Welche Konsequenzen ergeben sich aus dem Klimawandel für die sichere Entsorgung radioaktiver Abfälle?

Forum Vera, 13 – 14.09.2019

Dr. Jens K. Becker



Die Nagra – Zweck und Organisation

1972 gründeten die Verursacher radioaktiver Abfälle der Schweiz die Nagra (Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle)

- Zweckgenossenschaft der Abfallverursacher
- Gesetzlicher Auftrag durch Kernenergiegesetz (KEG)
- Finanzierung der gesamten Entsorgung durch Verursacher zur Zeit KKWs 97%, Bund 3%
 Bezahlung über Strompreis ~1 Rp/kWh
- Ca. 120 Mitarbeitende (Wissenschaftler, Techniker, Ingenieure)
- Firmensitz in Wettingen
- Forschung in 2 Felslabors der Schweiz (Grimsel und Mont Terri)
- Gemeinsame Forschung mit 10 Nationen
- Aufwand: Rund CHF 60 Mio. pro Jahr



Basis-Szenario und Gesamtvolumina

- Basis-Szenario:
 - 60 Jahre Betrieb (KKM 47 Jahre) für die Schweizer Kernreaktoren; keine zusätzlichen Verträge zur Wiederaufarbeitung (zurzeit Moratorium); inkl. Abklinglagerung gemäss revidiertem Strahlenschutzgesetz.
 - Sammelperiode MIF bis Ende Betrieb eines Lagers SMA (2065).
- Gesamtvolumen radioaktiver Abfall der Schweiz (inkl. Verpackung): 92'234 m³

HAA: 9'402 m³

LMA: 1'072 m³

SMA: 81'760 m³

Verbrauchte Brennelemente sowie Reaktorabfälle der KKW (aktiviertes Material Reaktorbetrieb)

Betriebsabfälle der KKW (Kleider, Harze, Metalle etc.)

Abfälle aus der Wiederaufarbeitung der Brennelemente

Stillegungsabfälle nach Abbruch der nuklearen Anlagen (Kernkraftwerke, Zwischenlager, Forschungsanlagen)

Abfälle aus Medizin, Industrie und Forschung (Bund)

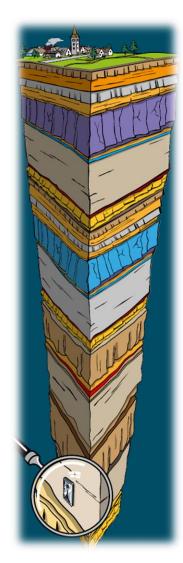








Ziel der nuklearen Entsorgung



Radioaktive Abfälle müssen so entsorgt werden, dass der dauernde Schutz von Mensch und Umwelt gewährleistet ist. (KEG, Art 30)

... um dies zu gewährleisten, müssen die radioaktiven Abfälle so lange eingeschlossen werden, bis ihre Aktivität auf unbedenkliche Werte abgeklungen ist.

Entsorgung: Konditionierung, Zwischenlagerung und Lagerung der radioaktiven Abfälle in einem geologischen Tiefenlager (KEG, Art 3)

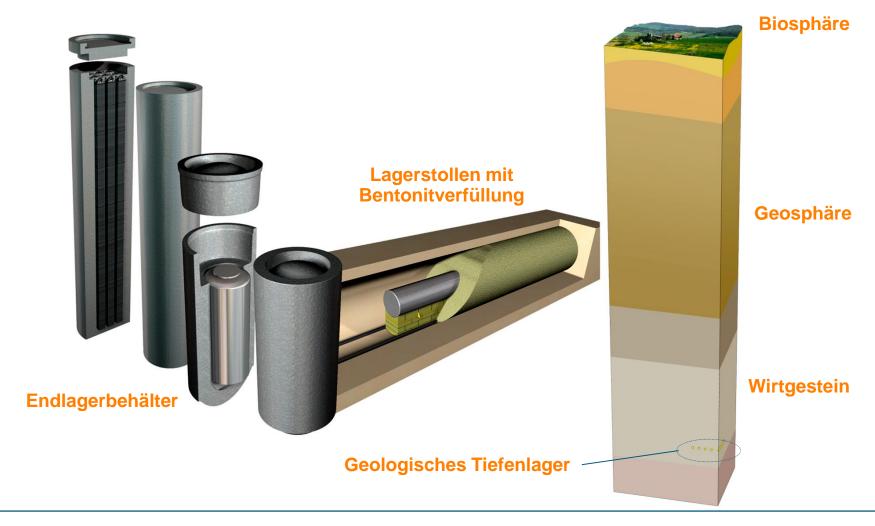




nagra

Technische und geologische Grundlagen

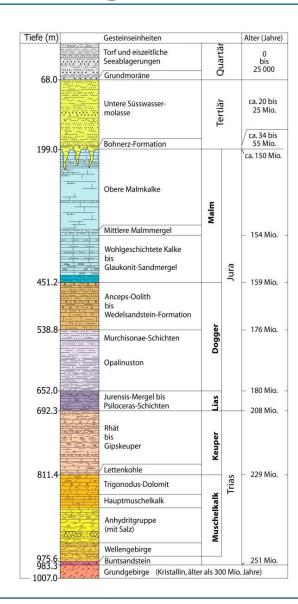
Konzept der mehrfachen Sicherheitsbarrieren
 (hier für hochaktives Abfallglas und verbrauchte Brennelemente BE)





Geologische Situation und Wirtgestein

- Mit der Tiefenlage des Lagers sorgt die Geologie für eine räumliche Trennung der Abfälle von der Biosphäre.
- Die Geologie bildet eine physikalisch und chemisch stabile Umgebung, in welcher die technischen Barrieren über lange Zeit wirksam bleiben.
- Die Geologie übernimmt mit ihren Eigenschaften eine weitere langfristige Barrierenwirkung, indem sie die Ausbreitung der aus dem Lager freigesetzten radioaktiven Stoffe verzögert und begrenzt.

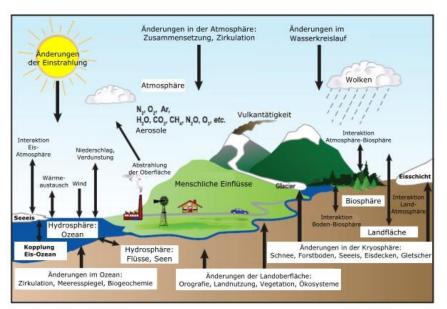


- Anforderungen an das Wirtgestein:
 - Gute Langzeitstabilität
 - Günstige mechanische Eigenschaften
 - Genügende Raumausdehnung
 - Günstige Tiefenlage
 - Günstige chemische Eigenschaften
 - Günstige physikalische Eigenschaften
 - Gute Explorierbarkeit
 - Gute Prognostizierbarkeit der Prozesse

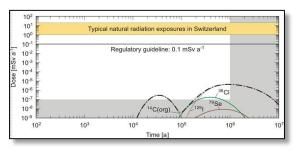


Sicherheit beim Umgang mit radioaktiven Abfällen

- Nachweiszeitraum nach Verschluss des Tiefenlagers (SMA – 100 ka, HAA 1 Mio a)
 Sicherheitsbeurteilungen umfassen
 - Transport radioaktiver Stoffe in die Biosphäre
 - Erosion/Freilegung
 - ➤ Menschliches Eindringen → nicht von klimatischen Bedingungen beeinflusst



From: IPCC AR4, 2007



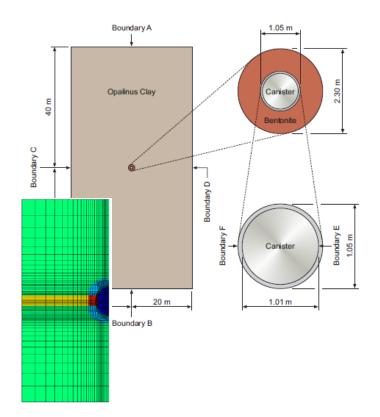




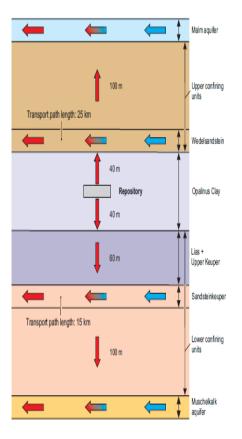


Transport radioaktiver Stoffe in die Biosphäre

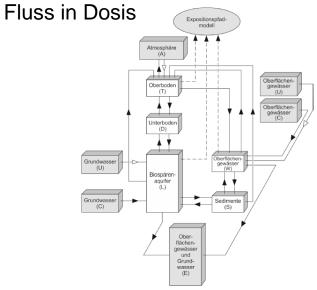
- 1. Nahfeldmodell
- Freisetzung
- Transport aus Behälter, durch Puffer, ...
- mit Rückhaltung (Sorption, ...)



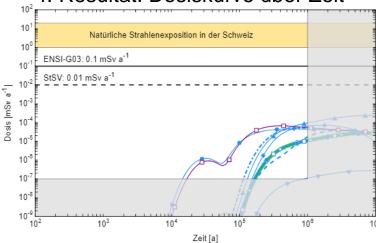
- 2. Fernfeldmodell
- Transport in Geosphäre
- durch Wirtgestein und Rahmengesteine
- mit Rückhaltung



3. Biosphärenmodell Umrechnung von Radionuklid-

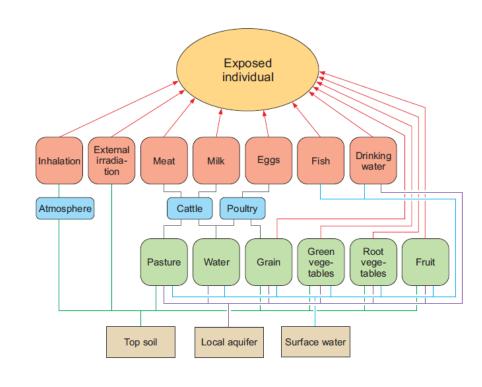


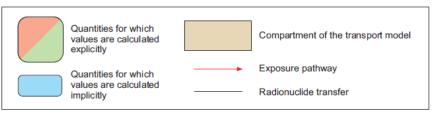
4. Resultat: Dosiskurve über Zeit



Effekte des Klimas auf die Biosphäre

- Klimatische Veränderungen haben einen direkten Einfluss auf die Biosphäre durch:
 - Ab-/Zunahme der Temperatur
 - Ab-/Zunahme des Niederschlages
 - Ab-/Zunahme katastrophaler Events (Überflutungen, Starkregen, etc.)
 - Eiszeiten (als genereller Begriff, also inklusive Einflüsse durch Permafrost, topographische Änderungen etc.)
 - ..
- Aus den Klimasimulationen k\u00f6nnen zur Charakterisierung der Einfl\u00fcsse folgende Daten gezogen werden:
 - Niederschlag, Temperatur, Evapotranspiration,
 Windgeschwindigkeiten, Häufigkeit und Dauer katastrophaler Events usw.
- Die Analyse dieser Daten ermöglicht z.B. die Bestimmung von:
 - Oberflächenwasser, menschliches Verhalten (Bewässerung, Nahrungszusammensetzung usw.)



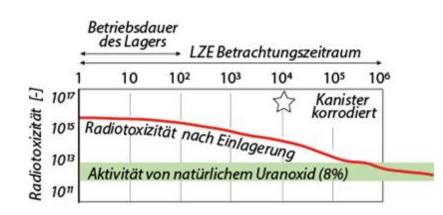


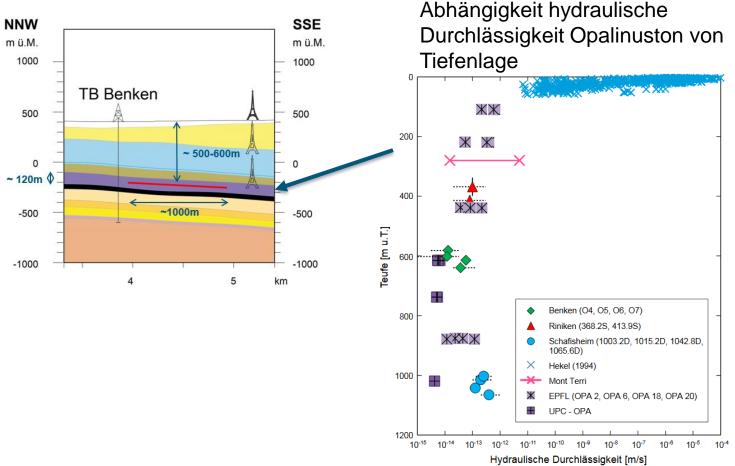
Exposure pathways and the relationship between exposure pathways and the dynamic compartment model. After Kłos et al. (1996).



Effekte des Klimas auf die Geosphäre

- Klimatische Veränderungen haben einen direkten Einfluss auf die Geosphäre durch Erosion
- Erosion --> Dekompaktion --> reduzierte Barrierewirkung des Wirtgesteins
- Wahl von geeigneter (Tiefen)lage des Opalinustons --> Schutz vor Erosion über lange Zeiträume





Erosionsarten





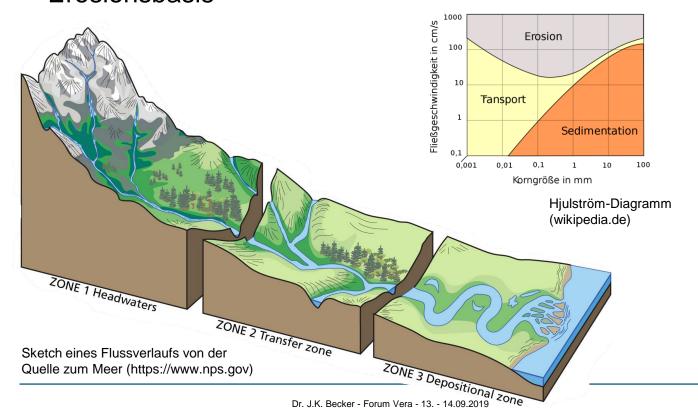






Erosion durch Wasser

- Hier hauptsächlich fluviatile Erosion (Flusserosion)
 Jineare Erosionsform durch Talwärts fliessendes
 Wasser
- Wichtig für die maximale, durch fluviatile Erosion erreichbare Tiefe, ist die sogenannte lokale Erosionsbasis

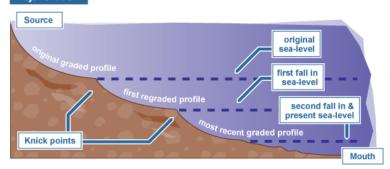


Source Smooth concave profile decreasing in angle and gradient towards the mouth Mouth





Rejuvenation



Entwicklung eines Flussprofils von der Quelle zum Meer (http://sageography.myschoolstuff.co.za)



Hebung fördert Erosion durch Flüsse

- Die Geosphäre ist nicht statisch sondern ist langfristig Veränderungen unterworfen (Hebung/Senkung).
- Diese Hebungen
 /Senkungen beeinflussen die
 Erosion durch Flüsse.
- Eine Abtragung von 1 mm/a entspricht 1km / 1 Mio a (bzw. 0.1 mm/a = 100 m / 1 Mio a).

Hebung pro Jahr in Millimeter

Bezugspunkt

0,0

0,0

0,3

0,9

1,1

1,2

1,3

1,2

1,2

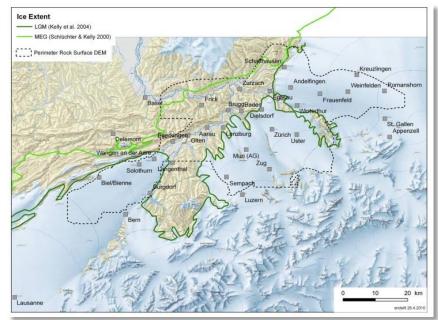
Daten der Schweizer Landesvermessung der letzten 100 Jahre; Hebung der Alpen, Absenkung Mittelland und Jura



Erosion durch Eis (Gletscher)

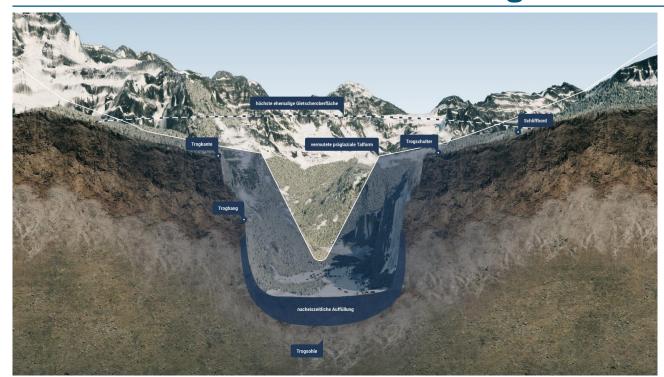
- Bei kaltem (glazialen) Klima bilden sich Gletscher, diese «fliessen», wie Flüsse, zu Tal, allerdings viel langsamer. Die Erosionsleistung von Gletschern kann sehr gross sein.
- Gletschererosion ist primär linear.
- Aus der Vergangenheit sind mehrere Eiszeiten bekannt, zum Teil mit einer weit ins Mitteland reichenden Vergletscherung (Last Glacial Maximum → LGM, Most Extensive Glaciation → MEG)
- Die letzte Vergletscherung (LGM) fand vor ca. 20 ka statt.
- In der nächsten Million Jahre ist mit einer oder mehreren ausgeprägten Kaltzeiten zu rechnen, in der die Gletscher wieder weit bis ins Alpenvorland vordringen können.





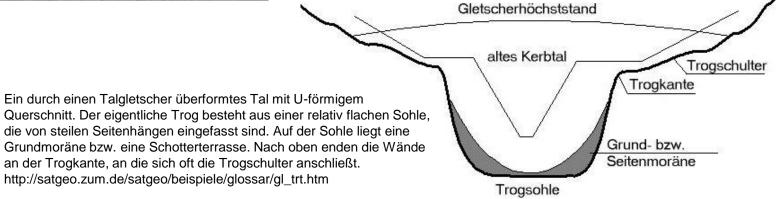


Erosion durch Gletscher - Trogtäler





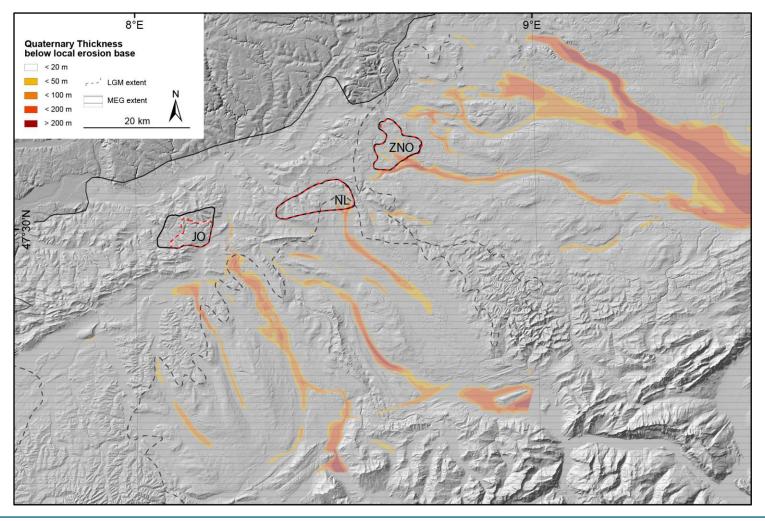
https://www.jungfrau.ch/de-ch/lauterbrunnen-tal-von-gletschern-geschaffen/





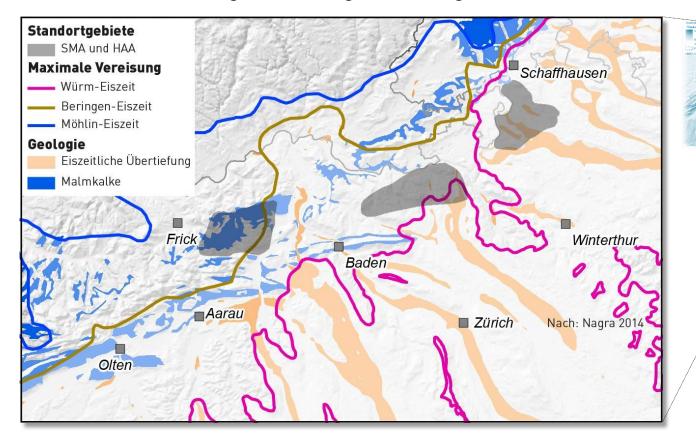
Erosionsrinnen der eiszeitlichen Gletscher

 Mit Lockergesteinen aufgefüllte übertiefte Felsrinnen (Erosionsrinnen) vergangener Eiszeiten in der Nordschweiz



Erosionsrinnen der eiszeitlichen Gletscher

Detailansicht Standortgebiete: Vergletscherung und Erosionsrinnen



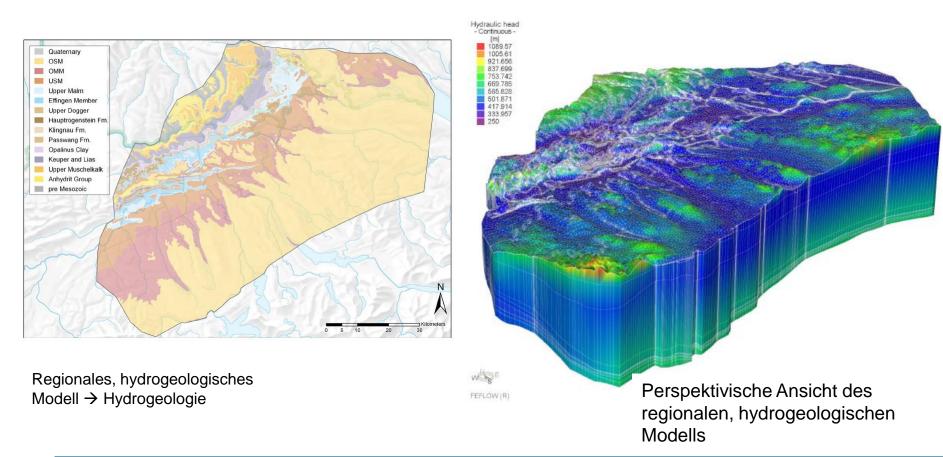


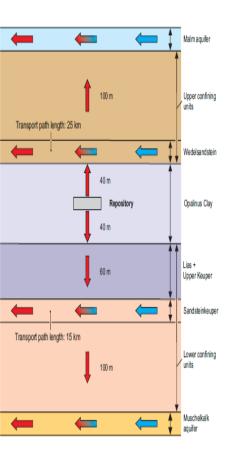
Je härter das Gestein, desto erosionsresistenter gegenüber Gletschern ist es (bsp. Malmkalke an den Rheinfällen)



Einfluss des Klimas auf die Hydrogeologie

- Die Hydrogeologie kann einen Einfluss auf die Transportrichtung der Nuklide haben
- Wenn das Infiltrationsgebiet «trocken» fällt (weniger/kein Niederschlag) oder deutlich mehr Wasser in die Aquifere infiltriert (mehr Niederschlag) kann es zu Änderungen der Exfiltrationsgebiete, der Verdünnungsrate und des hydraulischen Gradienten kommen.

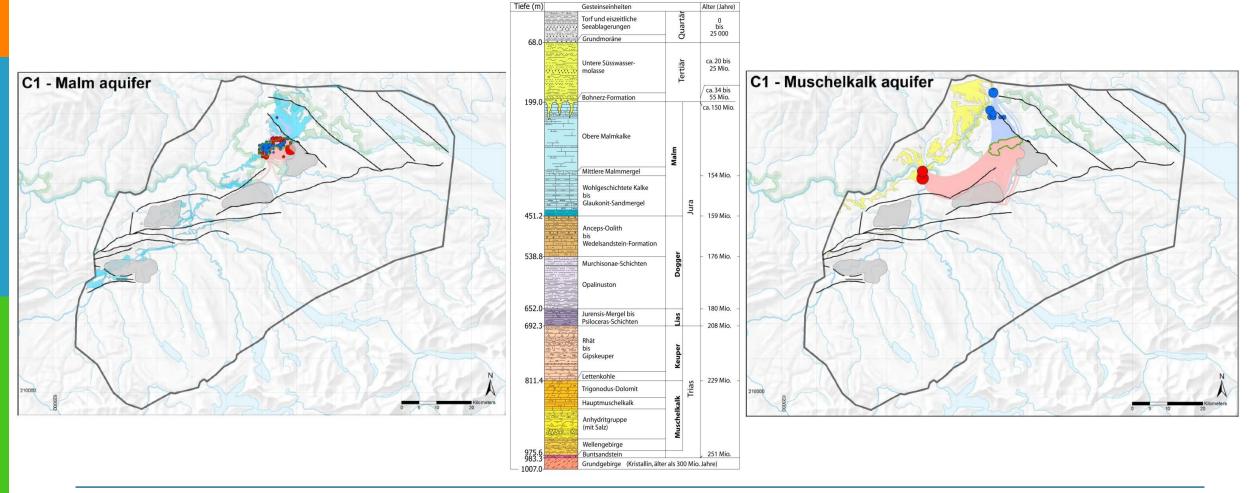






Infiltration und Exfiltration

Beispiel für Exfiltration (rot) und Infiltration (blau) im Untersuchungsgebiet



Schlüsselfragen für die zukünftige Klimaentwicklung

- Eiszeiten der geologischen Vergangenheit:
 - Welche Eiszeit(en) waren für die Anlage der übertieften Täler verantwortlich? Können solche Eiszeiten in Zukunft wieder auftreten, und wenn ja wann?
 - Wie waren die klimatischen und glaziologischen Verhältnisse während der Anlage der übertieften Täler?

Zukünftige Eiszeiten:

- Wann ist in Zukunft mit der nächsten Eiszeit/Vergletscherung zu rechnen (grösser als LGM)?
- Wann sind die n\u00e4chsten grossen/langen Eiszeiten (und damit einhergehend weitreichende Vergletscherungen) in Zukunft zu erwarten?
- Welchen Einfluss hat die CO₂-Konzentration?

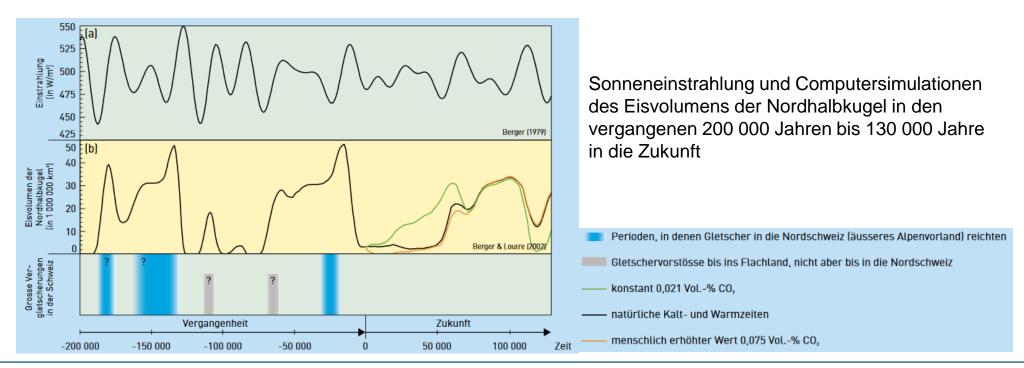
Alternative Klimaszenarien:

- Welchen Einfluss haben unterschiedliche CO₂-Szenarien auf zukünftige Klimata?
- Welche alternative Klimaszenarien (mit Relevanz für die Sicherheit des geol. Tiefenlagers) sind noch zu berücksichtigen?
- Welche Effekte werden diese alternativen Szenarien auf die Geosphäre und Biosphäre haben?



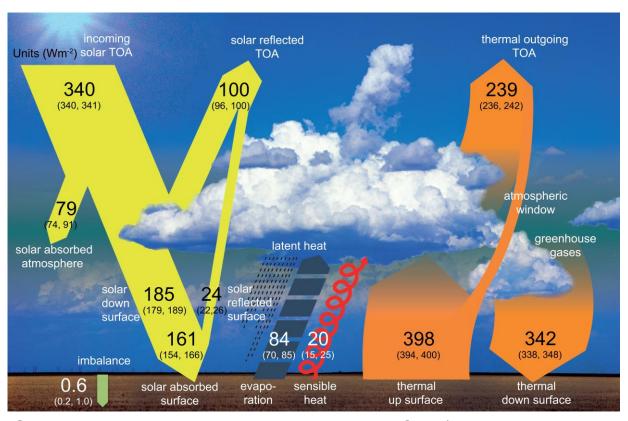
«Relevantes» Klima

- Die für die geol. Tiefenlagerung relevanten Klimata sind:
 - Eiszeiten/Vergletscherungen
 - Periglazial-Zeiten
 - Interglazial/Nicht-glazial (Warm und trocken, Warm und Nass, Temperiert/Kontinental)
- Diese Klimata haben alle einen grossen Effekt auf die Biosphäre (und damit den Dosisberechnungen) und die Geosphäre



Klimasimulationen

- Das Klima wird von einer grossen Anzahl unterschiedlicher (globaler) Faktoren beeinflusst (Orbitale Parameter, Emission von Treibhausgasen, Verteilung von Eisschilden, ...)
- Es gibt eine Menge unterschiedlicher Simulationstechniken um Klimasimulationen durchzuführen (EMICs, (AO)GCMs, RCMs, ESMs...)
- Die Limitation der Klimasimulationen muss transparent kommuniziert werden
- Die Haupttreiber des Klimas (zumindest global) sind Treibhausgasemissionen, orbitale Parameter und Verteilung von Eischilden



Globales Energiebudget der Erde aus heutiger Sicht/bei heutigem Klima. Zahlen geben ungefähr den Energiefluss in Watt pro m² (W/m²) an (inkl. Ungewissheiten in Klammern). (Aus IPCC AR5)



Aktivitäten bei der Nagra in Hinblick auf Klima(simulationen)

- Globale Klimasimulationen (A. Ganopolsky, PIK)
- Regionale/Lokale Klimasimulationen (C. Raible, Uni Bern (OCCR))
- Eisflusssimulationen (D. Cohen, New Mexico Tech, G. Jouvet, ETH Zürich)
- Verwandte Projekte: Literaturstudien von existierenden, regionalen (CH und Europa) Proxies,
 Bohrprogram in quartären Sedimenten, Studie über Erodierbarkeit etc.

Globale Klimasimulationen

Regionale/Lokale Klimasimulationen

Eisflusssimulationen

- Globales Klima während der Vergangenheit und Zukunft
- Lokale
 Klimaparameter

 Eisausdehnung, Erosionskapazität, Fliessgeschwindigkeit etc.



Globale Klimasimulationen-PIK

 Ziel dieses Projektes ist die Charakterisierung des global Klimas in der Vergangenheit Zukunft

Simulationen zum Begin der nächsten Eiszeit bei unterschiedlichen CO₂-Szenarien während der nächsten 100 ka.

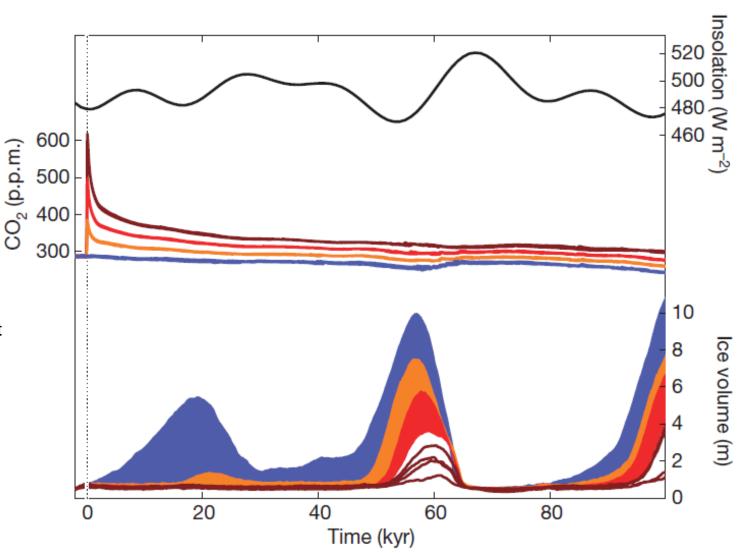
Oben: Insolation auf der nördlichen

Hemisphäre (65° N)

Mitte: CO₂-Konzentration

Unten: Simulierte Eismächtigkeiten

(Ganopolski et al., 2016)





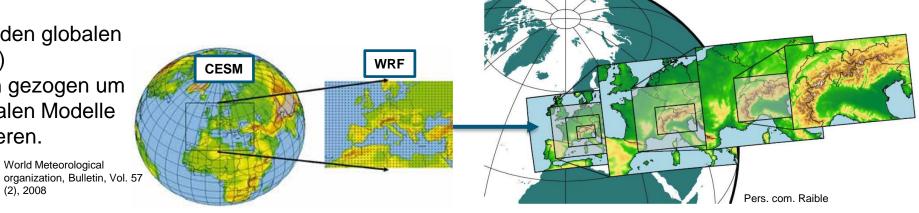
Regionale/Lokale Klimasimulationen - OCCR

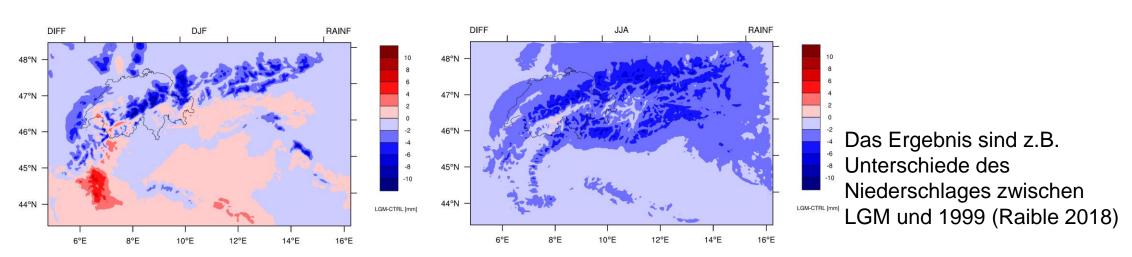
Ziel des Projektes ist die Charakterisierung des Alpinen Klimas während vergangenen und zukünftigen Eiszeiten

Dazu werden aus den globalen Simulationen (PIK) Randbedingungen gezogen um die regionalen/lokalen Modelle (OCCR) zu simulieren.

World Meteorological

(2), 2008

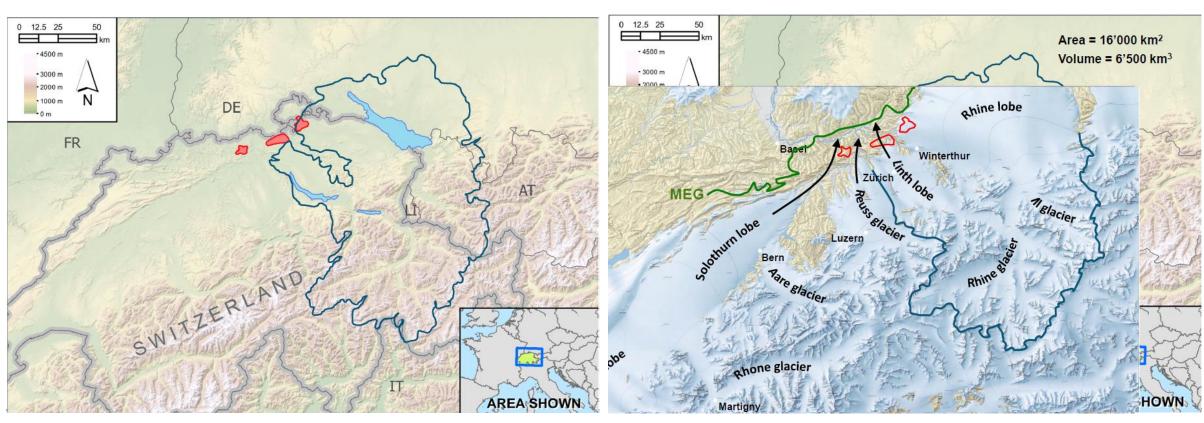






Eisflussmodellierungen

- Team: U. Fischer (Nagra), D. Cohen (CoSci LLC, New Mexico Tech), G. Jouvet (ETH Zürich), W. Haeberli (University Zürich)
- Ziel ist die Simulation der Gletscherausbreitung auf Grundlage verschiedener Klimaszenarien in der Vergangenheit und Zukunft



LGM Eisbedeckung während des LGM (von Bini et al., 2009)

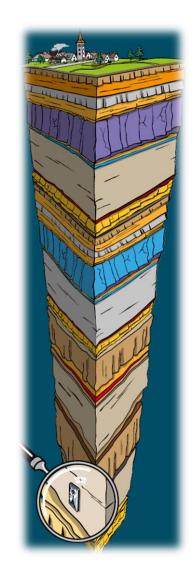


Zusammenfassung

- Biosphäre: Klimaveränderungen verändern den Lebensraum/ das Ökosystem
- Geosphäre: Klimaveränderungen können zu tiefgreifender Erosion führen → Die Lage des Tiefenlagers muss so gewählt werden, dass das Lager genügend lange vor Erosion und Dekompaktion geschützt ist.



 Die Charakterisierung möglicher klimatischer Veränderung in der Zukunft ist Teil der Sicherheitsüberlegungen der geologischen Tiefenlager





besten dank für ihre aufmerksamkeit

nagra.