

Wie sicher sind Endlager für hochradioaktive Abfälle?

Wolfgang Kinzelbach
Prof. em., ETH Zürich

Vortrag beim Emeritenstamm in Winterthur, 27.2.2023

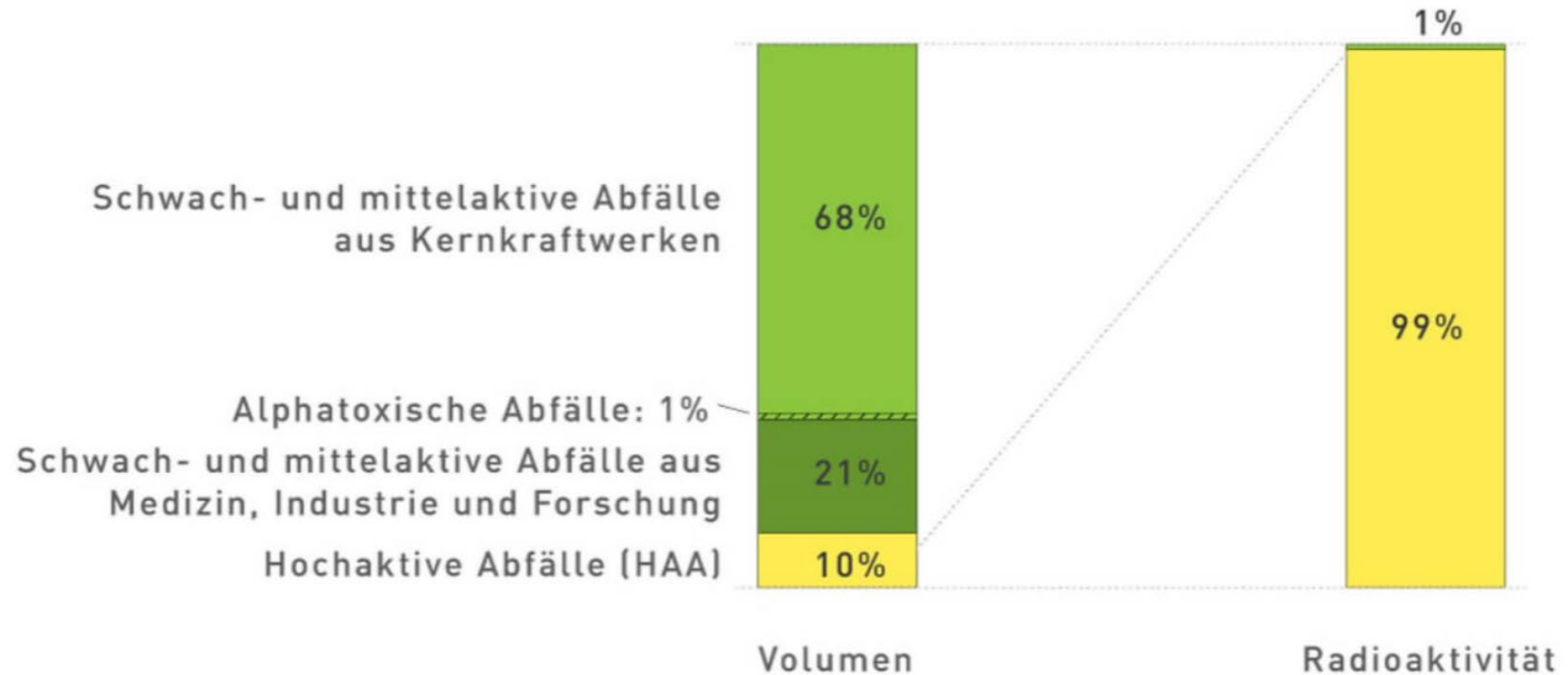
Inhalt

- Wieviel hochradioaktiver Abfall ist zu beseitigen?
- Ideen zur Beseitigung
- Exkurs: Strahlenschutz
- Wirtsgesteine zur Lagerung von hochradioaktiven Abfällen
- Die Strategie der Schweiz
- Transportvorgänge: Diffusion, Advektion, Adsorption
- Eigenschaften des Standorts «Nördlich Lägern» im Vergleich
- Dosisberechnung Biosphäre
- Beurteilung der Sicherheit

Wieviel Abfall ist zu beseitigen

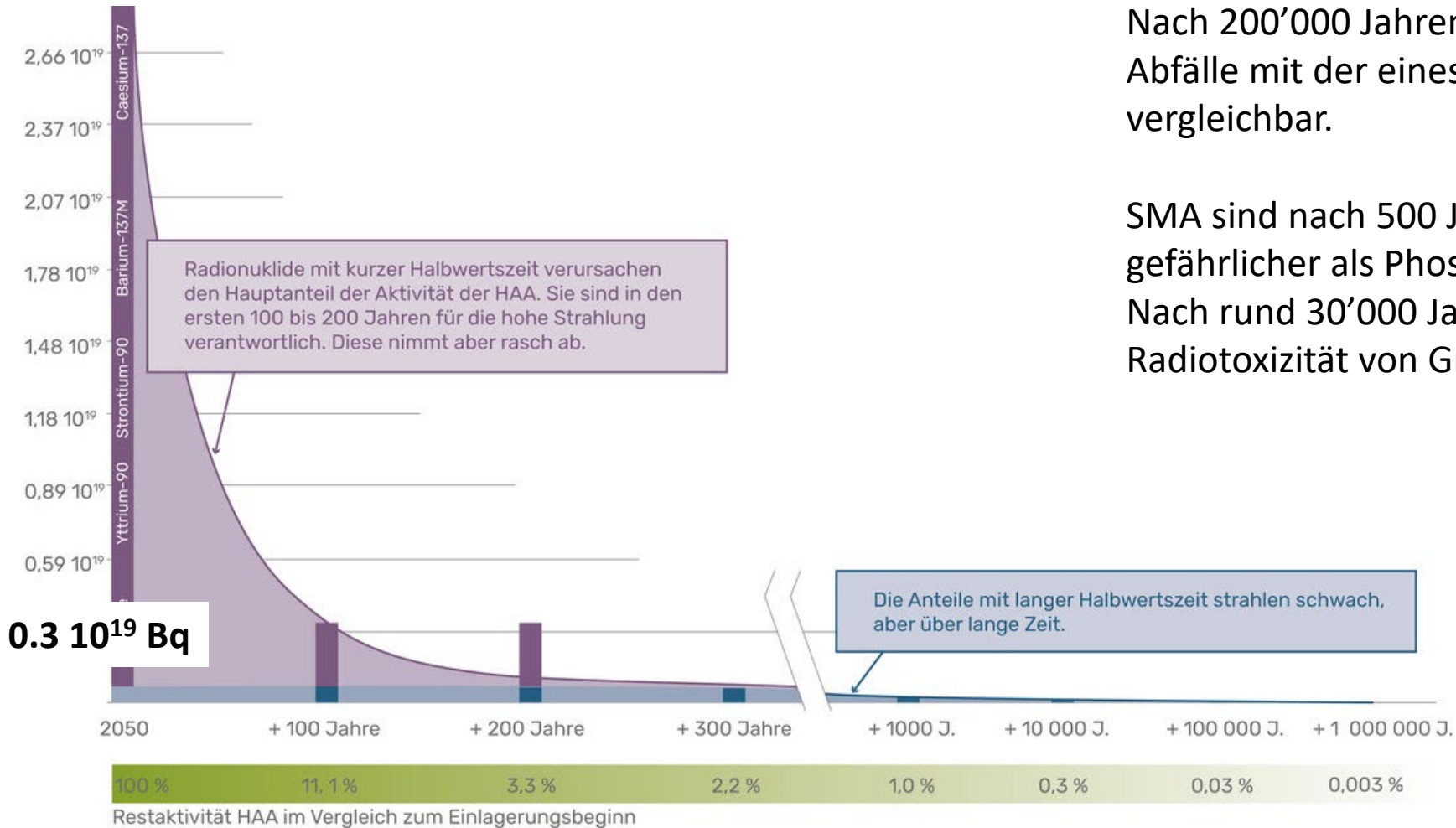
- Einteilung in hoch-, mittel- und schwachradioaktiv
 - HAA: entwickelt erhebliche Wärme, besteht aus abgebrannten Brennelementen und Abfall aus der Wiederaufarbeitung
 - SAA und MAA: Abfälle aus Kernkraftwerksbetrieb, Industrie und Medizin (Sonderfall: alphatoxische Abfälle)
 - MAA benötigt Abschirmung, SAA: benötigt keine Abschirmung
- Menge weltweit:
 - HAA: 400'000 Tonnen?, Volumen etwa 8 Mio. m³ ?
 - SAA und MAA: Volumen: eine Grössenordnung mehr
- Menge Schweiz:
 - HAA: rund 80 Tonnen, Volumen 1'500 m³ (nach Verpackung 9'300 m³)
 - SMA: 74'000 m³
 - Insgesamt etwa die Hälfte des Volumens der Züricher Bahnhofshalle (146'458 m³)

Volumen und Radioaktivität der Schweizer Abfälle



Abklingzeit HAA

2.96 10^{19} Bq Aktivität: 1 Bq = 1 Zerfall/s



Nach 1000 Jahren sind die Abfälle immer noch 100 mal radiotoxischer als Uranerz

Nach 200'000 Jahren ist die Radiotoxizität der Abfälle mit der eines natürlichen Uranerzlagers vergleichbar.

SMA sind nach 500 Jahren im Durchschnitt nicht gefährlicher als Phosphatdünger.
Nach rund 30'000 Jahren haben sie die Radiotoxizität von Granitgestein

Exkursion: Radiologische Einheiten

- 1 Bq = 1 Zerfall/s unterscheidet nicht nach Strahlenart und Wirkung
- Beispiel HAA Schweiz: 10^{19} Bq
- 1 Gray = 1 J/kg Energiedosis, die in 1kg Target deponiert wird
- 1 Sv = 1 J/kg Äquivalentdosis, die in 1 kg biologischem Gewebe deponiert wird. Berücksichtigt im Vergleich zum Gray noch die unterschiedliche biologische Wirkung der Strahlenart (Faktor 20 für Alpha, 1 für Beta und Gamma, 5-20 für Neutronen je nach Energie)
- Dosisleistung: Sv/a
- Natürliche Strahlenbelastung Schweiz: 4.5 mSv/a

Berechnung der Äquivalentdosis

Radionuklid	Halbwertszeit	Zerfallsart/ Strahlung	Beurteilungsgrößen			
			e_{inh} Sv/Bq	e_{ing} Sv/Bq	h_{10} (mSv/h)/ GBq in 1 m Abstand	$h_{0,07}$ (mSv/h)/ GBq in 10 cm Abstand
1	2	3	4	5	6	7
H-3, OBT	12.32 a	β^-	4.10 E-11	4.20 E-11	<0.001	<1
H-3, HTO		β^-	1.80 E-11	1.80 E-11	<0.001	<1
H-3, gaz [7]		β^-	1.80 E-11		<0.001	<1
Pu-239	2.411 E4 a	α / ph	3.20E- 05	2.50E- 07	0.001	<1
K-40 [10]	1.251 E9 a	β^- , ec, β^+ / ph	3.00E- 09	6.20E- 09	0.022	1000

Tabelle für alle relevanten Radionuklide in Anhang 2 der Strahlenschutzverordnung

Einzigste Vorschrift der Strahlenschutzverordnung für Endlager

- Belastung von Mensch und Umwelt muss über 1 Million Jahre kleiner sein als

0.01 mSv/a

- Das ist 2 Größenordnungen kleiner als die derzeitige mittlere Belastung der Schweizer Bevölkerung
- ENSI verlangt 0.1 mSv/a

Ideen zur Beseitigung von HAA

- **Wiederverwendung:** Da nur 5% des Energiegehalts der Brennstäbe genutzt wird bietet sich eine Wiederaufarbeitung und Weiternutzung an (Brutreaktoren oder Flüssigsalzreaktoren mit kontinuierlicher Wiederaufarbeitung). Dabei könnten auch wertvolle Metalle wie Rhodium und Ruthenium gewonnen werden. Die Wiederaufarbeitung führt aber auch zu waffenfähigen Stoffen wie Plutonium und erzeugt selbst wieder radioaktive Abfälle. Sie ist in einigen Ländern verboten.

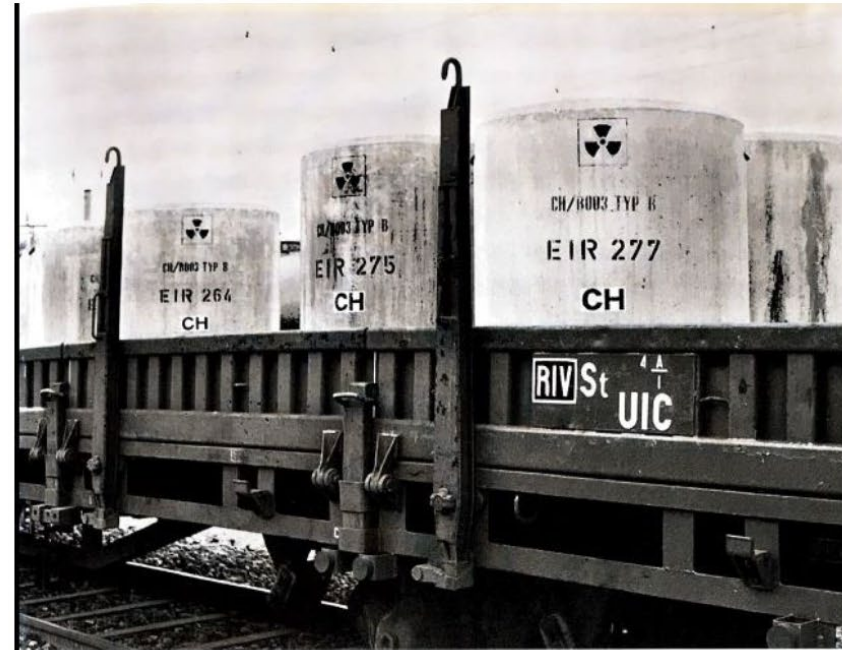
Fun fact: Rhodium ist das teuerste Metall: 1 kg kostet 350'000 CHF

- **Transmutation:** Verwandlung von langlebigen Isotopen in kurzlebige durch Neutronenbeschuss (Erzeugung schneller Neutronen per Beschleuniger: Spallationsquelle z. B. PSI)(MYRRHA-Projekt)
- **Per Raketen in die Sonne schießen:** Zu teuer und mit der Anzahl der erforderlichen Fuhren zu riskant (2000 Raketen pro Jahr)
- **Verklappung im Meer:** Lagerung von festen radioaktiven Abfällen im Meer seit 1994 international verboten.
- **Endlagerung in geologischen Formationen:** Gesetzlich verlangte Einschlussdauer: 1 Mio. Jahre. Derzeit international 3 Typen von Wirtsgestein: Granit, Salzstöcke und Tongestein

Gewusst?

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

Hadermann et al. 2014



Entscheidungen der Schweiz

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



Einige Vor- und Nachteile der 3 Wirtsgesteine

Gestein	Vorteile	Nachteile
Granit	Stabilität, geringe Durchlässigkeit gegen Wasser, Matrixdiffusion Stollenbau einfach	Unerkannte lange Klüfte Matrixdiffusion experimentell nicht nachgewiesen
Salzstöcke	Gute Wärmeleitfähigkeit, plastisch, wo Salz ist ist kein Wasser	Alte Salzbergwerke laufen in der Regel mit Wasser voll, Effekt des Ausdrückens eines Schwamms bei Konvergenz
Tongestein	Sehr geringe Wasserdurchlässigkeit, Selbstheilung von Klüften, Adsorption von kationischen Radionukliden	Bauen erschwert, Auflockerungszone um Stollen, verstärkt durch Austrocknung während Bau und Betrieb

Stand der Endlagerung in anderen Ländern

- Finnland: HAA Lager im Granit fertiggestellt, Einlagerung beginnt 2023
- Schweden: HAA Lager im Granit, Standort festgelegt, SMA Lager in Betrieb
- Frankreich: HAA Lager im Tongestein, Bauantrag gestellt
- Deutschland: SMA Lager im Salz (Morsleben) von DDR «geerbt», HAA Lager im Salz bei Gorsleben geplant aber abgeblasen, SMA Lager Grube Konrad in Betrieb (ehemalige Eisenerzgrube, Tongestein) Suche für HAA Endlager gestartet
- USA: Yucca Mountain im ungesättigten Tuffgestein abgeblasen da nur 10'000 Jahre Sicherheit garantiert waren

Consens: Nur die feste Erde bietet Aufenthaltszeiten der erforderlichen Grössenordnung von 1 Mio. Jahre

Endlagerungskonzept der Schweiz

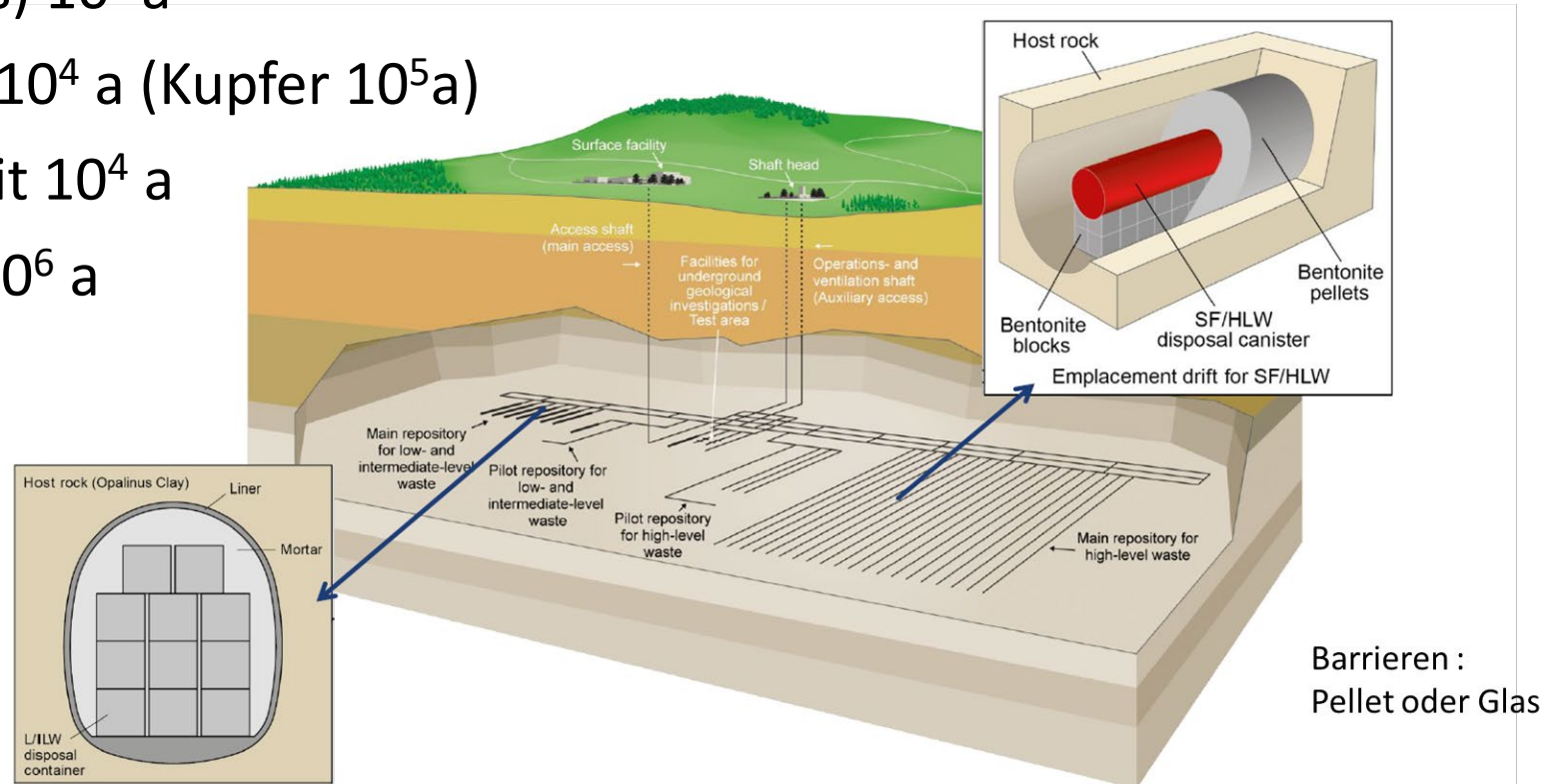
- Barrierenkonzept HAA

Abfallmatrix (Pellets, Glas) 10^2 a

Endlagerbehälter (Stahl) 10^4 a (Kupfer 10^5 a)

Stollenverfüllung Bentonit 10^4 a

Opalinuston-Formation 10^6 a



Endlagerungskonzept der Schweiz

Wirtsgestein: Opalinuston, abgelagert vor 175 Mio. a in der Jurazeit, Dogger α , Leitfossil *Leioceras opalinum*



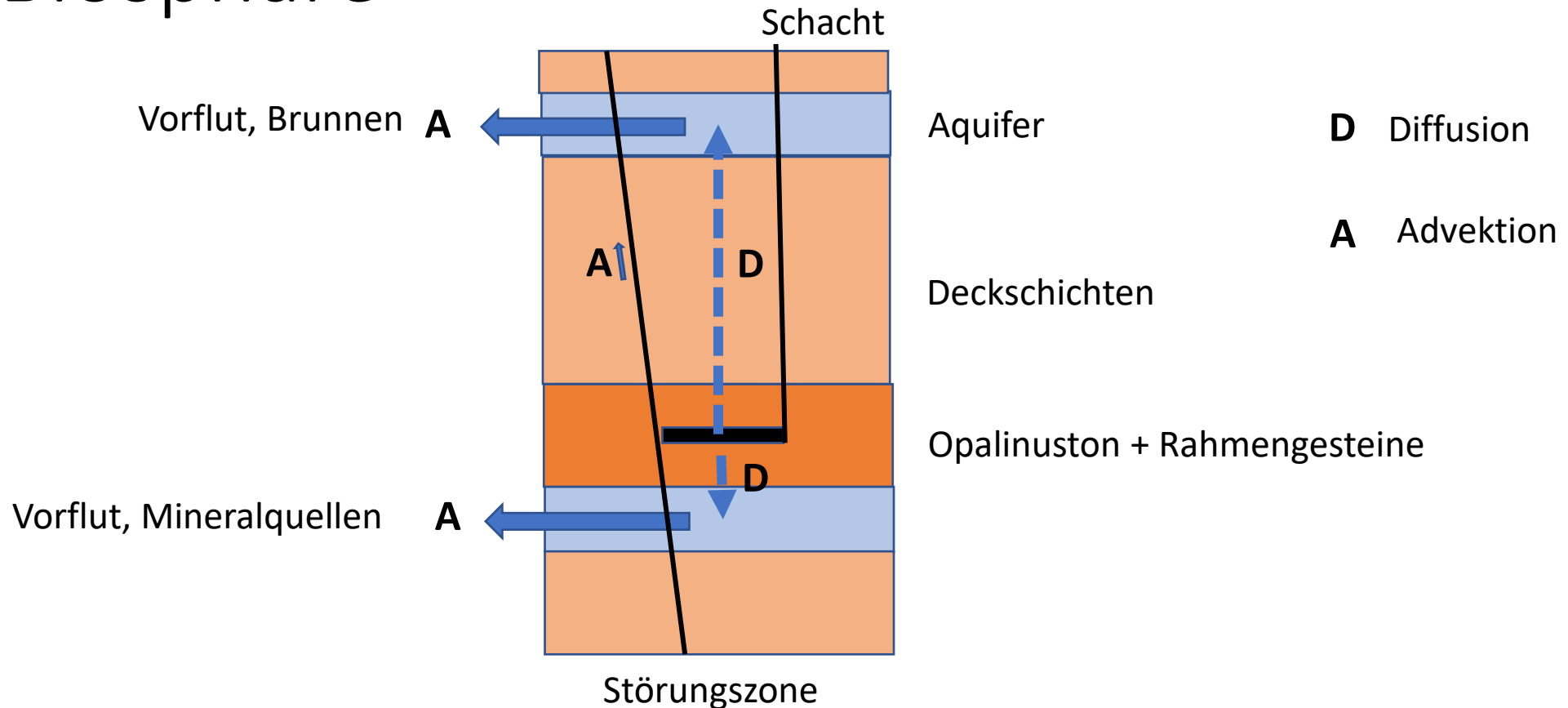
- Typische Hydraulische Leitfähigkeit
- $K = 10^{-13}$ m/s
- D.h. bei einer Schichtdicke von $d = 100$ m, einem hydraulischen Potentialunterschied von $\Delta H = 100$ m, und einer Porosität $n = 0.10$ kommt es zu einer **vertikalen** Fließgeschwindigkeit von
- $u = K \Delta H / (d n) \approx 0.03$ mm/a = $3 \cdot 10^{-5}$ m/a
- Um 50 m OPA zu queren braucht es 1.7 Mio. a

Abb. Nagra

Wie können Radionuklide wieder an die Oberfläche gelangen?

- Vektor Porenwasser (Diffusion-Advektion)
- Erosion des Gebirges von oben
 - Flächig
 - Durch Gletschervorstöße in Tälern
- Kombination

Grundwasser als Hauptbindeglied zwischen Lager und Biosphäre



Haupttransportpfad: Gelöste Radionuklide über Geosphäre per Diffusion und Advektion
Sekundärer Pfad: Durch Grubengebäude, EDZ (Excavation Damage Zone und aktivierte Störungen (wahrscheinlich nur relevant für Gastransport)

Zeitskalen der Prozesse

- Molekulare Diffusion

$$T_D = \frac{L^2}{D}$$

- Advektion

$$T_A = \frac{L}{u}$$

- Adsorption (lineare Adsorptions-Isotherme)

Multiplikation mit
Retardierungsfaktor R

Größen und typische Werte

L = Strecke (100 m)

D = Diffusionskoeffizient (10^{-10} m²/s)

u = Fließgeschwindigkeit in Poren
(Vertikal im OPA 0.01 - 0.1 mm/a,
Horizontal in Aquiferen 0.1-1 m/a)

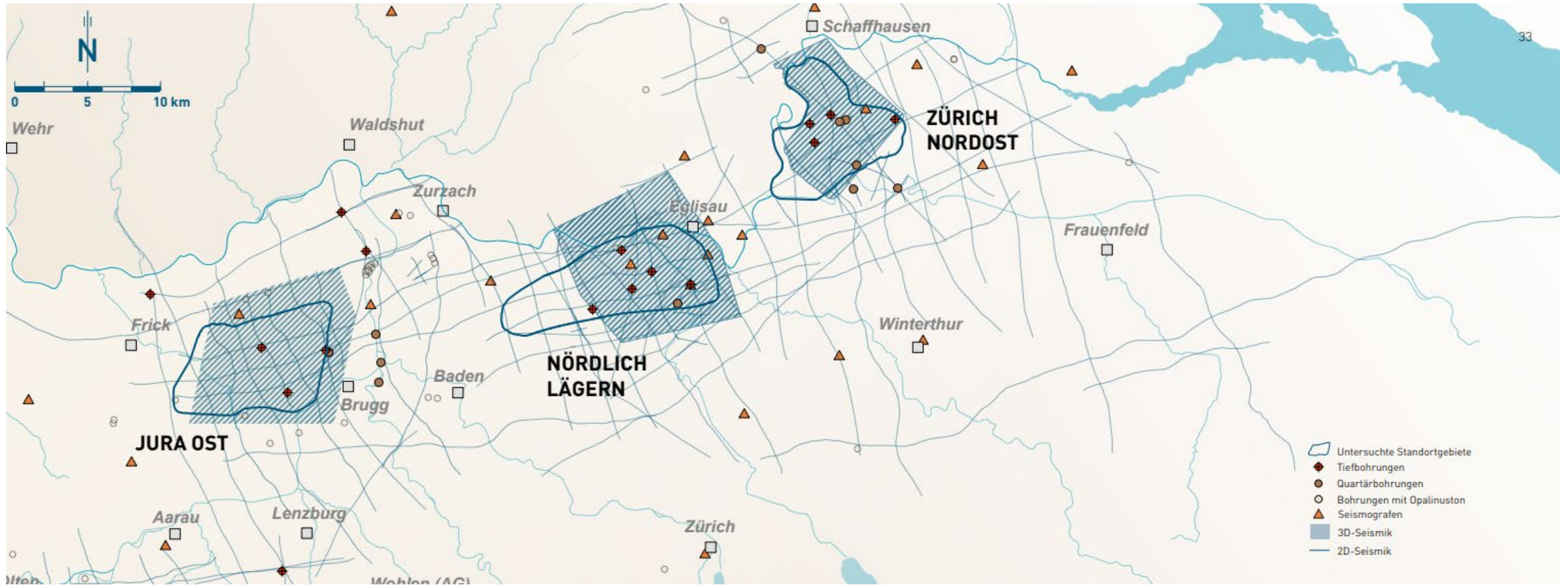
R = Retardierungsfaktor ($1 - 10^6$)

Dicke schützt vor Diffusion
Geringe Durchlässigkeit schützt vor Advektion
Adsorption verlangsamt beide

Günstige Standorteigenschaften für Rückhaltung von Radionukliden im OPA

- Grosse Mächtigkeit des OPA
- Grosse Tiefe des OPA unter Terrain
- Grosser Abstand des Lagers zu Aquiferen
- Geringe Präsenz bzw. Abwesenheit von modernem Wasser
- Geringe Transmissivität und Konnektivität von Aquiferen
- Wenige Störungen bzw. grosser Abstand des Lagers von Störungen
- Viel untertägiger Platz für Optimierung der Lagerauslegung

Vergleich der 3 untersuchten Standortregionen und Begründung für die Wahl von Nördlich Lägern



Punktdaten aus Tiefbohrungen

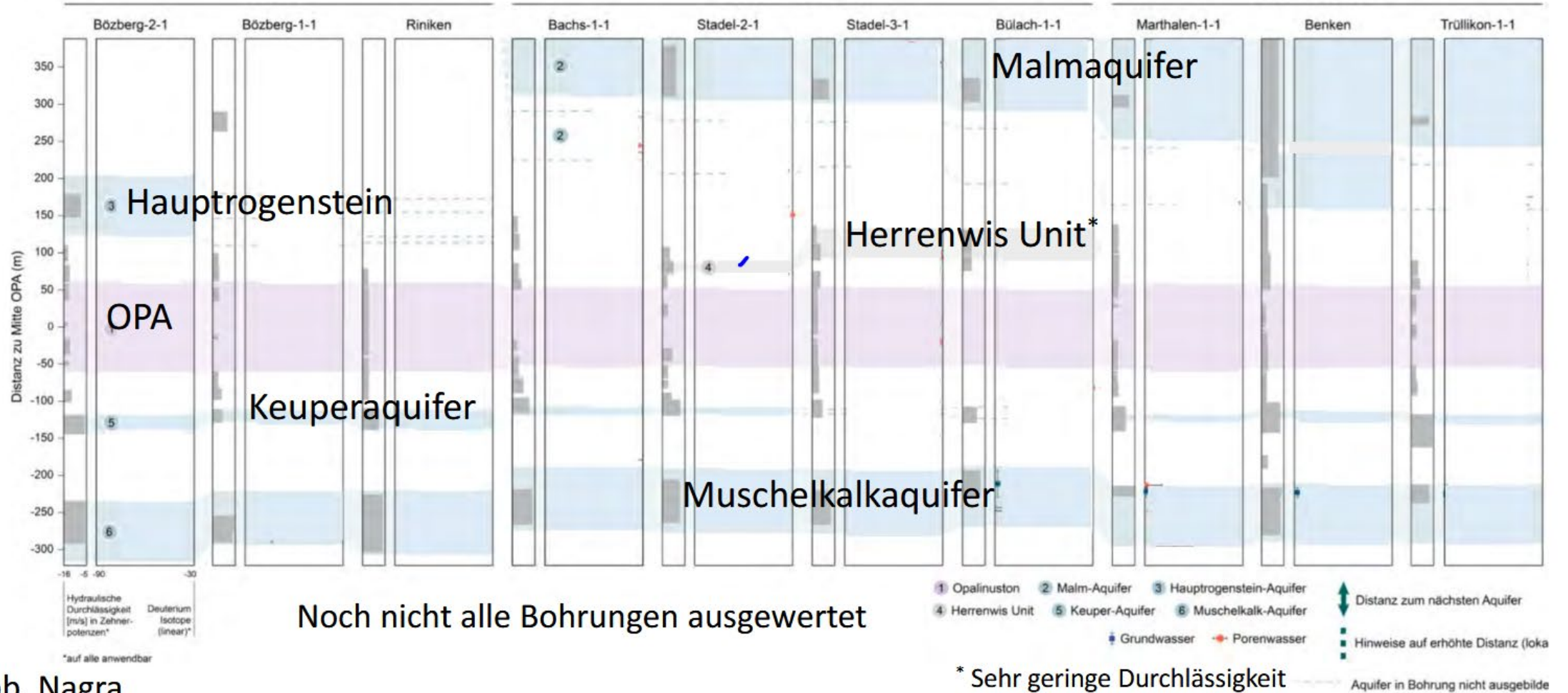
Flächige Daten aus 3D-Seismik

Aquifere der 3 Standortregionen

JO

NL

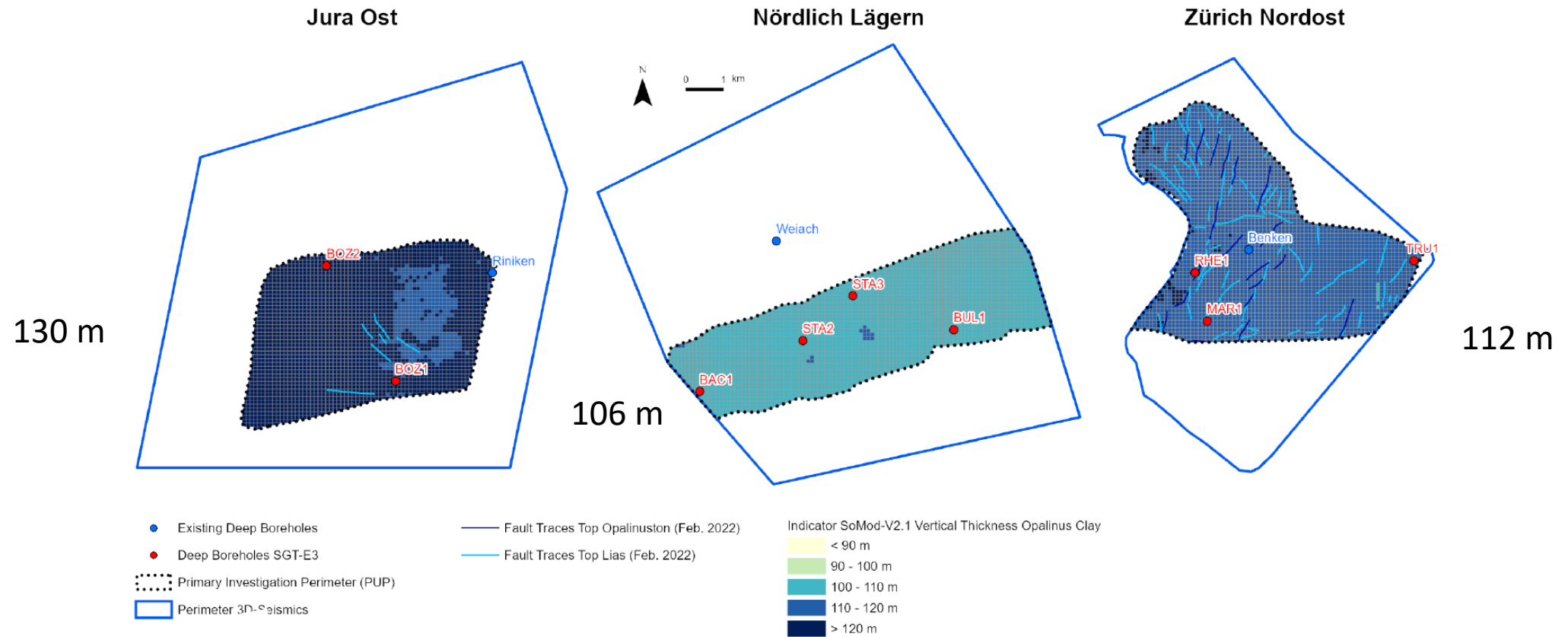
ZNO



Nach Abb. Nagra

Mächtigkeit OPA

JO > ZNO > NL



Typische Transportzeiten

- Diffusion im Opalinuston (je halbe Mächtigkeit nach oben und unten):

Zeitskala $T = L^2 / D$, mit $D = 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ für Wasser in OPA (D_{eff} /Porosität)

JO:	$L = d/2 = 60.5 \text{ m}$	$\rightarrow T = 1.1 \text{ Mio. Jahre}$	} Guter Schutz!
ZNO:	$L = d/2 = 56 \text{ m}$	$\rightarrow T = 1.0 \text{ Mio. Jahre}$	
NL:	$L = d/2 = 53 \text{ m}$	$\rightarrow T = 0.9 \text{ Mio. Jahre}$	

- Advektion im horizontal fließenden Grundwasser der Aquifere:

Zeitskala $T = L / u$, mit $u = 0.1 - 1 \text{ m/a}$ (u Fließgeschwindigkeit in Poren)

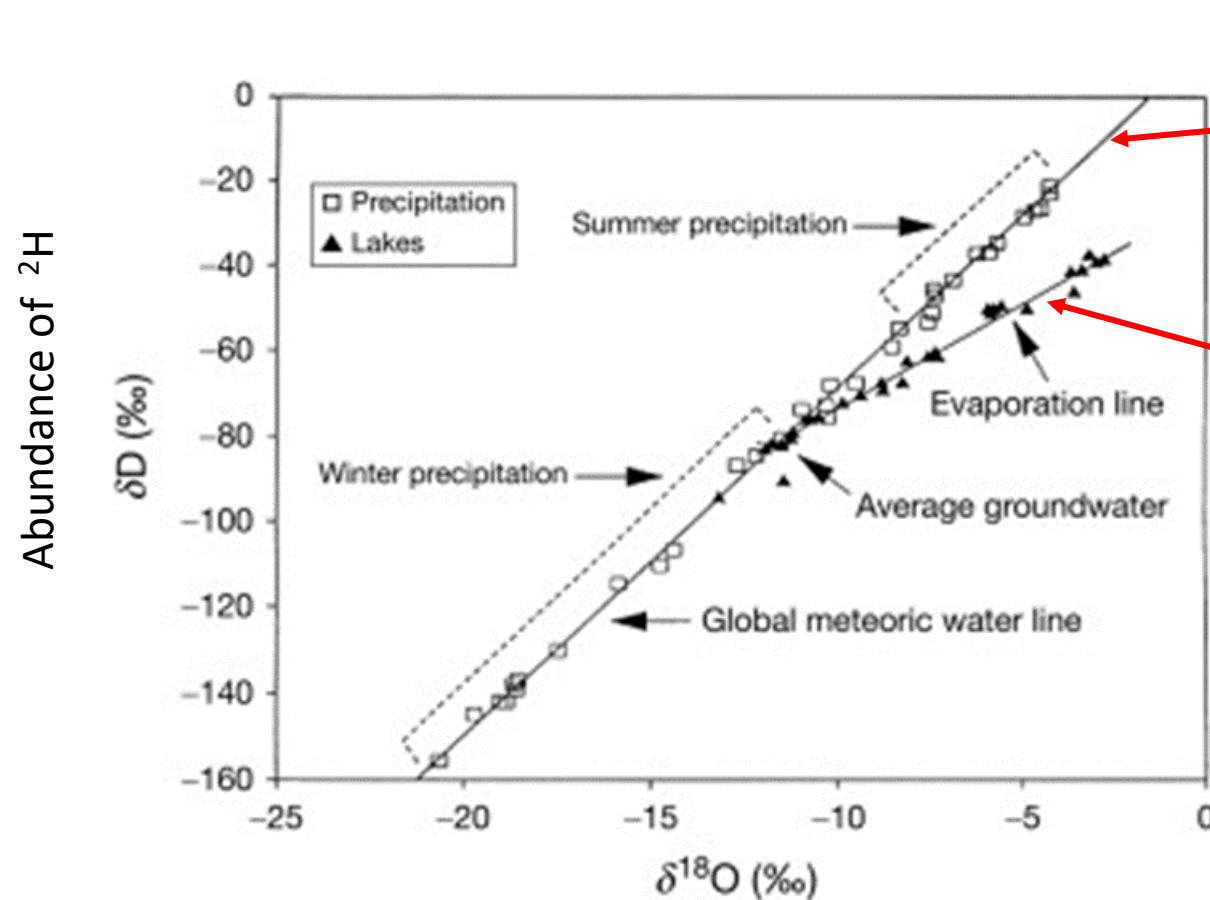
$L = 10'000 \text{ m} \rightarrow T = 10'000 \text{ a} - 100'000 \text{ a}$ } Weniger guter Schutz!

- Präferentieller Transport in Störungen/steilstehenden Klüften/EDZ:

Wahrscheinlich nur für Gastransport relevant

EDZ = Excavation Damage Zone

Nutzung von stabilen Isotopentracern ^2H und ^{18}O im Wassermolekül (HDO und H_2^{18}O)



Niederschlagsgerade

$$\delta ^2H = 8 \delta^{18}O + 10$$

Verhältnis der Anreicherungsfaktoren von D und ^{18}O bei Verdunstung: 8:1

Nach Verdunstung zurückbleibendes Wasser ist isotopisch «schwerer»

Anreicherung von schweren Isotopen durch Verdunstung im Flachmeer und Meeresbuchten während der Ablagerung des OPA

Transport durch Diffusion: Beobachtung TB Benken

Natürliche Tracer: Stabile Isotope des Wassermoleküls: HDO und H₂¹⁸O

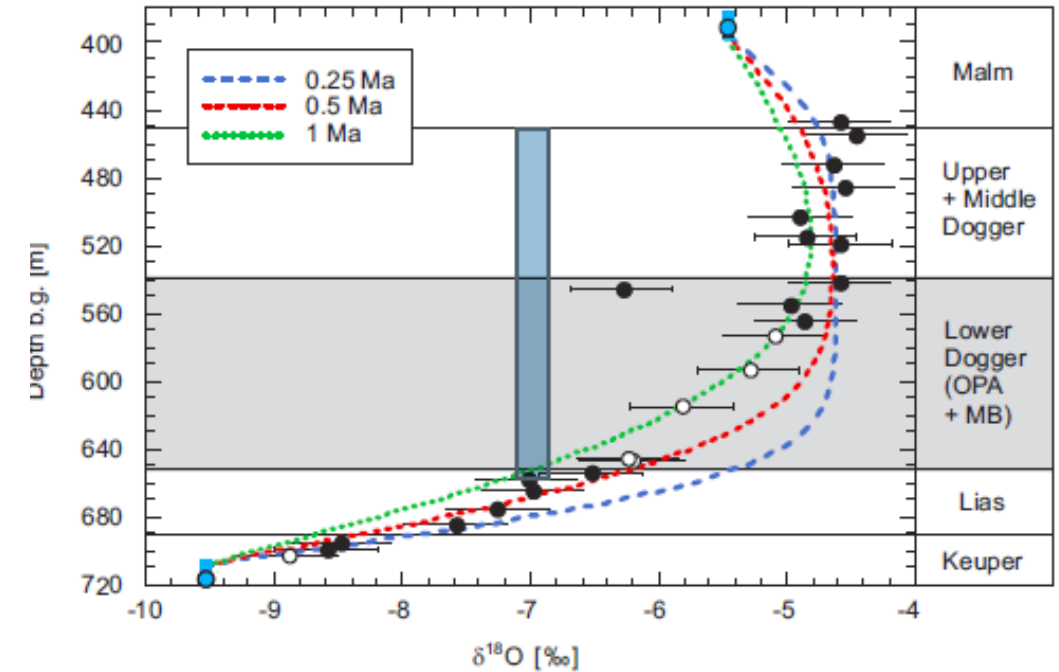
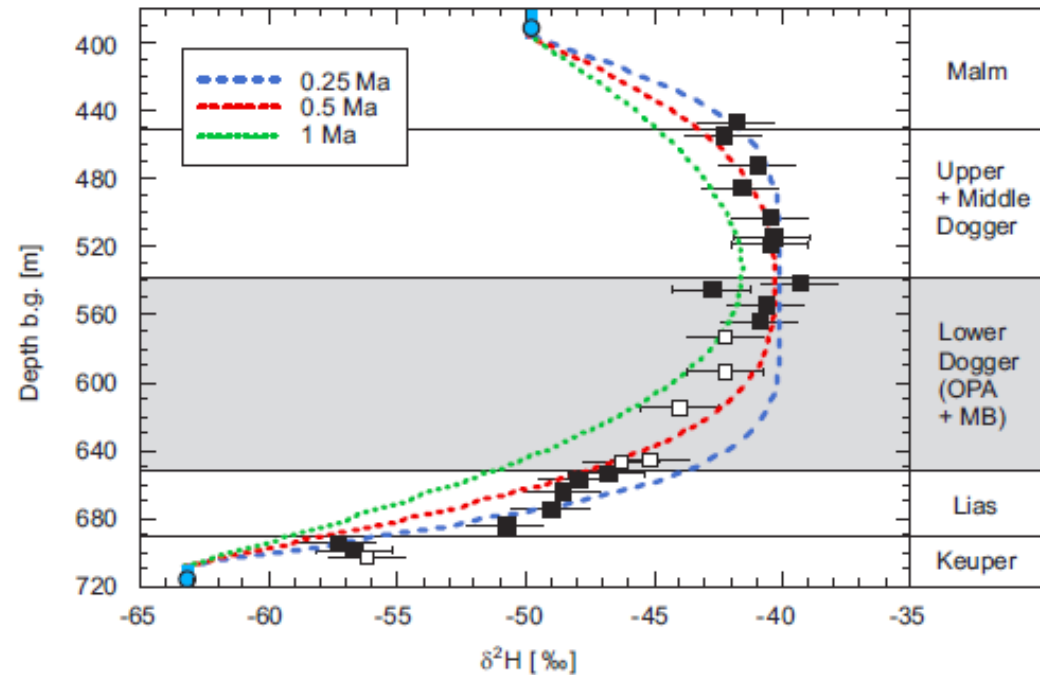


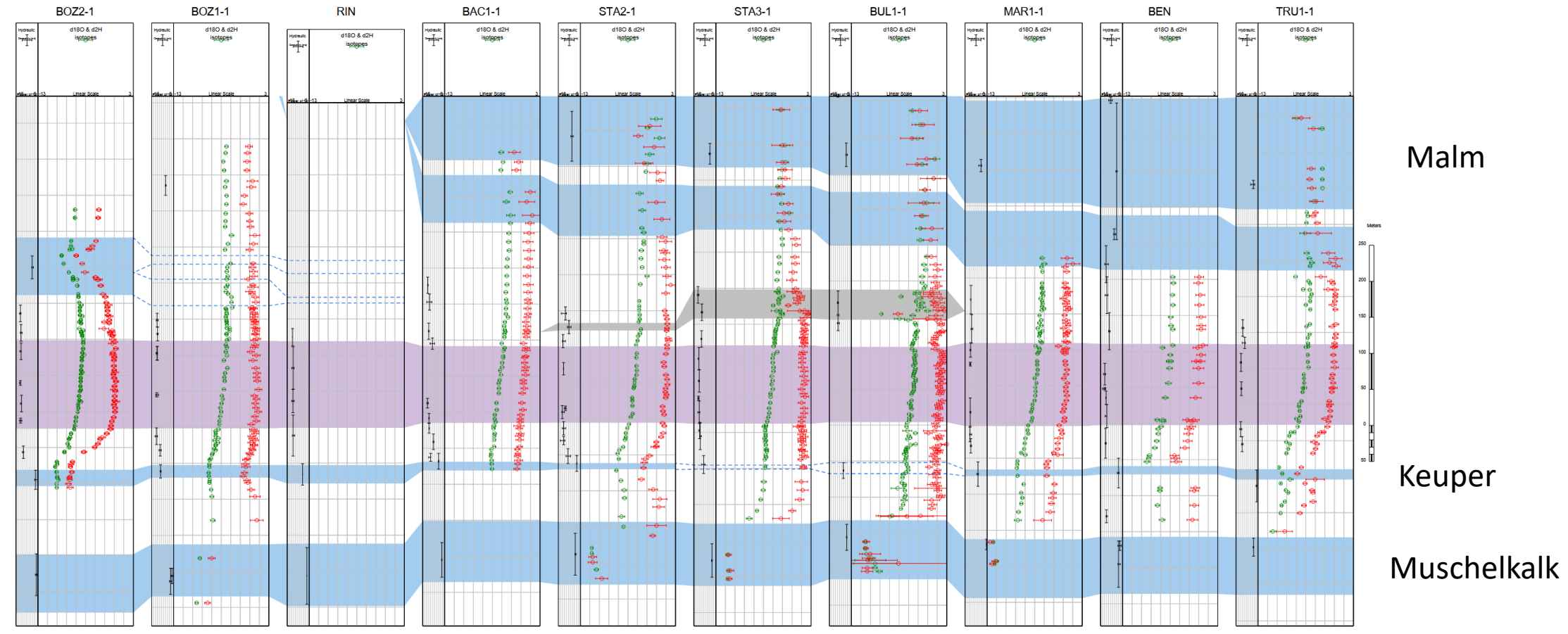
Fig. 4.2-14: Isotope concentration profiles in porewater across the Opalinus Clay (OPA) and adjacent rock strata due to diffusion that occurred for 0.25, 0.5 and 1 Ma.

Ausreichend für eine Verzögerung um 1 Million Jahre

Gimmi et al., WRR 2007

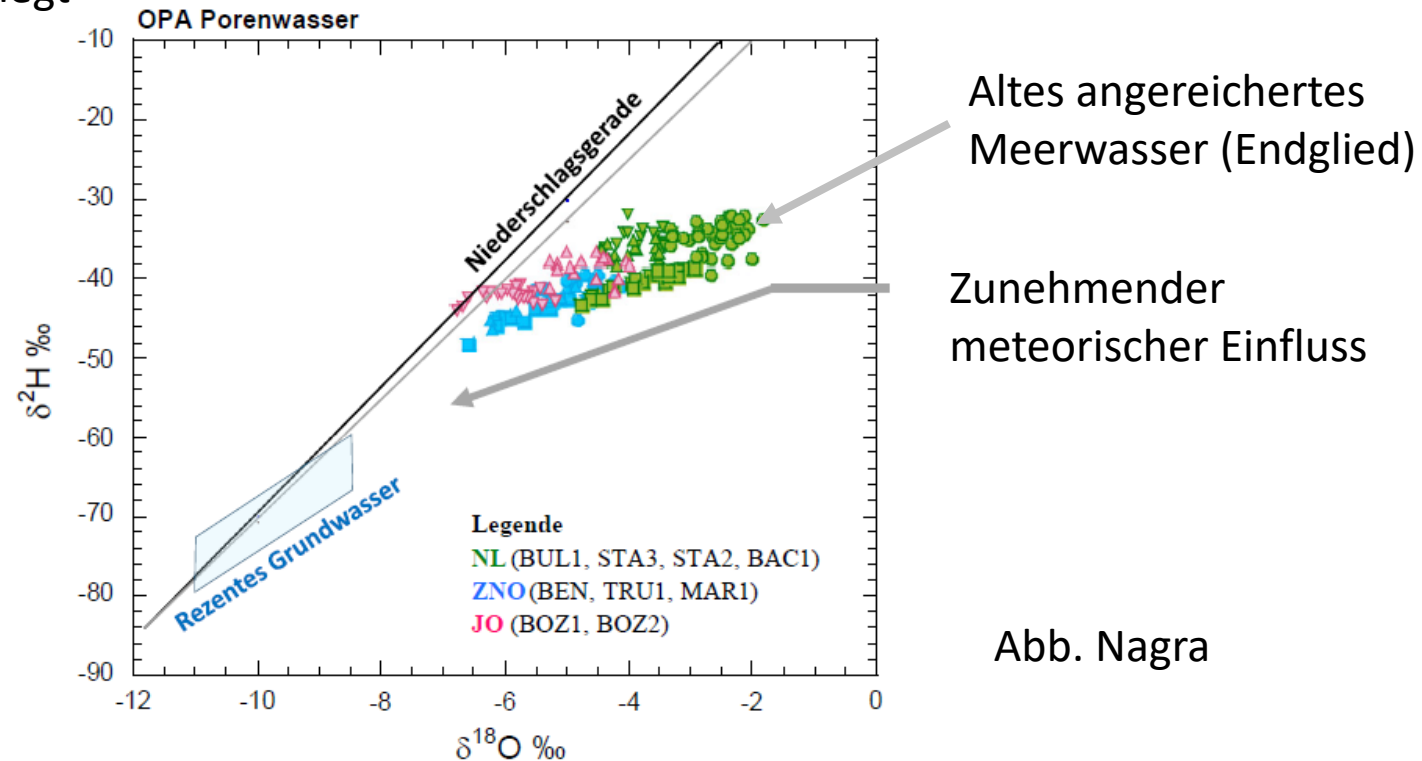
In den Aquiferen ist die Verzögerung dagegen vernachlässigbar klein (<10'000 Jahre). Im Aquifer ist die Verdünnung wichtiger.

Diffusionsprofile der stabilen Isotope (HDO und H₂O¹⁸)



Abschluss gegen meteorische Wässer

Starke Anreicherung schwerer Wasserisotope im OPA deutet auf Ursprung des Porenwassers als Meerwasser hin. Die Erhaltung dieser Signatur über lange Zeiten ist ein Hinweis auf geringe Beeinflussung durch meteorische Wässer. Das Standortgebiet NL zeigt den geringsten Einfluss meteorischer Wässer was im Kehrschluss die besten Einschlusseigenschaften nahelegt



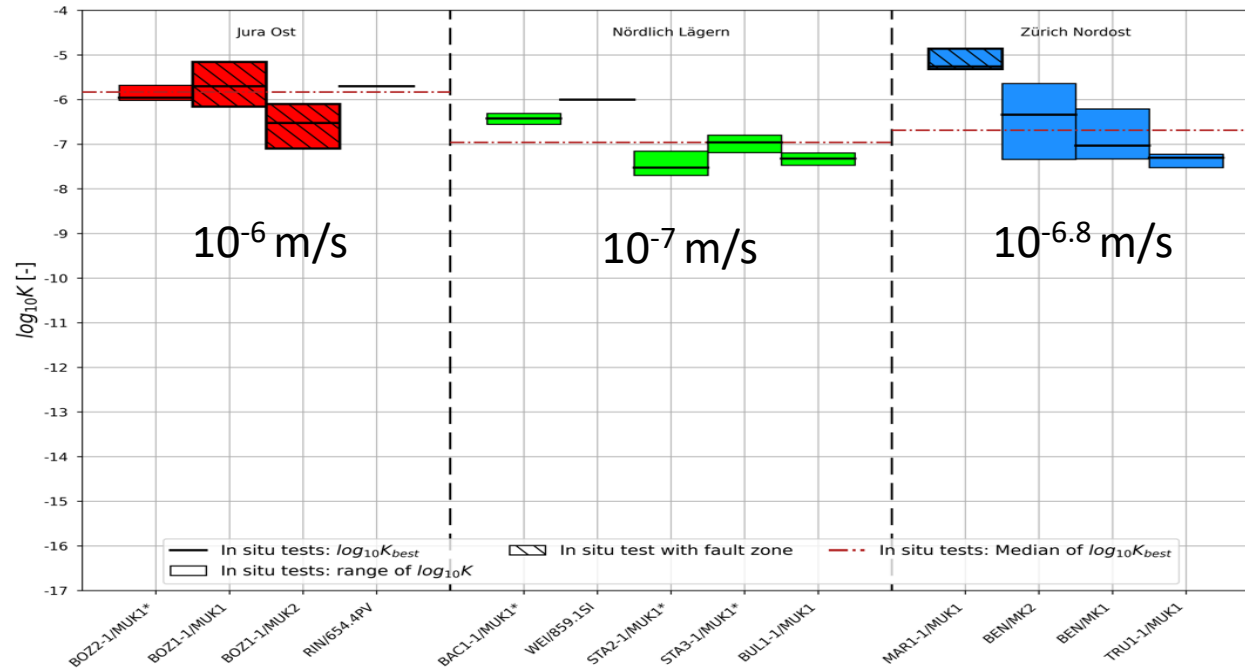
NL günstiger als ZNO und JO

Transmissivitäten und Konnektivität der Aquifere

Nur Muschelkalk, Keuper und Malm sind regionale Aquifere

Malm in JO nicht vorhanden, stattdessen Hauptrogenstein

Keuper in NL nicht durchgehend vorhanden, Muschelkalk-Transmissivitäten in NL am kleinsten



Informationsbasis gering

Auf der Basis von Transmissivitäten ist Diskriminierung nicht möglich

Abb. Nagra

Abstand zu regionalen Aquiferen oberhalb des OPA

NL > ZNO > JO

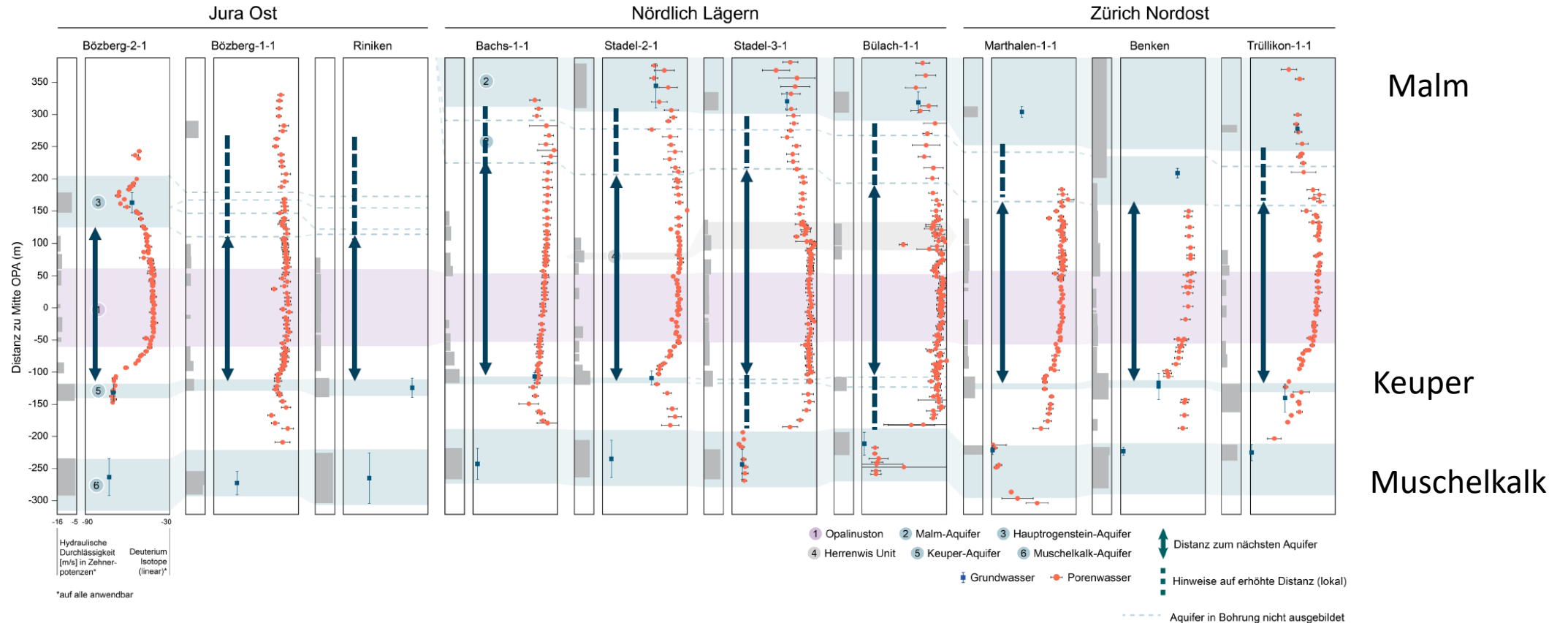


Abb. Nagra

Abstand zu regionalen Aquiferen unterhalb des OPA

$$NL > ZNO = JO$$

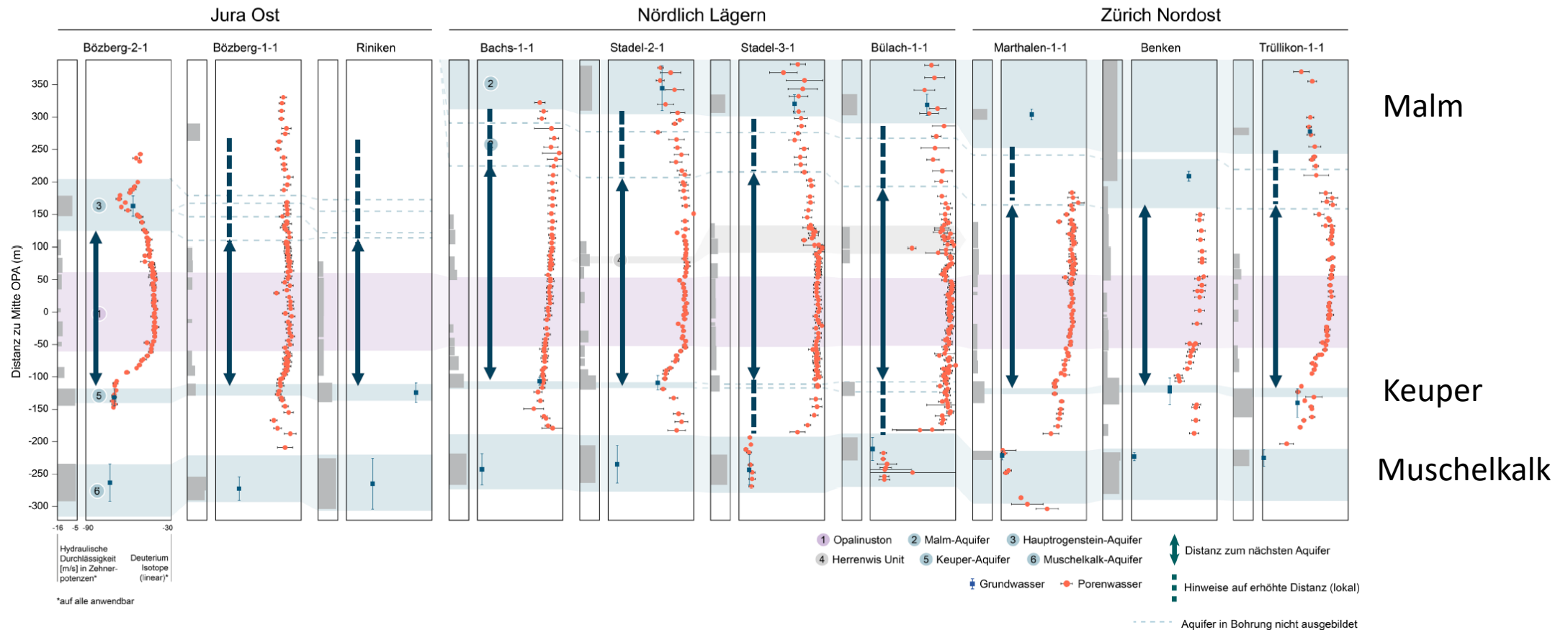
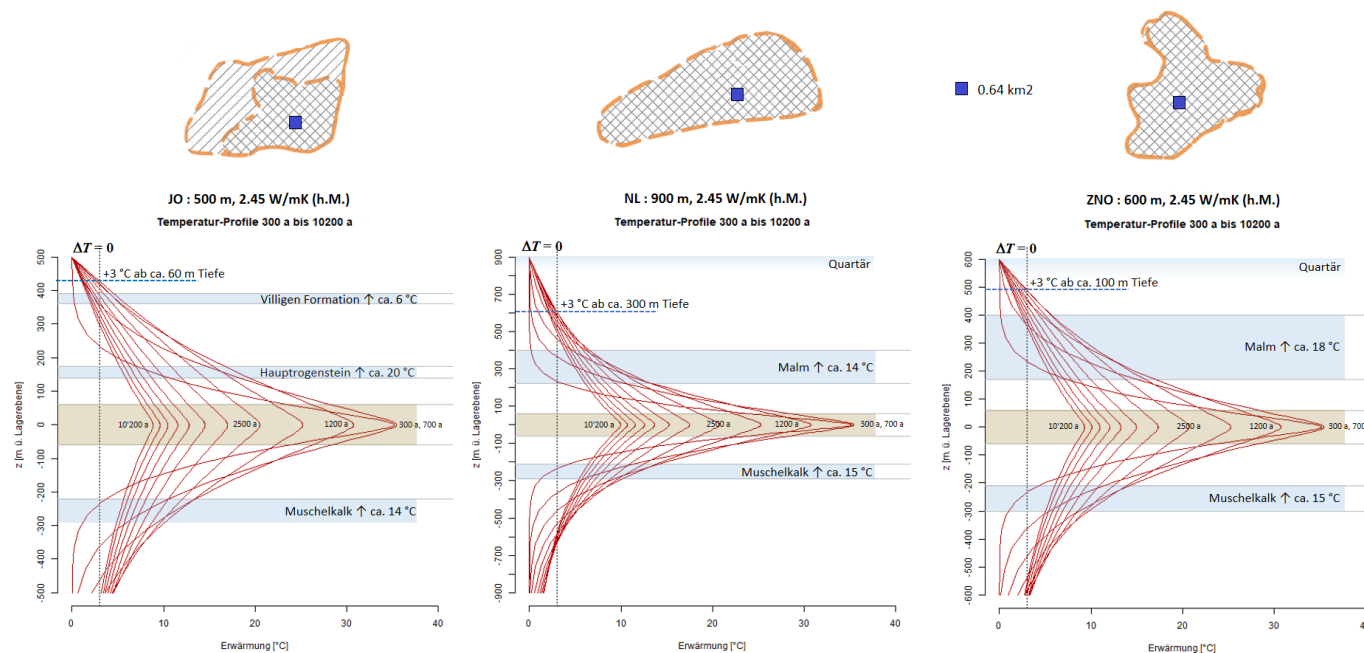


Abb. Nagra

Erwärmung von Aquiferen

Die SiKa/KES hat Berechnungen zur Temperaturentwicklung in den Aquiferen durchgeführt. Entgegen früheren Nagra-Abschätzungen kommt es zu Temperaturerhöhungen durch das HAA-Lager von über 10 Grad in den Regionalen Aquiferen (Malm, Muschelkalk). Grössere Distanz zu Terrain bringt kleinere Erwärmung



NL besser als ZNO, JO

Low-T Auslegung ratsam. Dann NL = ZNO = JO

(Kinzelbach und Heierli, 2022)

Störungen und Abstand zu Störungen

$$NL = JO > ZNO$$

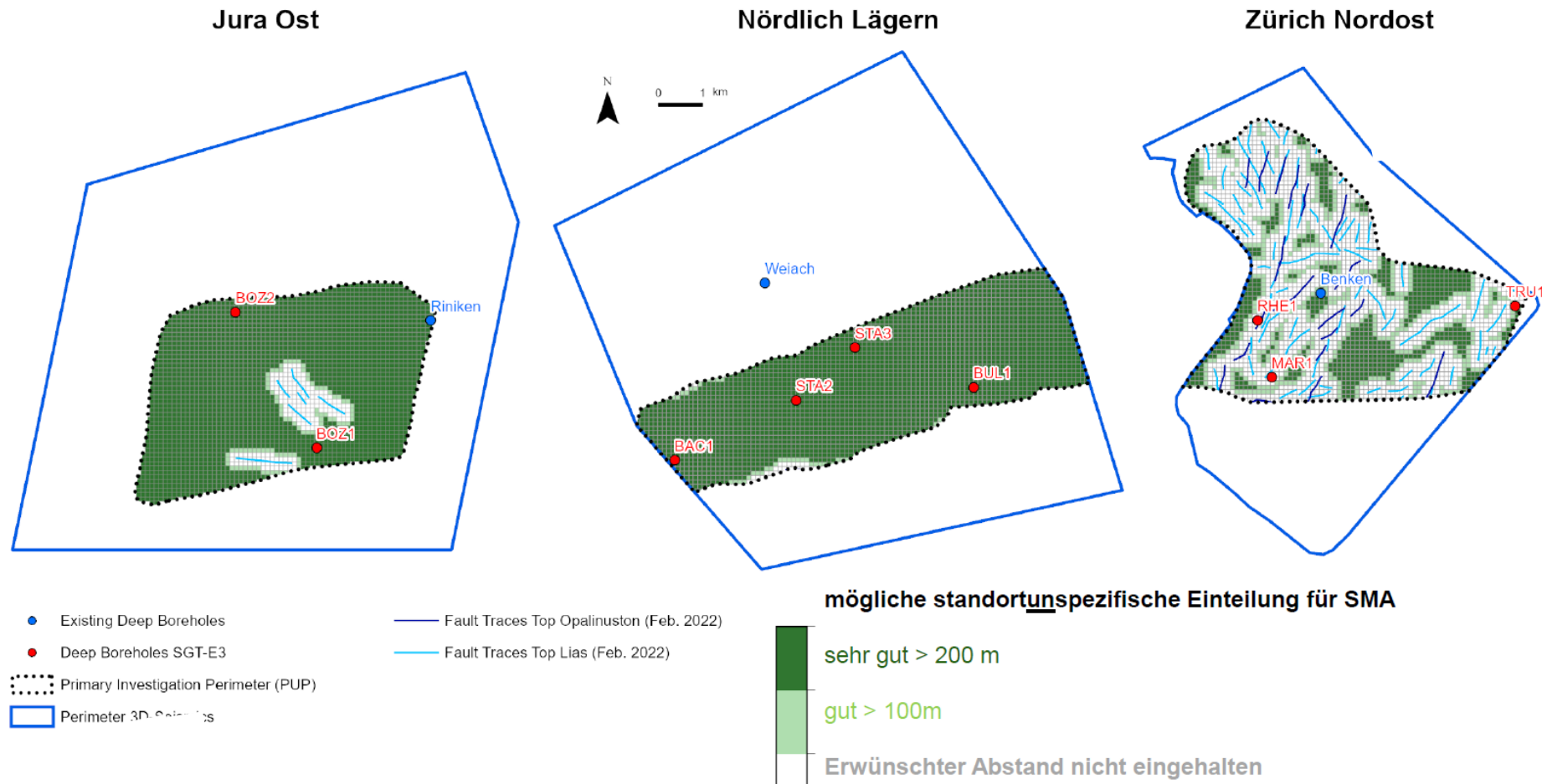
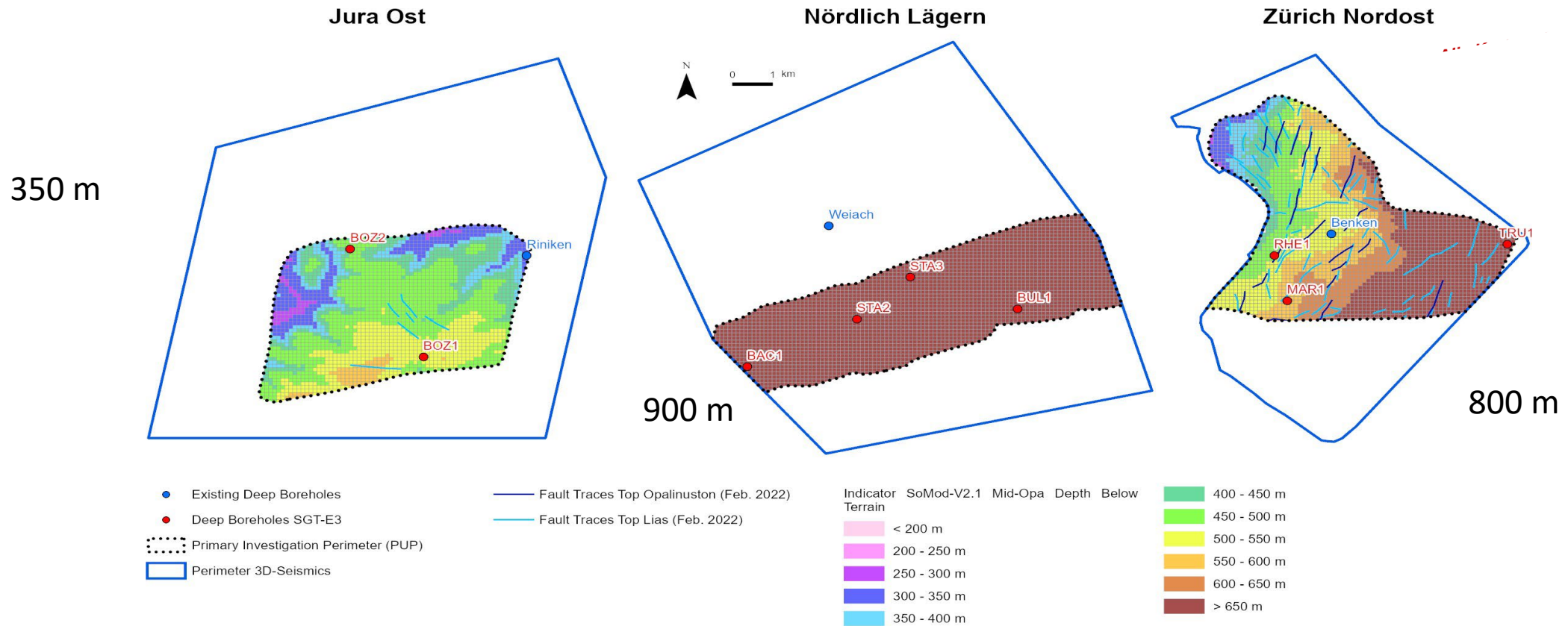


Abb. Nagra

Tiefe Top-OPA unter Terrain

NL > ZNO > JO

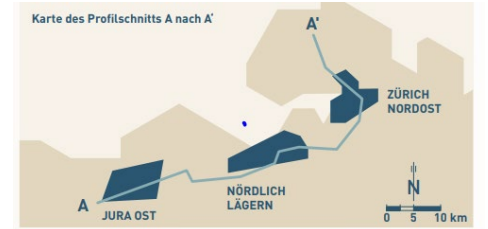
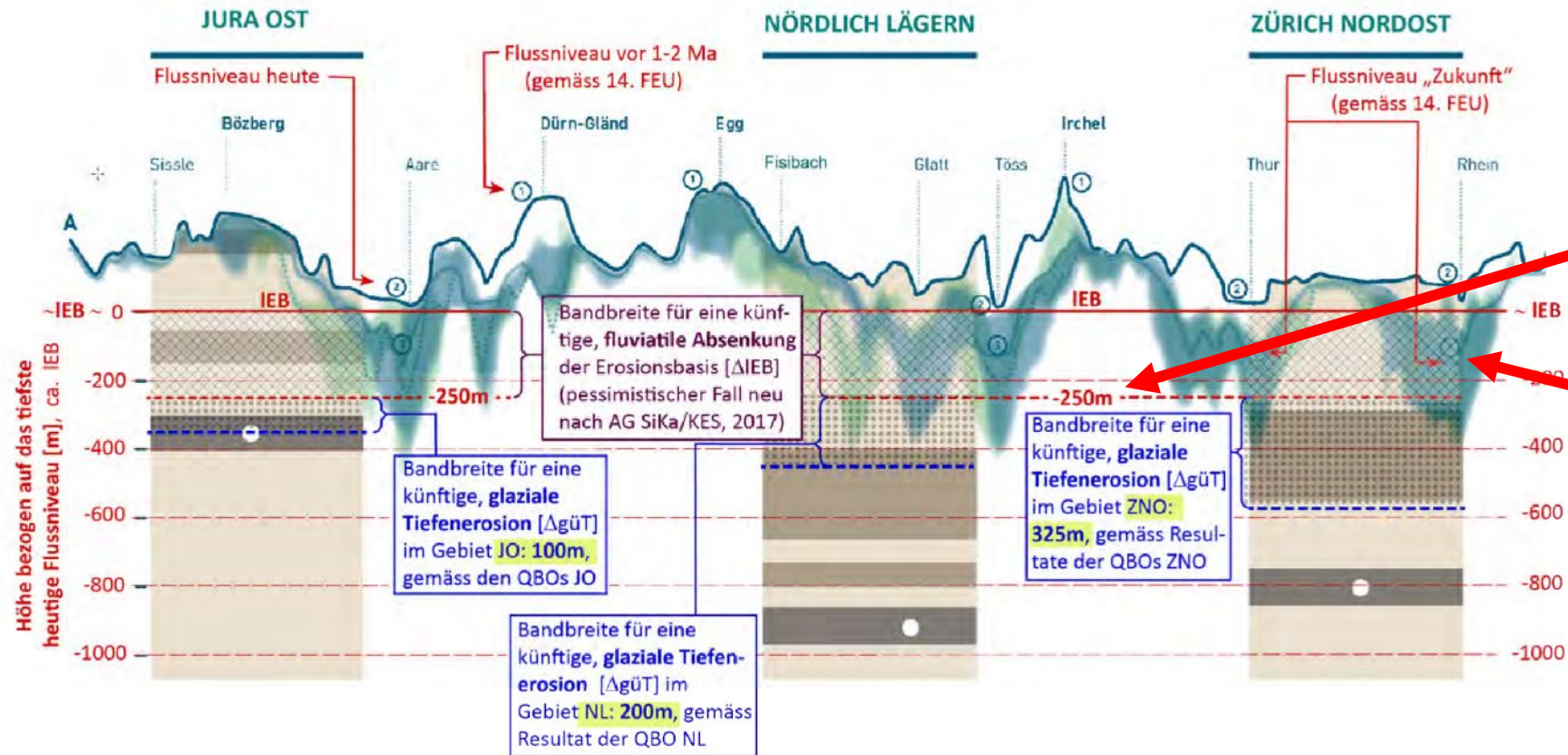


MXD: T:_alleProjekte\SV_ET3\04_SV_ASR\Dokumentation\APRX_alleStGB\Delineation_Fav_Areas_SMS_Draft_20220428.aprx

Abb. Nagra

Tiefe schützt gegen Erosion

Bei ungenügenden Kenntnissen gilt generell: «Das Lager soll so tief wie möglich gelegen sein»:



Flächige Erosion durch Lage der Erosionsbasis (Flussniveau) bestimmt

Tiefenerosion durch Vorstösse von Gletschern bestimmt

Legende von Folie 18
zum 14. FEU: LZE
vom 08. Juni 2022

■ Harte, resistente Gesteine

● Opalinuston mit Tiefenlager

— Erdoberfläche heute

— Beispielhaftes Szenario für Erdoberfläche in 1 Ma

■ Beispielhafte Szenarien für Erdoberfläche in 1 MA bei stabilem Flussnetz

■ Beispielhafte Szenarien für Erdoberfläche in 1 MA bei verändertem Flussnetz

Abb: Erich Müller und Nagra

Beinträchtigung der Schutzwirkung durch Schädigung des Gesteins

- Gasentwicklung sowohl im SMA- als auch im HAA-Lager führt zu Druckerhöhung
- Wärmeentwicklung im HAA-Lager führt ebenfalls zu erhöhten Porendrücken
- Falls Gesamtdruck den Grenzdruck übersteigt, können sich Klüfte öffnen, was eventuell zu Gasaustritt an die Biosphäre führt.
- Die Problematik lässt sich auf 2 Arten beherrschen:
 - Tiefenlage des Lagers: Je tiefer desto sicherer unterhalb Grenzdruck
 - Auslegung des Lagers: grössere Puffervolumina, Low-T
- NL ist durch seine grössere Tiefe günstiger als ZNO, ZNO wiederum günstiger als JO

Porendruck bei Referenzauslegung an den drei Standorten im Vergleich zum Grenzdruck

JO

Lagertiefe SMA: 540 m
Grenzdruck 10.2 ± 1.2 MPa

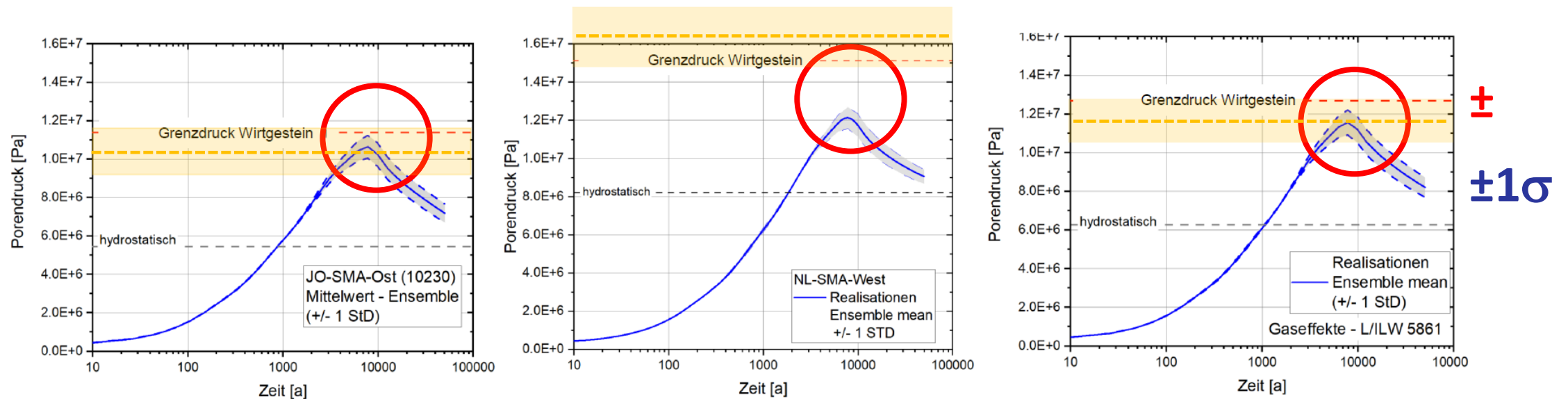
NL

Lagertiefe SMA: 870 m
Grenzdruck 16.3 ± 1.5 MPa

ZNO

Lagertiefe SMA: 620 m
Grenzdruck 11.7 ± 1.2 MPa

Abb. Nagra mit Ergänzung



Dosisberechnung für Bewohner von Schaffhausen in 1 Million Jahre

- Verlangt viele Annahmen
- Die Nuklidgehalte im Aquiferwasser müssen in einem Biosphärenmodell in äquivalente Dosisbelastungen von Menschen umgerechnet werden
- Beispiel J¹²⁹: Dieses Spaltprodukt hat eine Halbwertszeit von 15.7 Mio. a. Es ist ein dosisrelevantes Radioisotop, das in der Schilddrüse angereichert wird.
- Im Prinzip sind diese Rechnungen Unsinn. Sie sind nicht verifizierbar. Der einzige Nutzen ist **eventuell** die Verwendung zum **Vergleich** von verschiedenen Standorten/Lagerauslegungen.

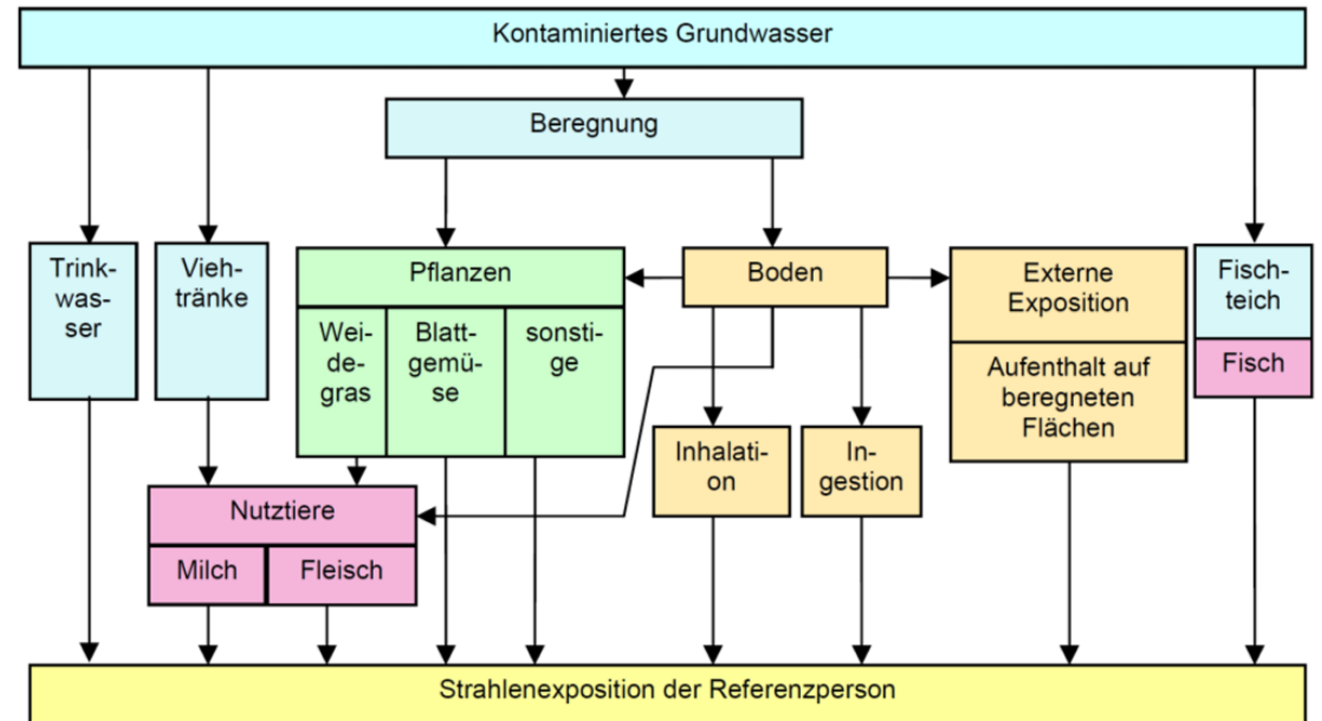


Abbildung 2-2: Überblick über die berücksichtigten Expositionspfade

Dosisberechnungen: Wirkung der geologischen Barriere (Diffusion)

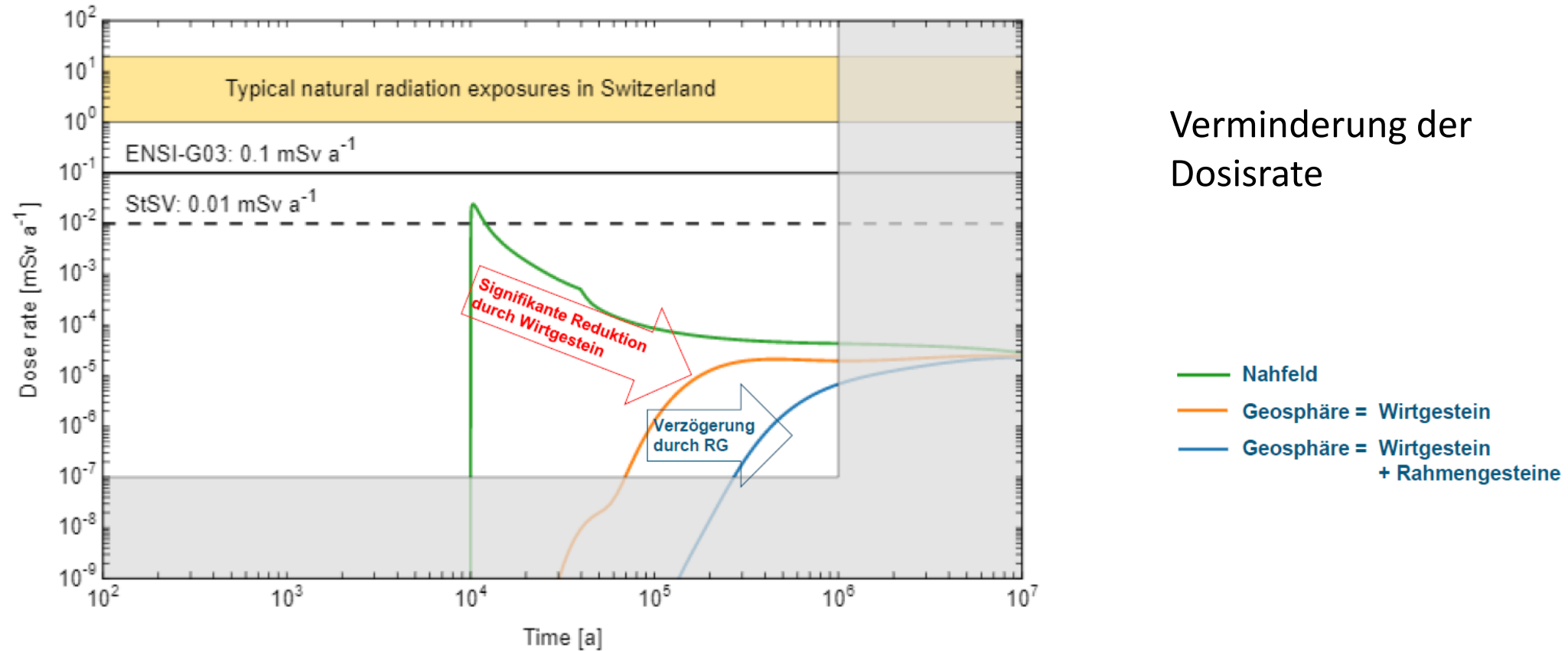
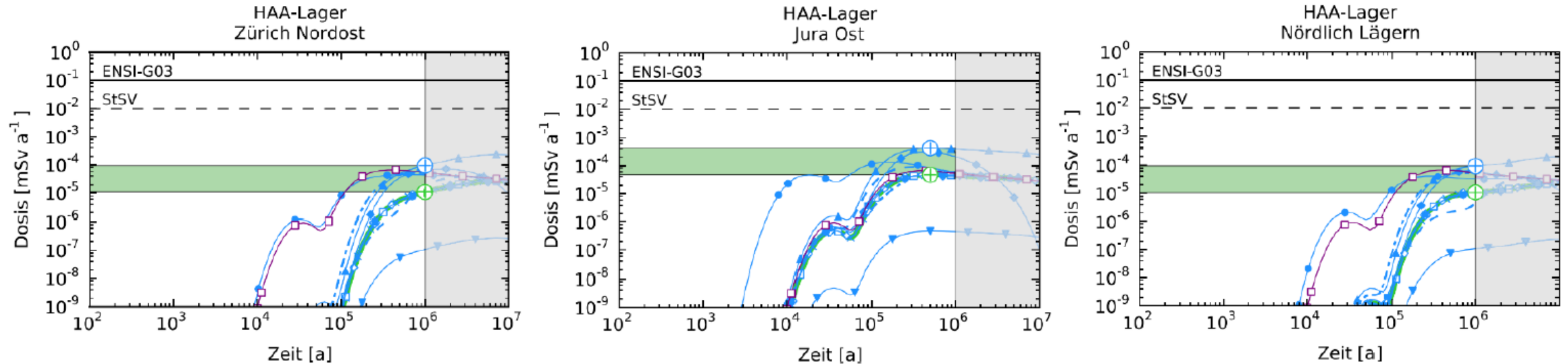


Abb. Nagra

Die letztliche Dosis hängt nur von wenigen sehr langlebigen Radionukliden ab

Dosisberechnungen mit Varianten

Dosisbestimmende Radionuklide ^{129}I , ^{36}Cl , ^{14}C , ^{79}Se



Ergebnisse aus SGT E2 (NTB 14-03)

Abb. Nagra

- Dosisintervall im Betrachtungszeitraum bis 1 Mio Jahre
- ⊕ Maximalwert aller Berechnungen
- ⊕ Maximalwert Referenzfall

Eventuelle Probleme: Dekompaktierung des Lagers und Freilegung durch Erosion nicht berücksichtigt
 Verdünnung im Biosphärenmodell über jeweils gesamten Aquifer nicht konservativ und unsicher
 Eventueller Gasaustrag über steilstehende Klüfte, Schächte noch nicht berücksichtigt

Wegen geringerer Gefahr der Dekompaktierung bzw. Freilegung: NL besser als ZNO besser als JO

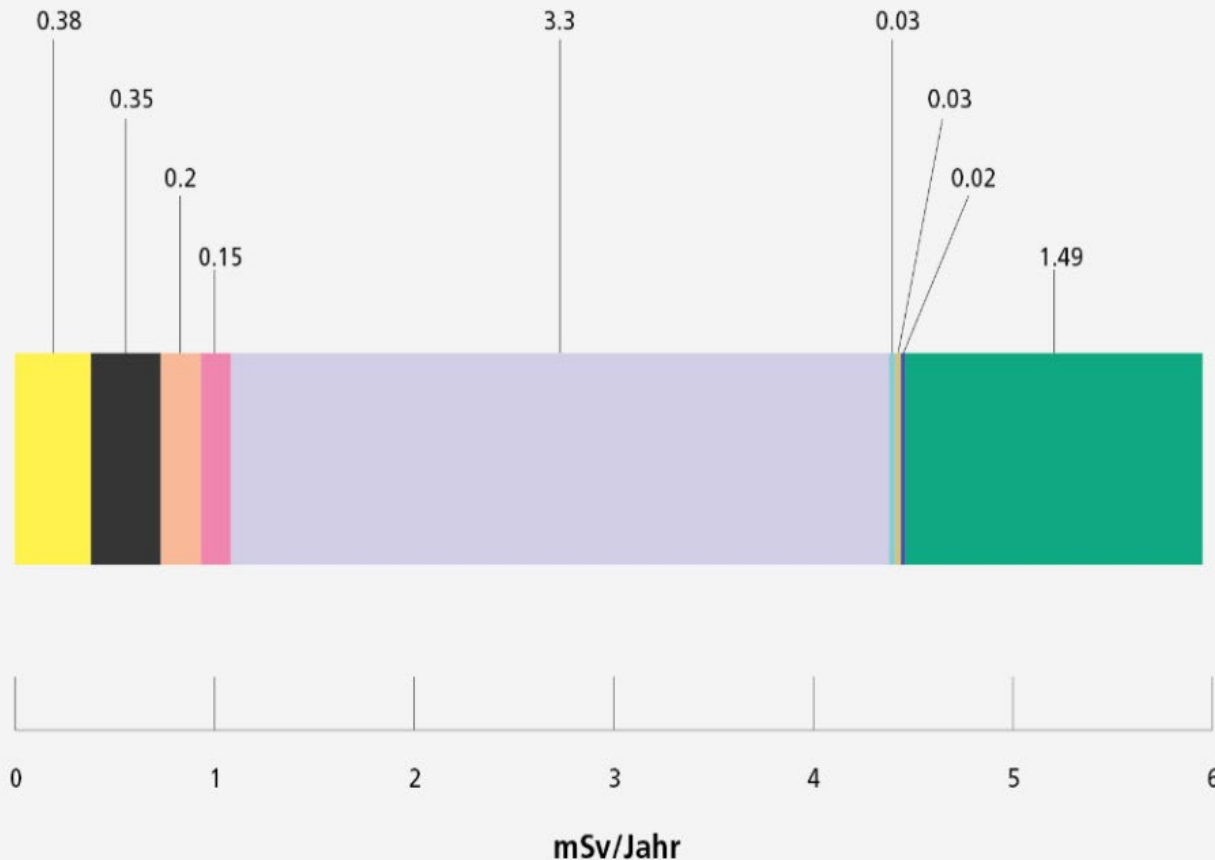
Fazit

- Aus der Sicht von Hydrogeologie und Stoff- und Wärmeausbreitung rangiert NL in den meisten Kriterien vor ZNO und JO
- Unterschiede in den Standorten können durch verbesserte Auslegung im Vergleich zur Referenzauslegung ausgeglichen werden
- Hauptschutz vor Dosisbelastung in der Biosphäre ist gewährleistet durch das Wirtsgestein OPA sowie die grosse Tiefe des OPA unter Terrain in NL.
- Unsicherheiten verbleiben im Zusammenhang mit Gasentwicklung, steilstehenden Klüften
- Streitpunkte bieten allenfalls auch die Oberflächenanlagen und der Lagerzugang

Meine Meinung

- Lager im Opalinuston sind sicher und halten nach menschlichem Ermessen die Radionuklide hinreichend lange zurück.
- Überraschungen sind beim aktuellen Bau noch möglich
- Das Lager sollte aber letztlich mit der gegenwärtigen Praxis der Lagerung in Hallen an der Erdoberfläche verglichen werden, bei der die Radionuklide nur wenige Dezimeter von der Biosphäre entfernt sind. (In vielen Ländern unter freiem Himmel)
- Es ist denkbar dass neue wissenschaftliche Entwicklungen die Behandlung von radioaktiven Abfällen möglich machen. Aber Kernkraft wird auch bei weiterer Entwicklung eine Übergangstechnologie bleiben. Letztlich werden immer gasförmige langlebige Radionuklide freigesetzt (z. B. ^{14}C), deren Akkumulation auch zum Erreichen eines Dosisgrenzwerts führen kann.
- Das Lager ist aus heutiger Sicht notwendig und NL ist ein sehr guter Standort.

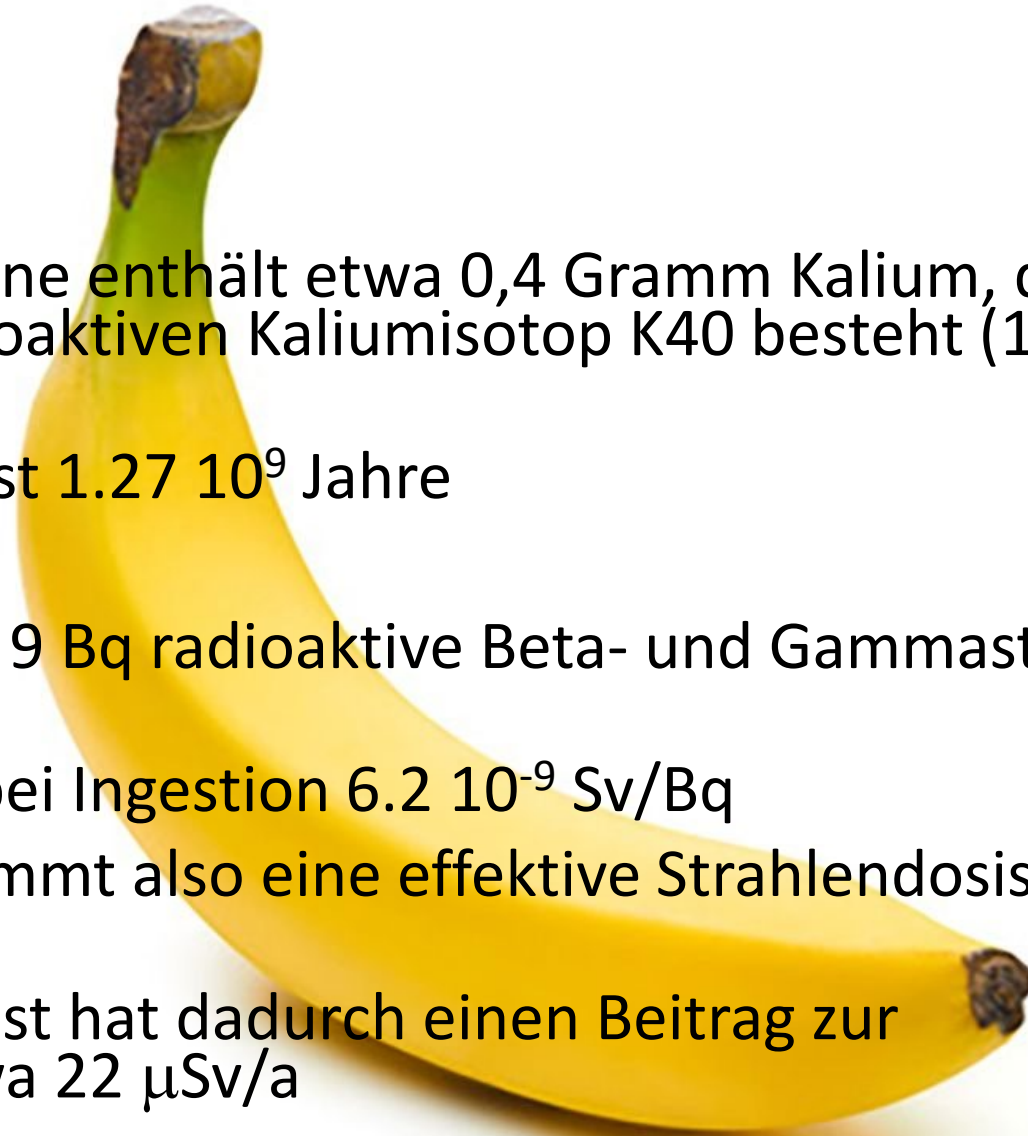
Strahlenbelastung der Schweizer Bevölkerung



- Kosmische Strahlung
- Terrestrische Strahlung
- K-40 in der Nahrung
- U und Th in der Nahrung
- Radon in Wohnräumen
- Flugreisen
- Rauchen
- Industrie, Forschung, Altlasten
- Medizinische Bildgebung

Beispiel Banane

- Eine durchschnittliche Banane enthält etwa 0,4 Gramm Kalium, das zu 0,012 Prozent aus dem radioaktiven Kaliumisotop K40 besteht ($1.2 \cdot 10^{-6}$ Mol).
- Die Halbwertszeit von K40 ist $1.27 \cdot 10^9$ Jahre
- 1 Mol hat $7.5 \cdot 10^6$ Bq
- Eine Banane gibt deswegen 9 Bq radioaktive Beta- und Gammastrahlung ab.
- Aus der Tabelle finden wir bei Ingestion $6.2 \cdot 10^{-9}$ Sv/Bq
- Wer eine Banane isst, bekommt also eine effektive Strahlendosis von etwa 0,06 Mikrosievert ab.
- Wer im Jahr 356 Bananen isst hat dadurch einen Beitrag zur Jahresdosisleistung von etwa $22 \mu\text{Sv/a}$



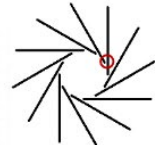
Kosten

- Erwartete Kosten für Tiefenlager


20 Milliarden CHF

Temperatur im Lager


- Low-T design vorteilhaft für geringere Porenwasserdrücke und Gasdrücke
- Vorschläge KES (gleiche Tunnellänge wie Nagra Referenzauslegung, aber grösserer foot - print)




Low-T vortex, $12 \times 1.33 \text{ km} = 16 \text{ km}$



Low-T sparse grid, $10 \times 1.6 \text{ km} = 16 \text{ km}$



Low-T sparse grid with increased canister pitch
 $10 \times 3.2 \text{ km} = 32 \text{ km} = \text{Umhüllendes Inventar SGT}$



Low-T radial, $12 \times 1.33 \text{ km} = 16 \text{ km}$



Referenzauslegung Nagra, $20 \times 0.8 \text{ km} = 16 \text{ km}$

2 km