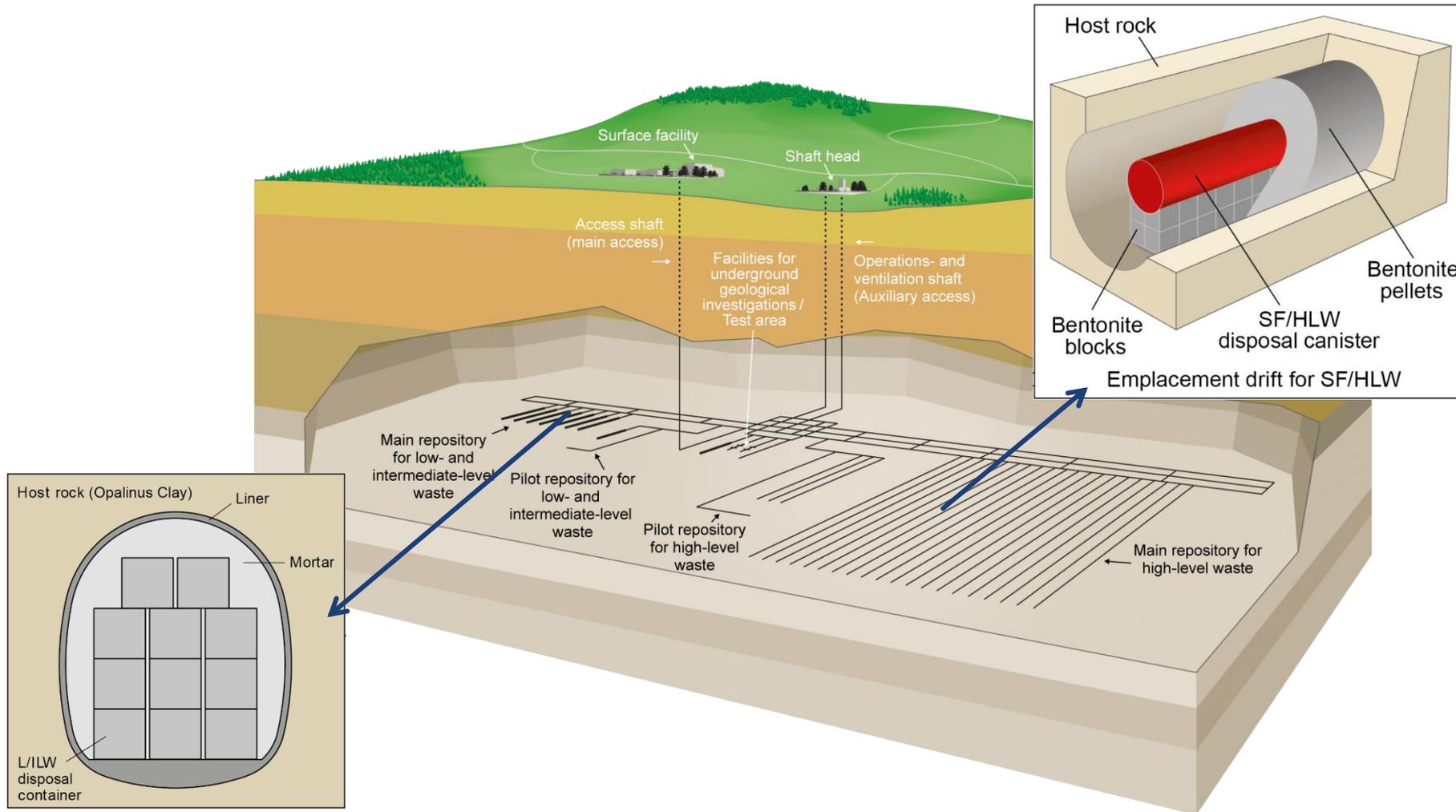
Untersuchungen zur Architektur und Hydromechanik der Störungen im Opalinus Ton (abgelenkte Bohrung Rheinau)



Inhalt

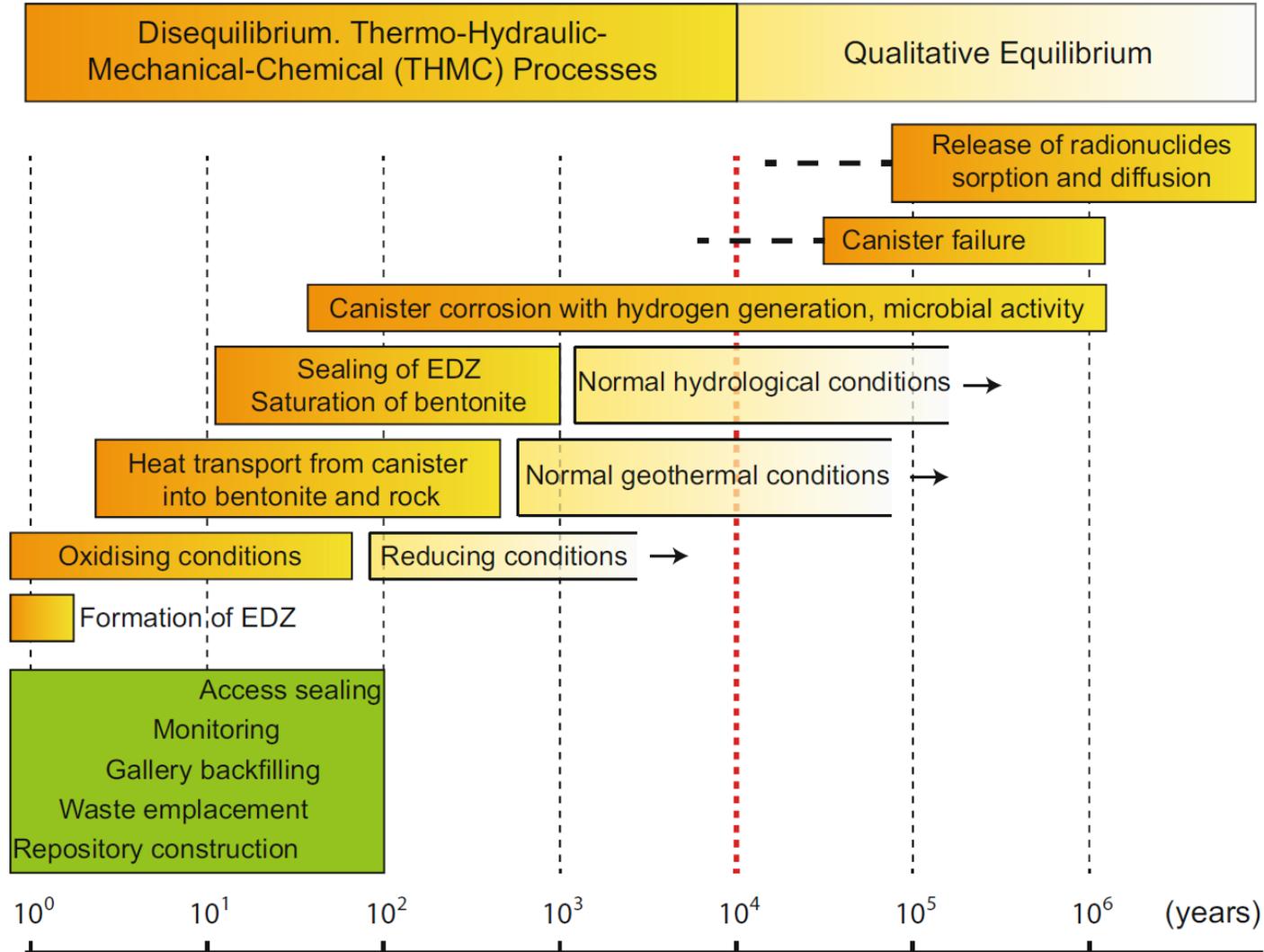
- Die Standortsuche der letzten 40 Jahre
 - Endlagerprogramm für hochaktive und langlebige mittelaktive Abfälle HAA/LMA
 - Endlagerprogramm für kurzlebige schwach und mittelaktive Abfälle SMA
 - Der Sachplan Geologische Tiefenlager
- **Heutige Schlüsselfragen und Forschung zur Langzeitsicherheit**
 - **Gekoppelte Prozesse im Endlager-Nahfeld**
 - **Korrosionsgase und das EGTS**
 - **Felsmechanische Eigenschaften und PF Experiment**
- Schlussbemerkungen und Ausblick

Heutiges Konzept eines HAA/SMA Kombilagers im Opalinuston

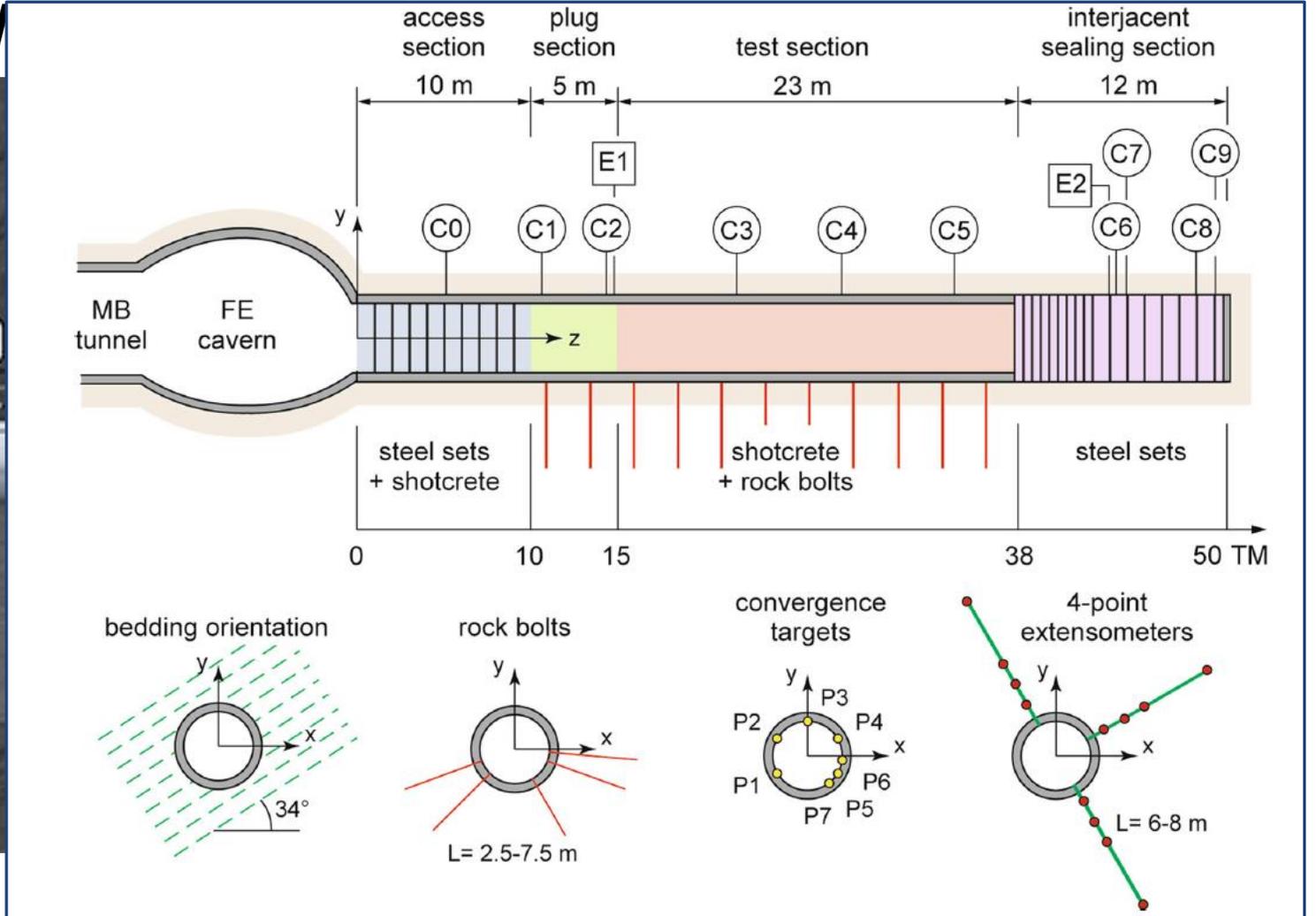
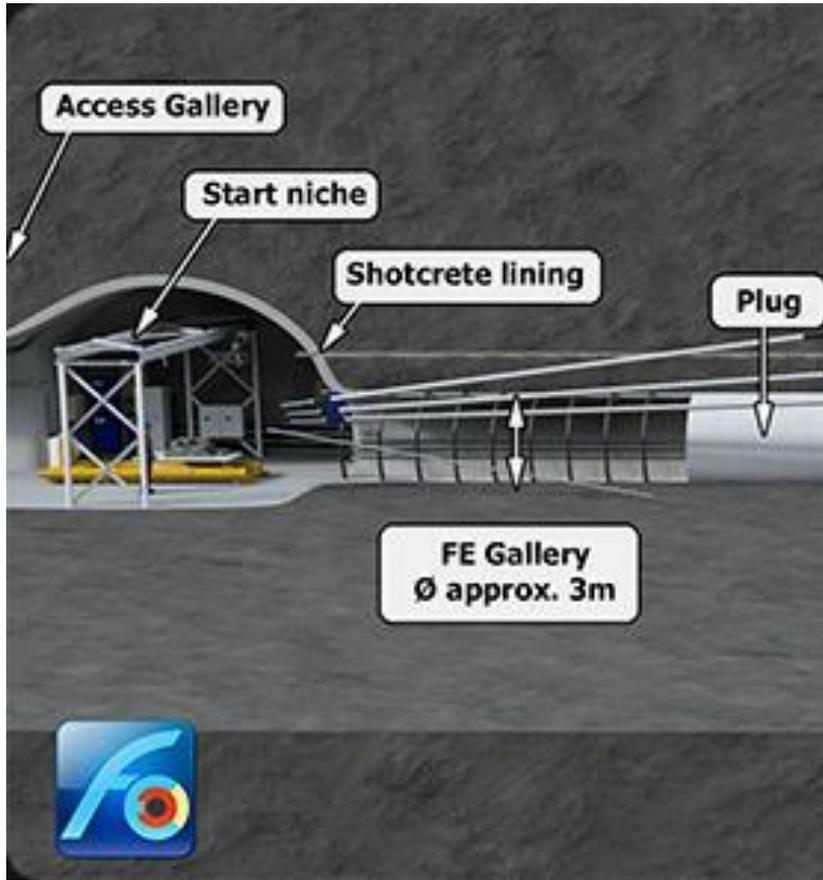


Gekoppelte Prozesse in HAA-Endlager-Nahfeld

Bossart et al. 2017

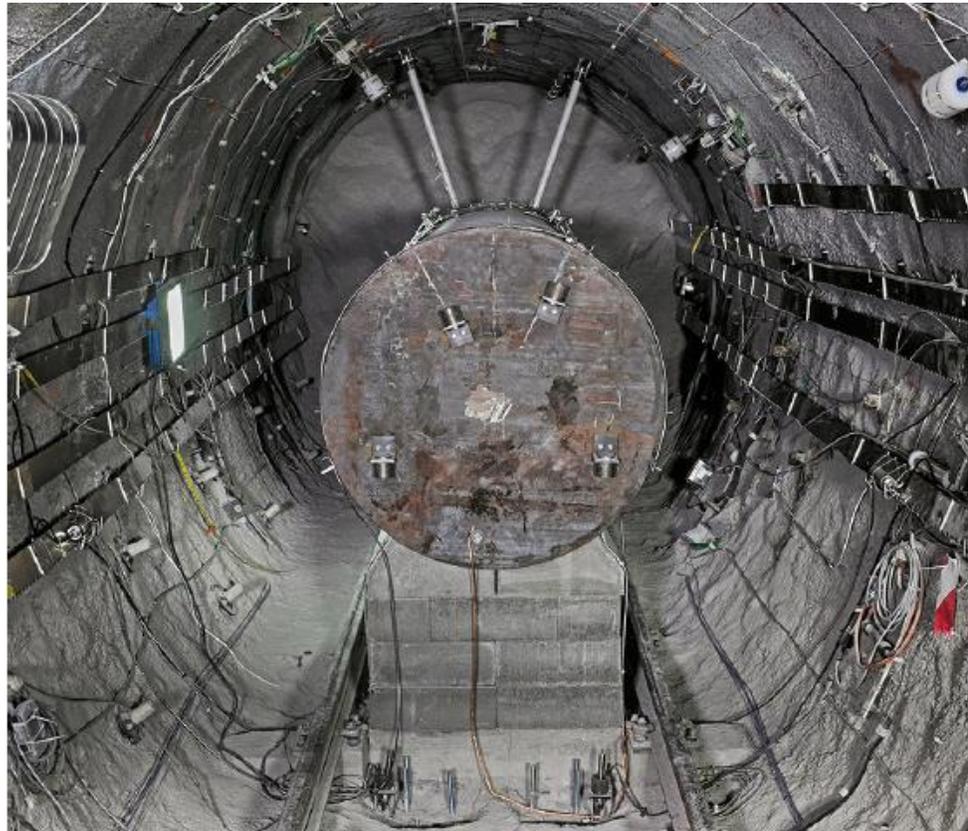


FE Demonstrationsexperiment: HAA Lagerstollen Nahfeld (NAB 19-46, NTB 15-02, M)



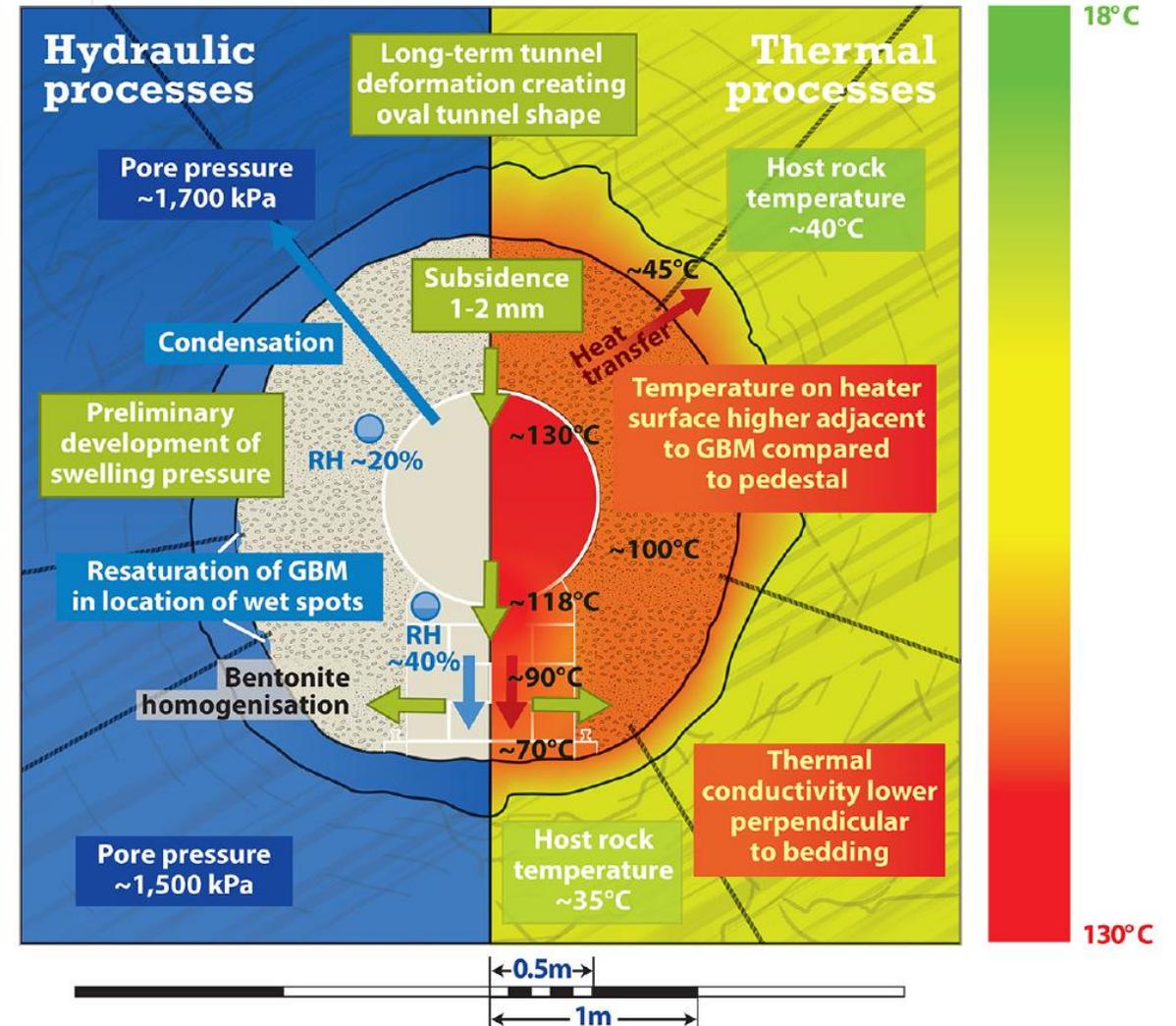
FE Experiment Zwischenresultate (NTB 15-02)

Late-stage heating

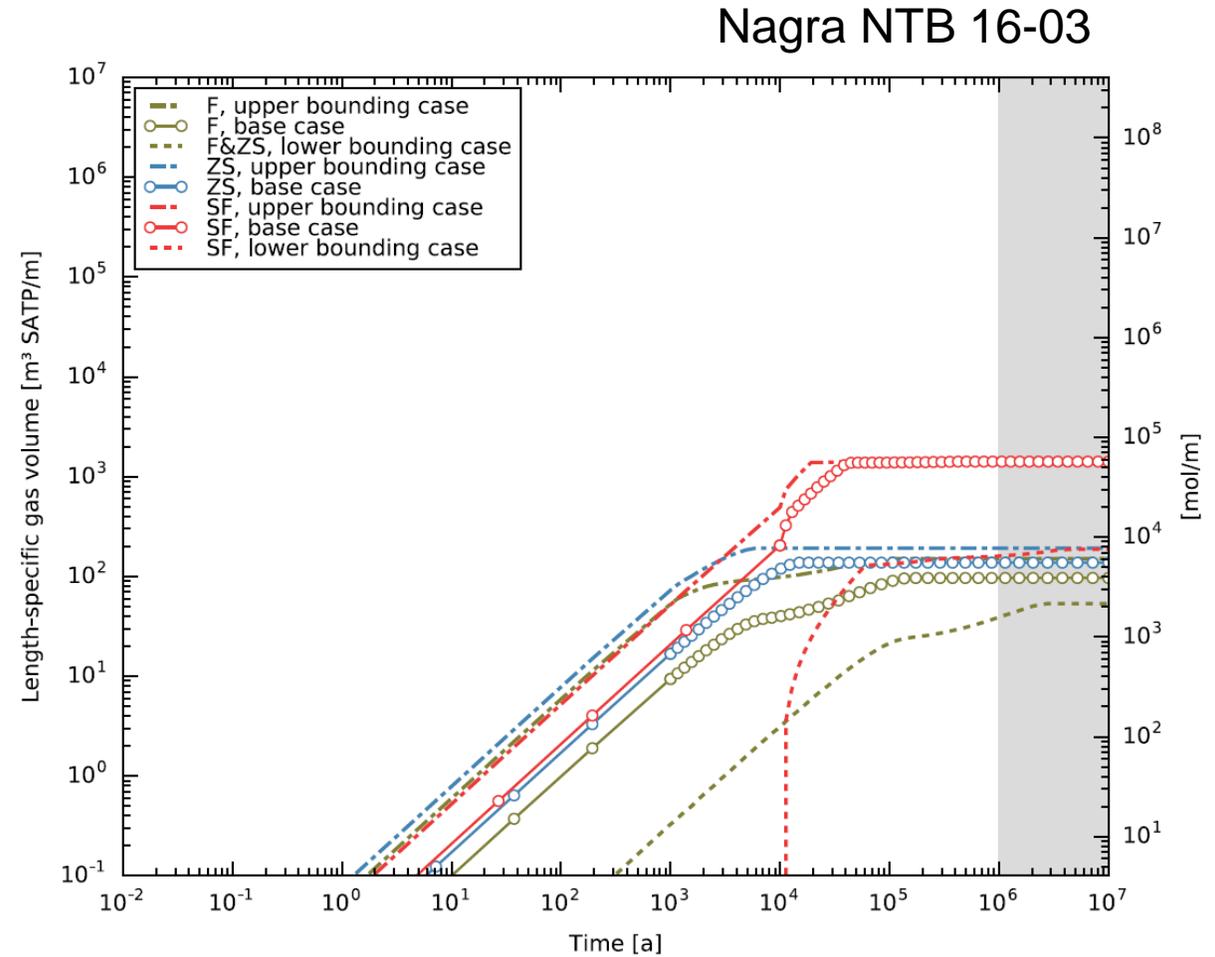
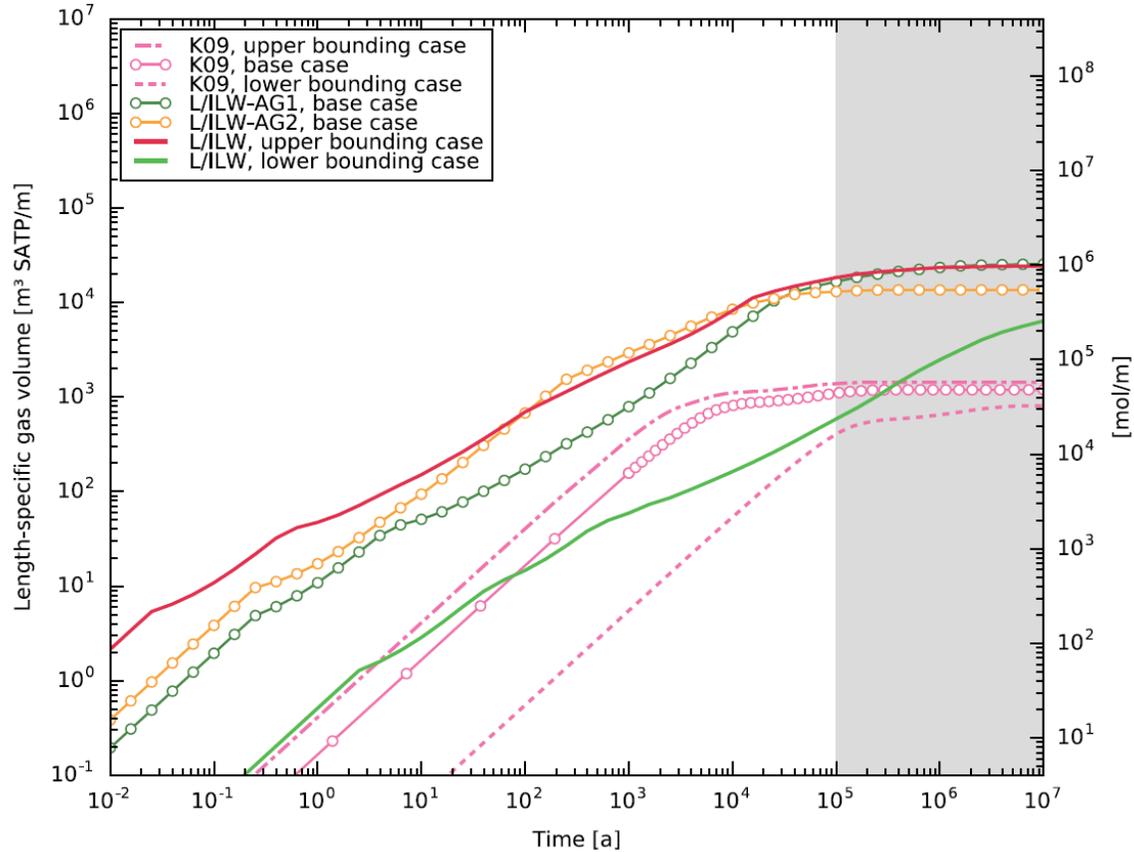


1,700 kPa

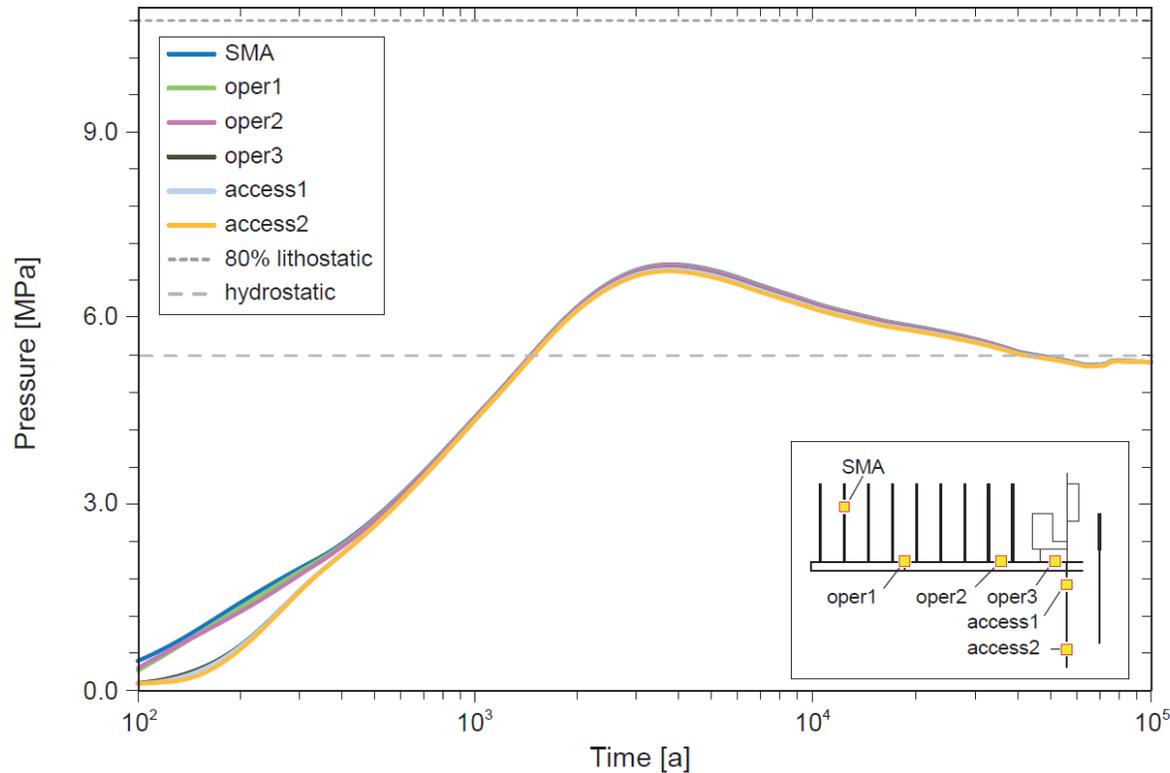
1,500 kPa



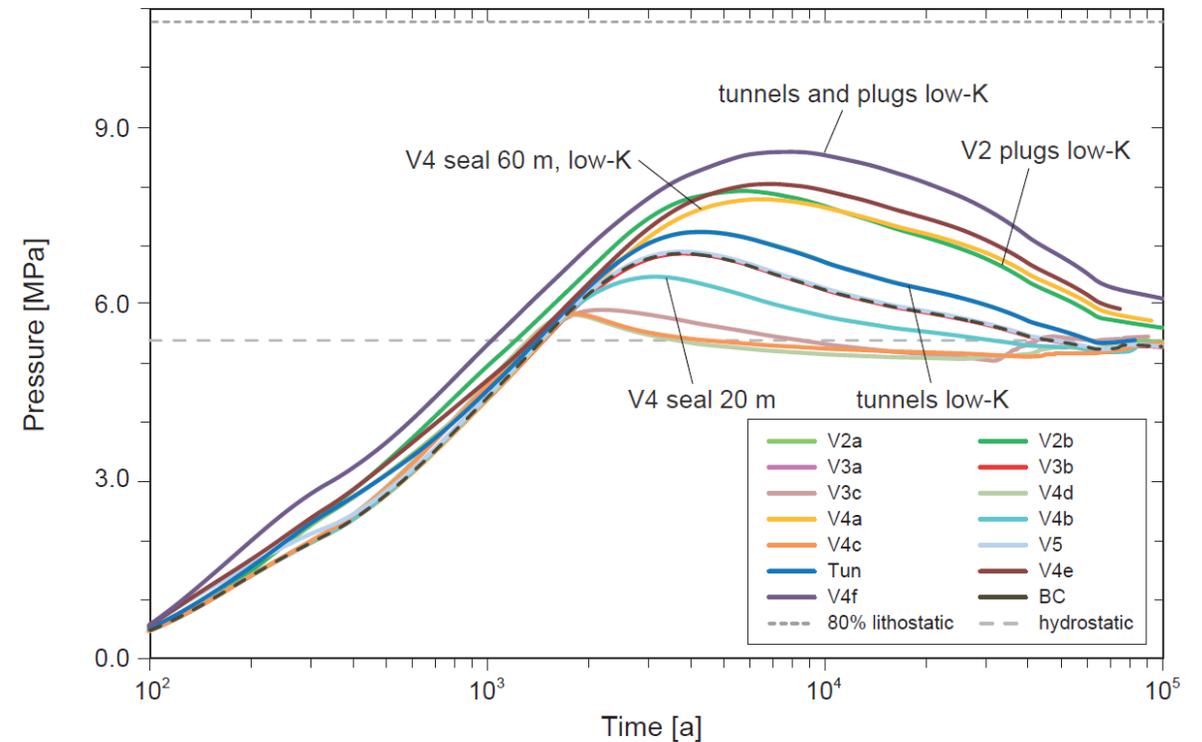
Entwicklung der normierten Gasvolumen im HAA und SMA Lager



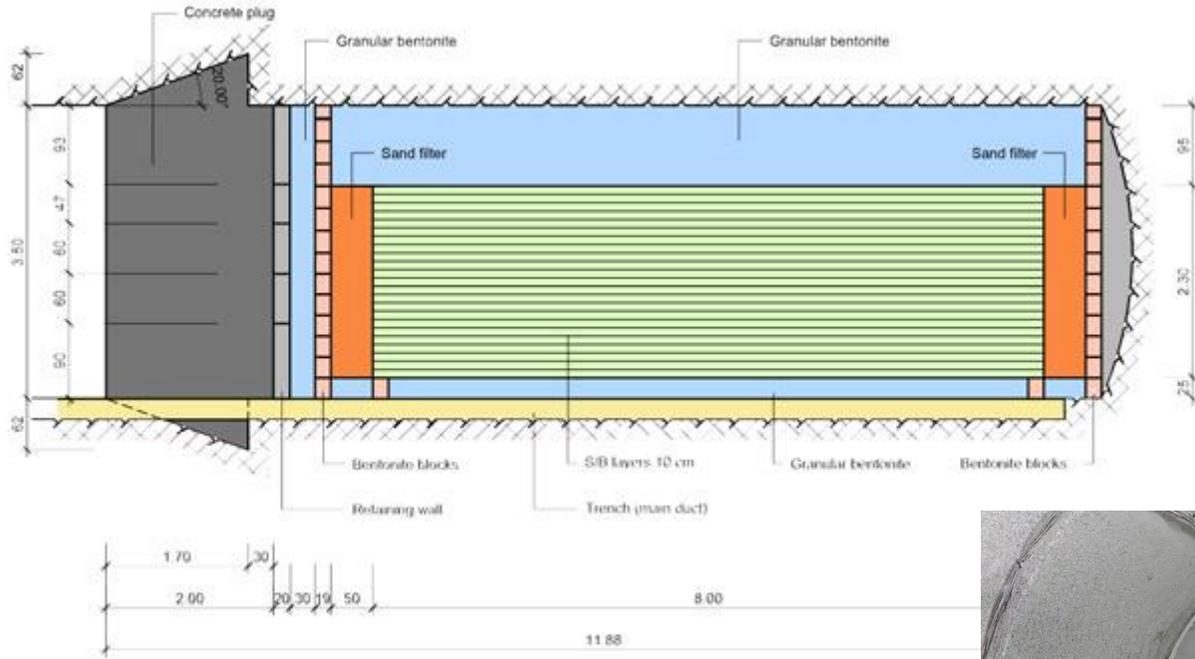
Simulierte Gasdruck Entwicklung im SMA Lager, Grenzwerte und Sensitivität auf die Permeabilitäten der EGTS-Siegel



Nagra NTB 16-03



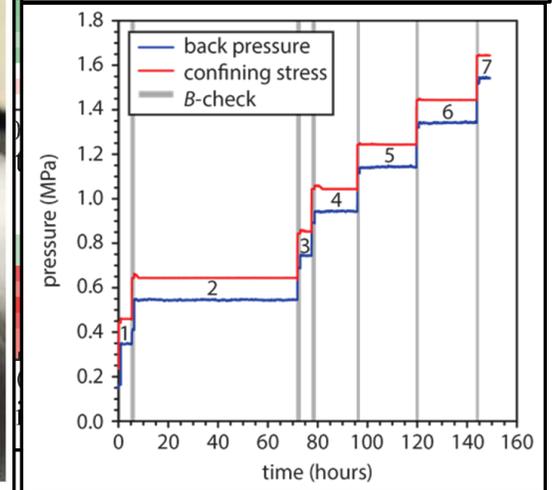
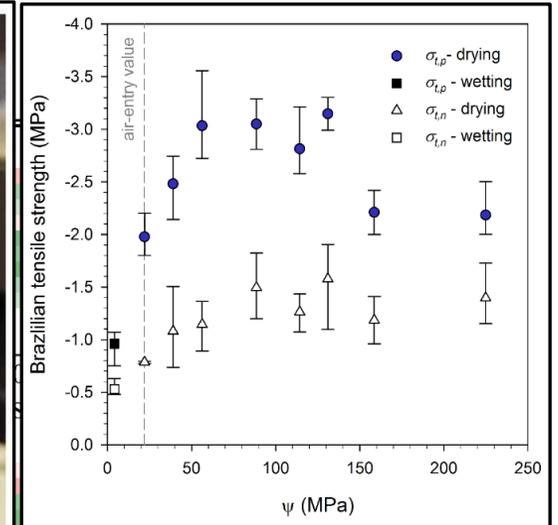
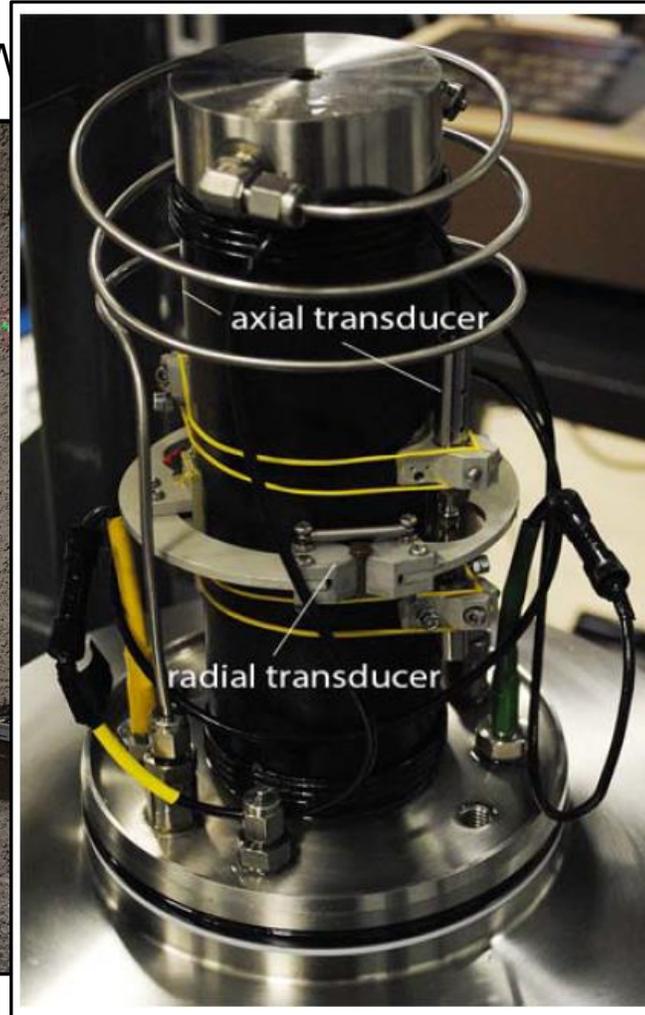
GAST Experiment: Gastransport durch Sand-Bentonit-Siegel (bisher wenig publizierte Resultate, FLG)



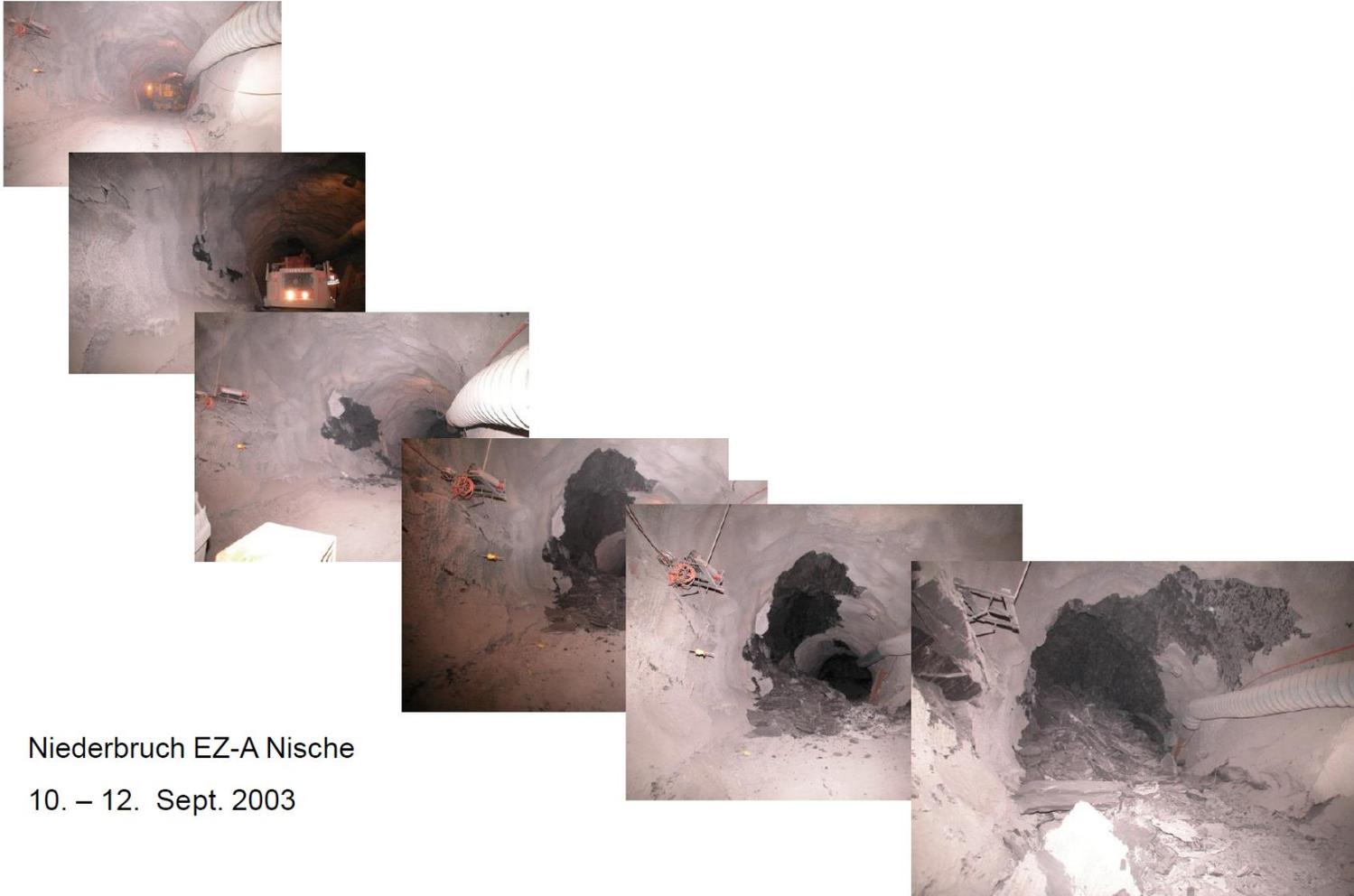
ETH-ENSI Experimente zum felsmechanischen Verhalten des Opalinustons (2002-2021)

HM: gekoppelte Prozesse im Opalinuston (K. Wild)

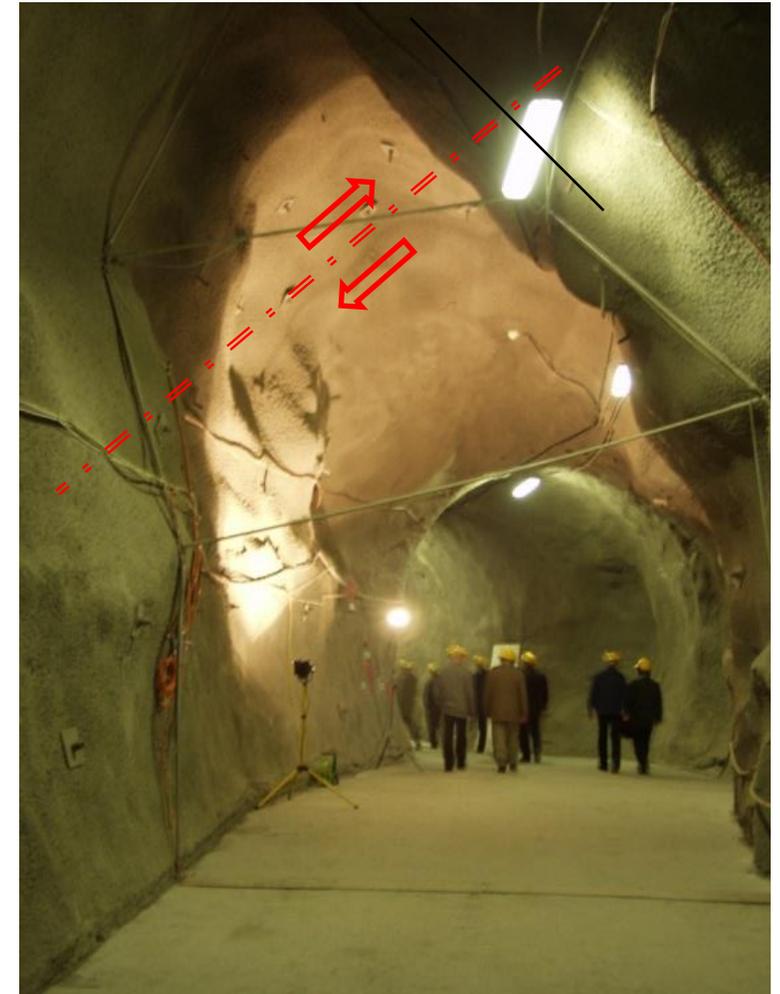
SEP: Selbstheilung von Auflockerungszonen (M. W)



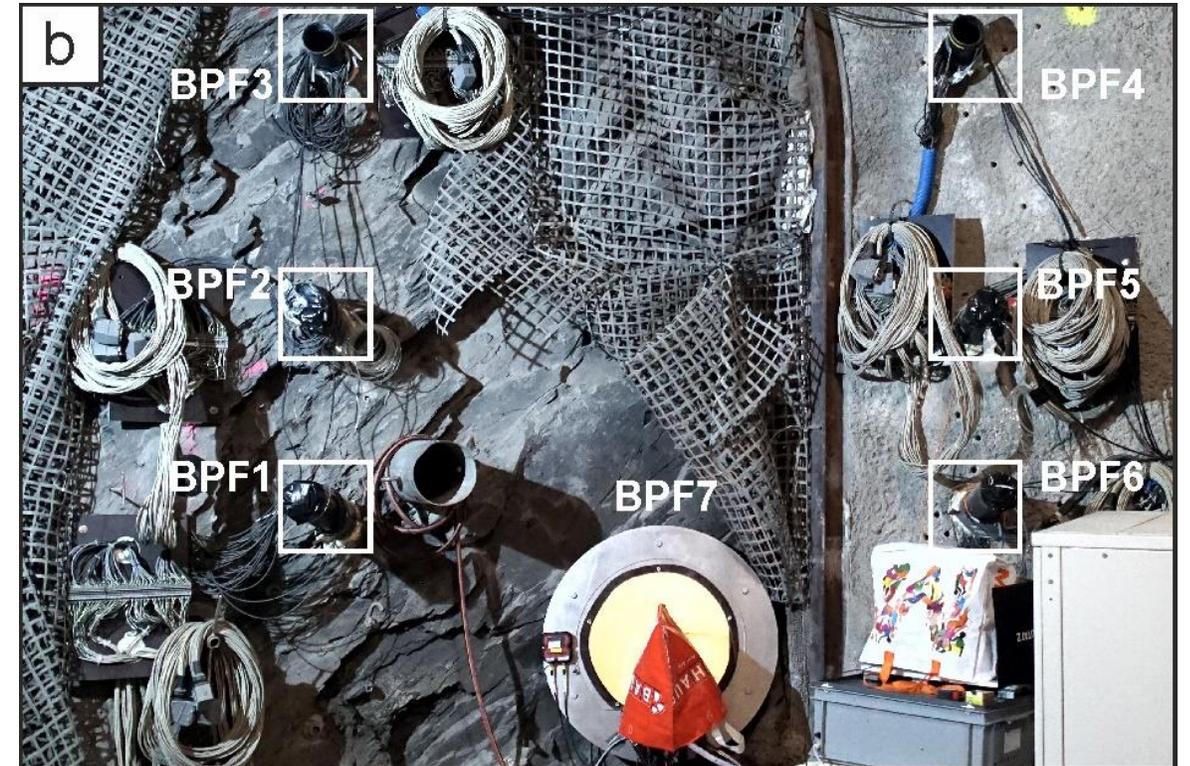
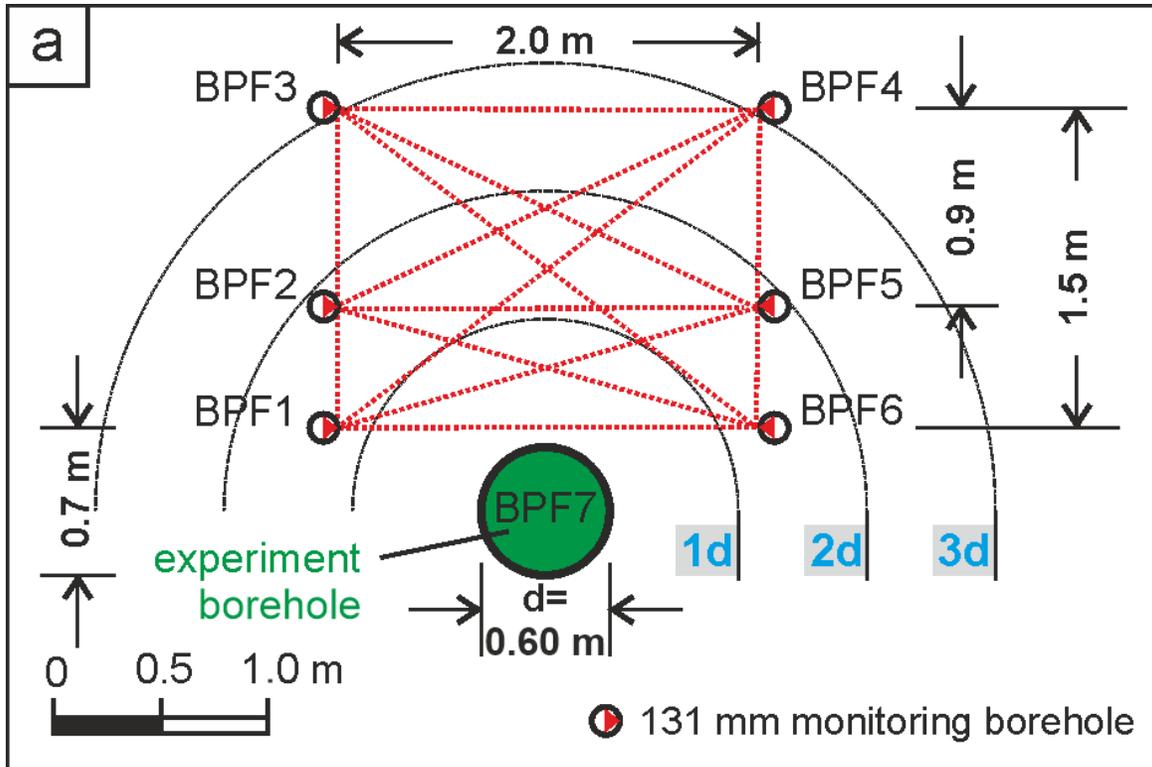
PF: Progressive Verbruch-Entwicklung von Lagerstollen in spitzwinklig verlaufenden Störzonen (2020-2022)



Niederbruch EZ-A Nische
10. – 12. Sept. 2003



PF: Monitoringsysteme und Klimatisierte Grossbohrung



Kontinuierliche photogrammetrische Vermessung der Ausbrüche



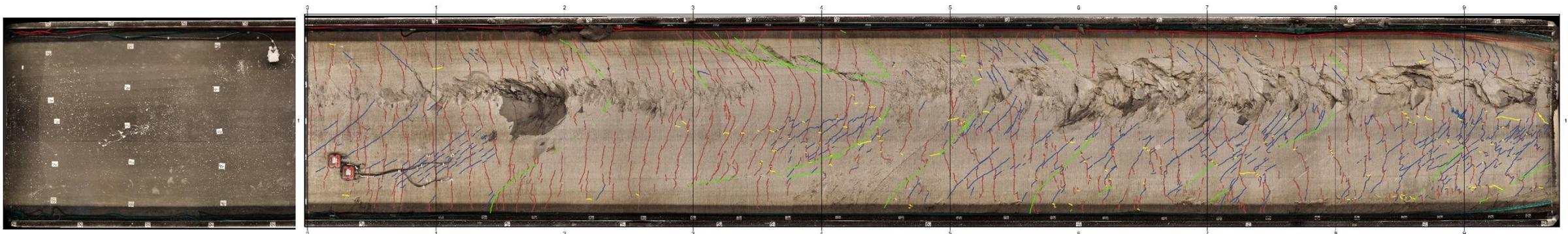
- Semiautomatic recording of borehole images with 0.2 mm resolution from 3-D photogrammetric models

Abgewickelte Bohrlochwand aus Photogrammetrie (M. Ziegler)



Veränderungen über 5 Monate zwischen 13.11.20 und 16.04.21

Main Fault Mont Terri



Entwicklung von Randausbrüchen (E. Sutter)

6.6 m depth from casing end

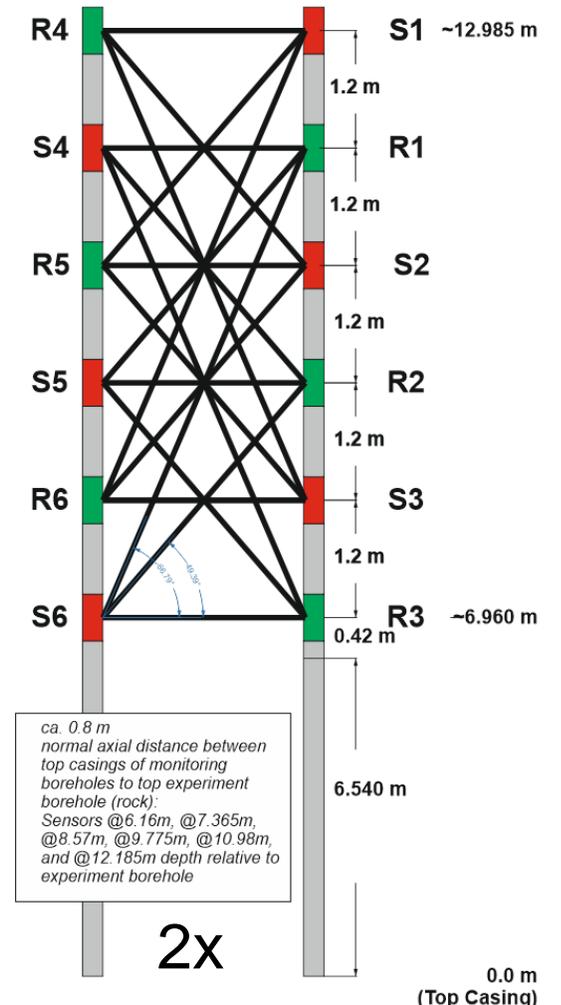
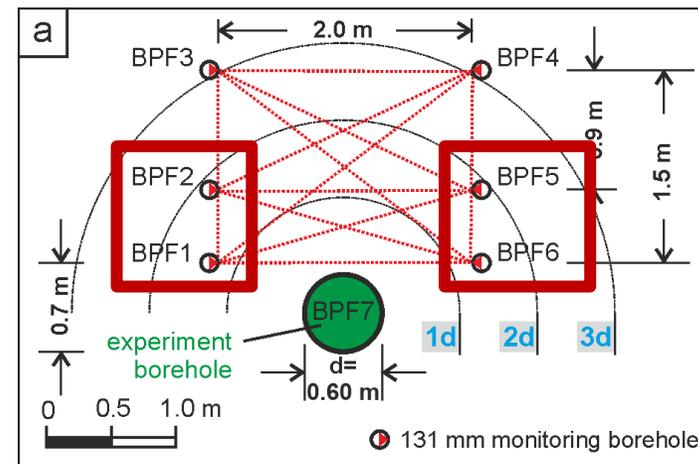
- Veränderungen über 5 Monate zwischen 13.11.20 und 16.04.21
 - Weiterentwicklung von Randausbrüchen
 - Entstehen neuer «Risse» (zumeist Trocknungsrisse)
 - Propagation/Apertur-Vergrößerung bestehender «Risse»
 - Schliessen bestehender «Risse»
 - Verschiebung entlang von Scherflächen



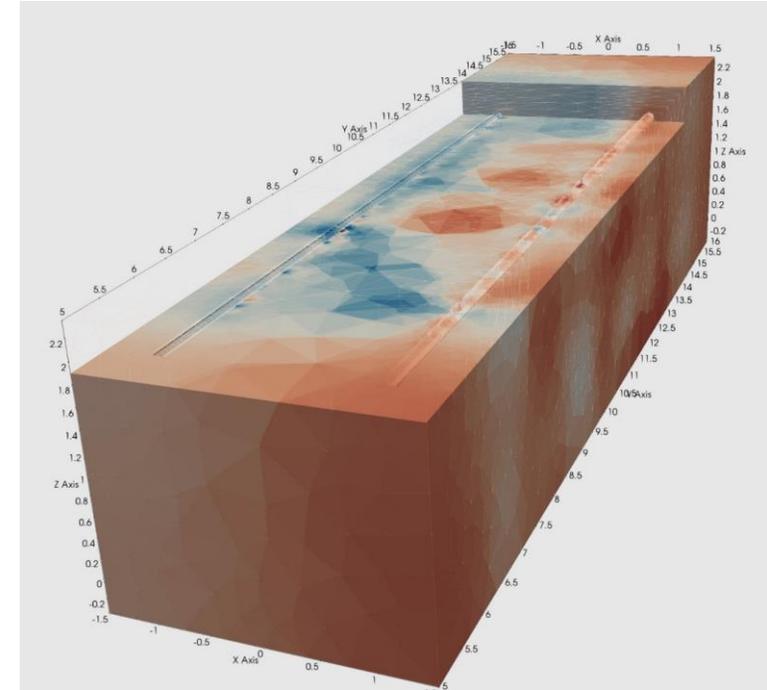
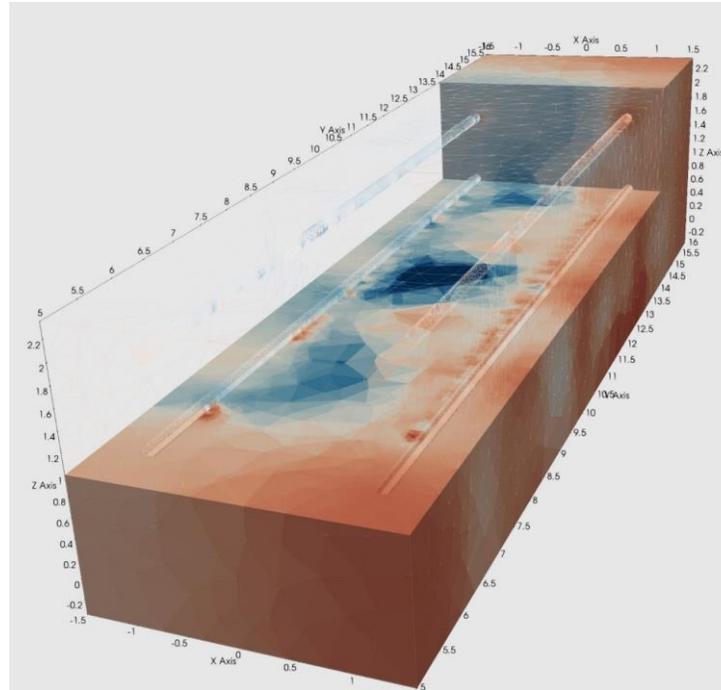
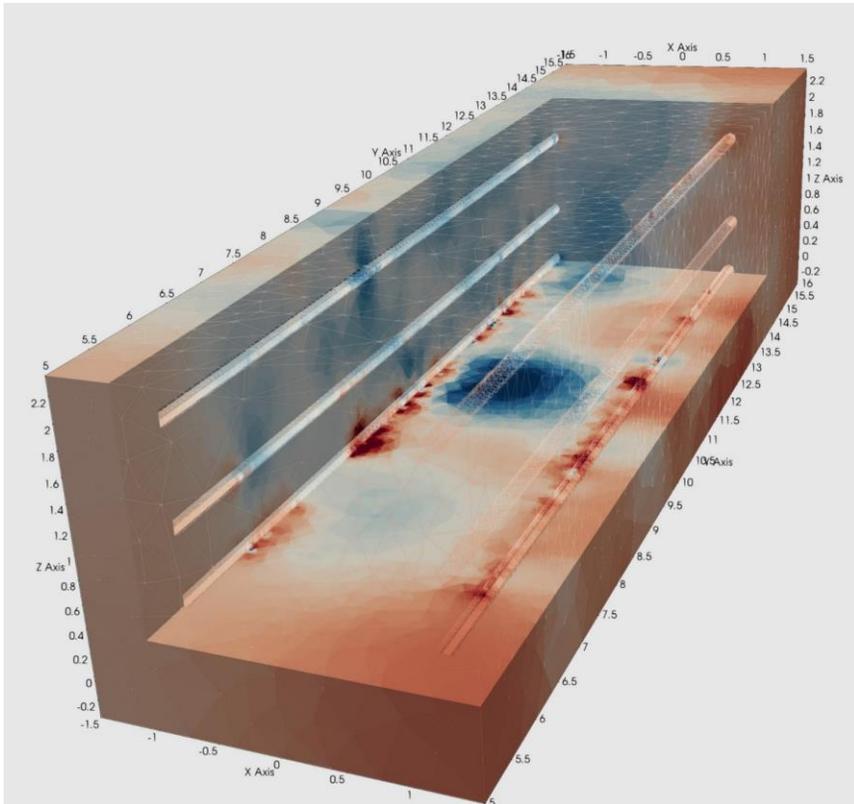
Erfassung der Gebirgsschädigung in der Firste mit seismischer Tomographie & passiven akustischen Messungen (M. Ziegler)

- Oktober 2020
 - AE Monitoring (passiv) vor, während und mehrere Wochen nach Erstellung der Grossbohrung
 - 8 Empfänger (2 in 4 Bohrungen)
- Ab April 2021
 - 1 aktive Messung/Tag/Sender (Stapelung aus 1024 Einzelmessungen); 10.00-10.30 pm
 - Restliche Zeit AE Monitoring (passiv)
 - 12 Sender und 12 Empfänger

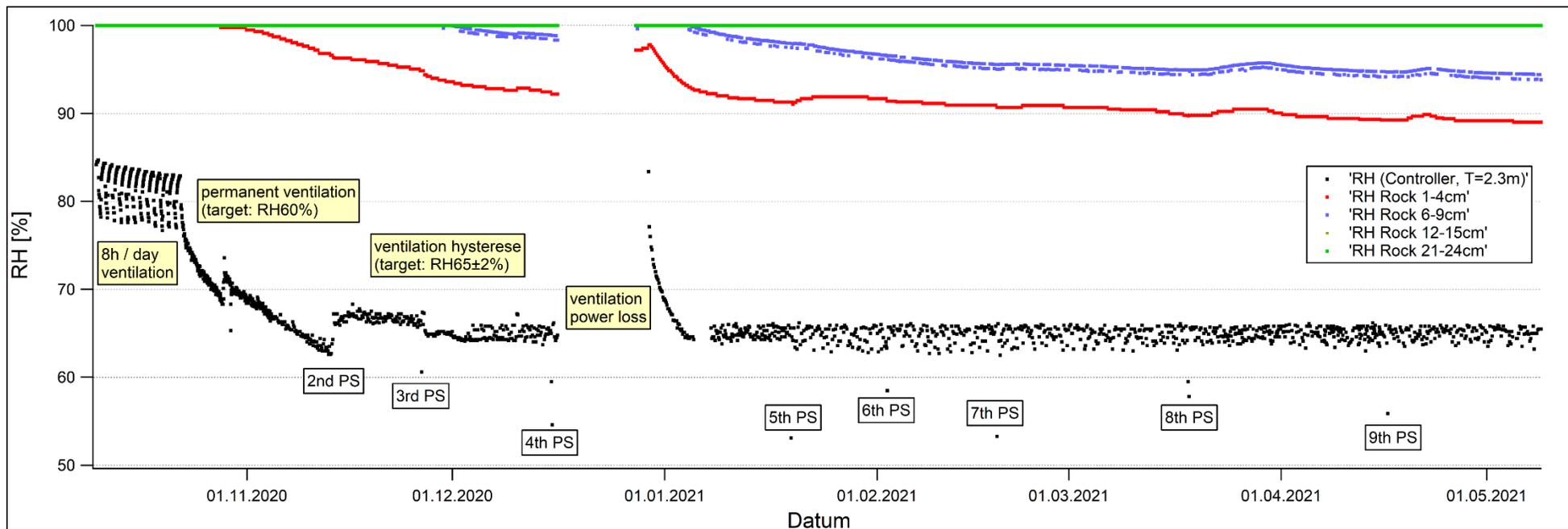
Empfänger (R)



Periodische Messungen mit elektrischer Tomographie durch BGR (M. Furche): Beispiel 3D-Inversion, Diff. Dez. 2020-April 2021



Gebirgsentsättigung während der Ventilationsphase (M. Ziegler)



Inhalt

- Die Standortsuche der letzten 40 Jahre
 - Endlagerprogramm für hochaktive und langlebige mittelaktive Abfälle HAA/LMA
 - Endlagerprogramm für kurzlebige schwach und mittelaktive Abfälle SMA
 - Der Sachplan Geologische Tiefenlager
- Heutige Schlüsselfragen und Forschung zur Langzeitsicherheit
 - Das Lagerkonzept und Prozesse im Nahfeld
 - Korrosionsgas und EGTS
 - Felsmechanische Eigenschaften und PF Experiment
- **Schlussbemerkungen und Ausblick**

Schlussbemerkungen

- Die lange Standortsuche für ein HAA und SMA Endlager/Tiefenlager hat über zahlreiche Umwege zu einer optimalen Wahl der Standorte und des Wirtsgesteins geführt. Massgeblich beteiligt an grossen Richtungswechseln in diesem Programm der letzten 40 Jahre waren politische Entscheidungen (WLB) oder kritische Stellungnahmen der Prüfbehörden (Kristallin).
- Das Sachplanverfahren mit seiner breiten Partizipation hat zu einer grossen Versachlichung der Debatten, einem umfassenden fachlichen Dialog mit vielen Stakeholdern, und einem zielgerichteten (zielführenden?) Projektablauf geführt.
- Auch wenn das Sachplanverfahren eine grosse Anzahl zu bewertender Standortkriterien und Indikatoren vorgibt, sind letztendlich wenige Schlüsselkriterien für die Standortauswahl entscheidend.

Schlussbemerkungen

- Die Langzeitsicherheit der geologischen Tiefenlager ist primär eine Funktion der Barriere-Eigenschaften, der geologischen Langzeitstabilität und der technischen Eingriffe und Massnahmen im Endlager.
- Während die meisten sedimentologischen, strukturgeologischen und felsmechanischen Aspekte der verschiedenen Standortgebiete in den letzten Jahren geklärt werden konnten, verbleiben heute noch offene Fragen zur quartärgeologischen Erosionsgeschichte und Neotektonik.
- Wichtige offene Fragen zur Entwicklung des Nahfeldes von HAA und SMA Tiefenlagern im Opalinuston betreffen insbesondere die Entstehung, technische Bewältigung und die Auswirkungen von Korrosionsgasen auf die Radionuklidfreisetzung.

Quo Vadis?

- Wir leben in einer Risikogesellschaft mit riskanter Lebensführung, einen Rückweg in die absolute Sicherheit gibt es nicht.
- Ein geologisches Tiefenlager stellt ein komplexes geologisches-technisches System dar, dessen Risiken für einen Zeitraum von bis zu einer Million Jahre beurteilt werden müssen.
- Die langfristige zukünftige Entwicklung der geologischen Barrieren ist für Geologen einfacher zu beurteilen als jene der technischen Eingriffe (z.B. HAA Abfälle) und Massnahmen (z.B. EGTS).
- Die langfristigen Auswirkungen dieser Eingriffe und Massnahmen können wir nicht mit Erfahrung und gesundem Menschenverstand beurteilen. Die rationale Beurteilung der Risiken eines geologischen Tiefenlagers basiert deshalb auf probabilistischen Betrachtungen und unserem heutigen Prozessverständnis.
- Unser Wissen ist begrenzt, für das unbekannte Unbekannte gibt es kein Expertenwissen, einen absoluten Entsorgungs-»Nachweis« gibt es nicht.
- Die Entwicklung der Entsorgungskonzepte in den letzten 40 Jahren, die erreichte Qualität der heutigen Standortgebiete und Wirtsgesteine sind eindrücklich und können vermutlich nur noch marginal verbessert werden.

Danke für die Aufmerksamkeit!

Dieser Vortrag wäre nicht möglich gewesen ohne die Unterstützung/Mitarbeit von:

ENSI: Erik Frank, Meinert Rahn, Martin Herfort, Felix Altdorfer, Ann-Kathrin Leuz, Ernando Saraiva

ETH: Martin Ziegler, Florian Amann, Corrado Fidelibus, Salina Yong, Reto Thöny, Katrin Wild, Molly Williams

