

Kleine Teilchen, grosse Wirkung. Eigenschaften von Ton

Olivier X. Leupin

nagra.

Take home message

- Ton ist ein raffiniertes, natürliches Produkt mit faszinierenden Eigenschaften.



Gliederung des Vortrags

- **Einleitung:**
 - Ton ein vielseitiges Material
 - Was ist Ton?
 - Wie entsteht Ton?
- **Der Opalinuston – Wirtgestein der Nagra**
 - Wo entstand Opalinuston?
 - Die Eigenschaften von Opalinuston heute
- **Der Bentonit – das vorgesehene Verfüllmaterial**
 - Ein anderes relevantes Tonmaterial: Bentonit
 - Die Rolle von Ton im Schweizer Lagerkonzept
- **Warum eigentlich Ton?**
 - Die sicherheitsrelevante Eigenschaften von Ton
 - Die Struktur von Ton definiert dessen Eigenschaften
 - Wieso können gewisse Tone Wasser aufnehmen und dadurch einen Quelldruck aufbauen?
 - Selbstabdichtung im Opalinuston
 - Hydraulische Durchlässigkeiten (Leitfähigkeit)
 - Wieso können Tone Nuklide adsorbieren?
- **Internationale Tonforschung**
 - Ein Blick über die (räumliche) Grenze

Ton: ein vielseitiges Material

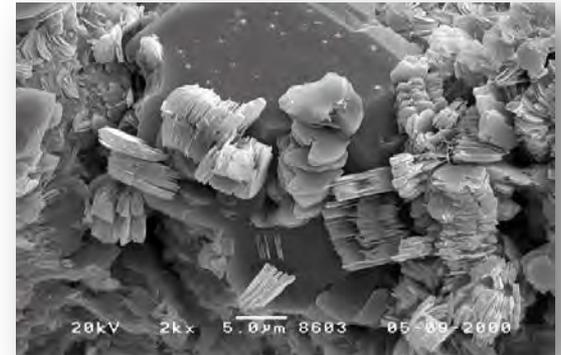
- Ton gehört zu den am **frühesten entdeckten Rohstoffe**.
- Tone werden heute in der Hochleistungskeramik, in der Medizin, in der Nahrungsmittelindustrie, in der Metallverarbeitung etc. verwendet.
- Tone sind überall: Die “clay-life hypothesis” geht sogar so weit, dass sie Ton als Elementarbaustein von Leben definiert...¹



¹CAIRNS-SMITH A.G. & HARTMAN H. (Editors) *Clay Minerals and the Origin of Life*. Cambridge University Press, Cambridge, England, 1986

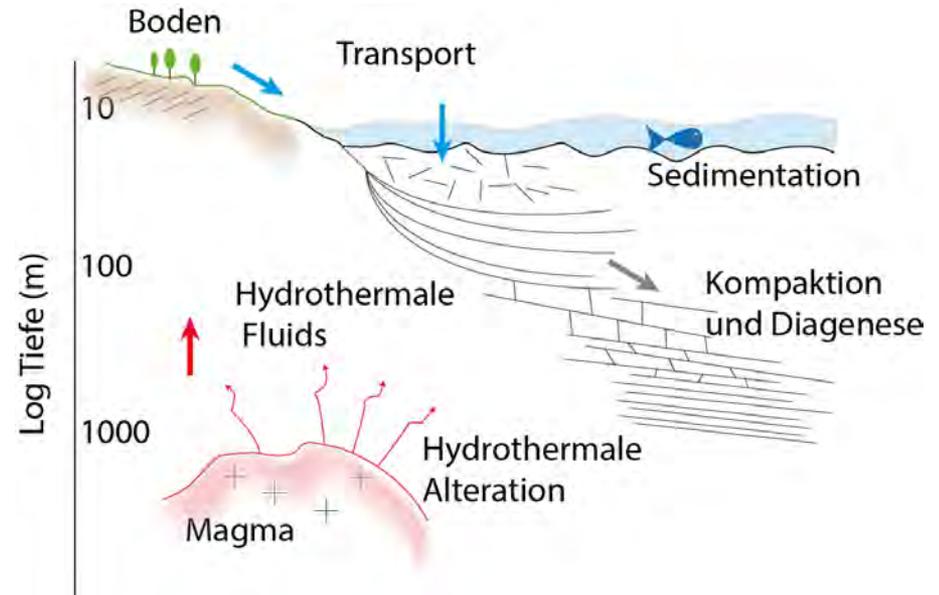
Was ist Ton?

- Tone sind Minerale, welche durch die **Verwitterung** von anderen Mineralen entstehen.
- Tonminerale sind **schichtweise aufgebaut** - aus einer Wiederholung elementarer Strukturen.
- Da **Tonminerale sehr klein** sind ($< 2\mu\text{m}$) werden sie über sehr lange Distanzen transportiert (Fluss, Wind, Gletscher etc.)
- Dort, wo diese Tonminerale abgelagert werden, entstehen im Laufe der Jahre Tongesteine.



Wie entsteht Ton?

- Die Bildung von Tongesteinen ist immer oberflächennah.
- Tonminerale sind temperaturempfindlich: bei Temperaturen von 200°C über längere Zeit sind sie nicht mehr stabil



- Die Menge und Art des sich bildenden Tongesteins hängt unter anderem ab von
 - der Zusammensetzung des Ursprungsgesteins
 - der Wasser-Gesteinswechselwirkungen
 - der Temperatur und
 - der Dauer der Diagenese¹

¹ Unter dem Begriff «Diagenese» verstehen wir den geologischen Prozess der zur Verfestigung von Lockersedimenten (wie Schlamm) führt.

Wie und wo entstand Opalinuston?

- Opalinuston wurde vor etwa 174 Millionen Jahren in einem flachen Meer abgelagert.
- Grossräumige Sedimentbecken erlauben mächtige Ablagerungen über weite Distanzen, dadurch ist der Opalinuston über **weite Distanzen sehr homogen aufgebaut**.
- Die Ablagerung dieser feinen Sedimentpartikel führt zu einem **mikroporösen Gefüge** und einer **sehr tiefen Permeabilität**.



Die Eigenschaften von Opalinuston heute

Mineralgruppe / Eigenschaft	Mineral	Menge
Tonminerale (nicht quellfähig)	Illit, Chlorit, Kaolinit	55 Gew%
Tonminerale (quellfähig)	Smektit	10 Gew%
Andere Minerale	Quartz	20 Gew%
	Kalzit	10 Gew%
	Feldspäte, Siderit, Dolomit, Ankerit, Pyrit	5 Gew%
Organisches Material		0.2 Gew%
Porosität		11-18 %
Hydraulische Durchlässigkeit		$\leq 5 \cdot 10^{-13}$ m/s
Mineralisation des Porenwassers (TDS)		5-20 g/L

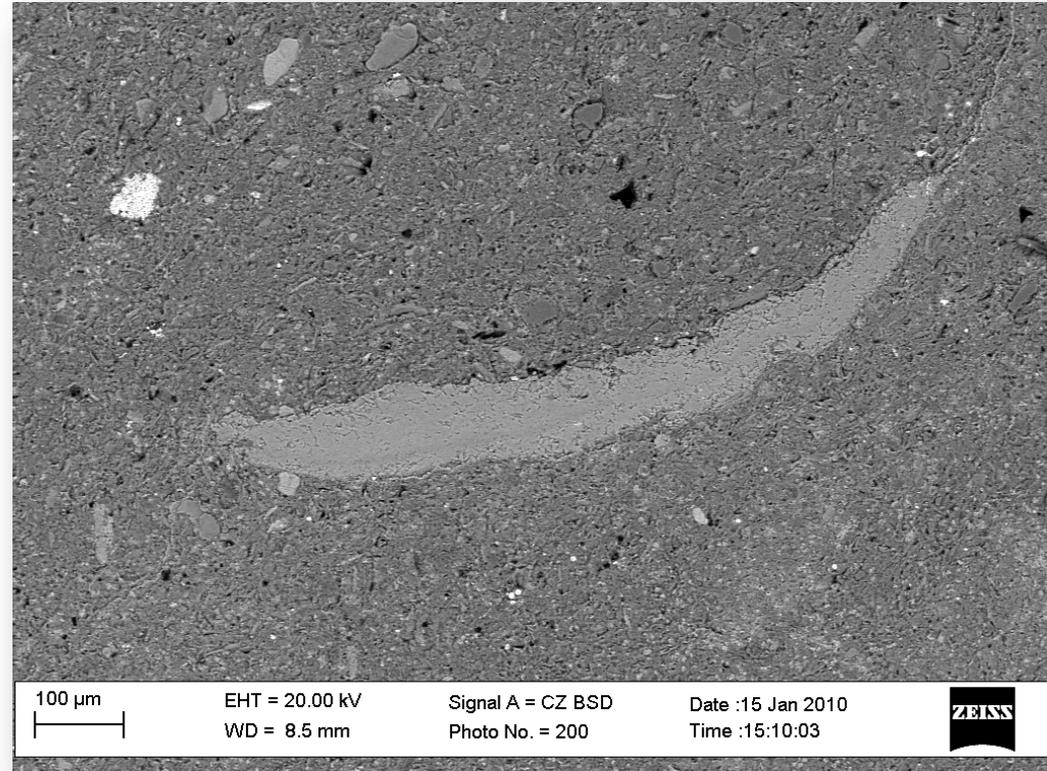


Abbildung freundlicherweise zur Verfügung gestellt von Andreas Jenni, Universität Bern

Bentonit – das vorgesehene Verfüllmaterial

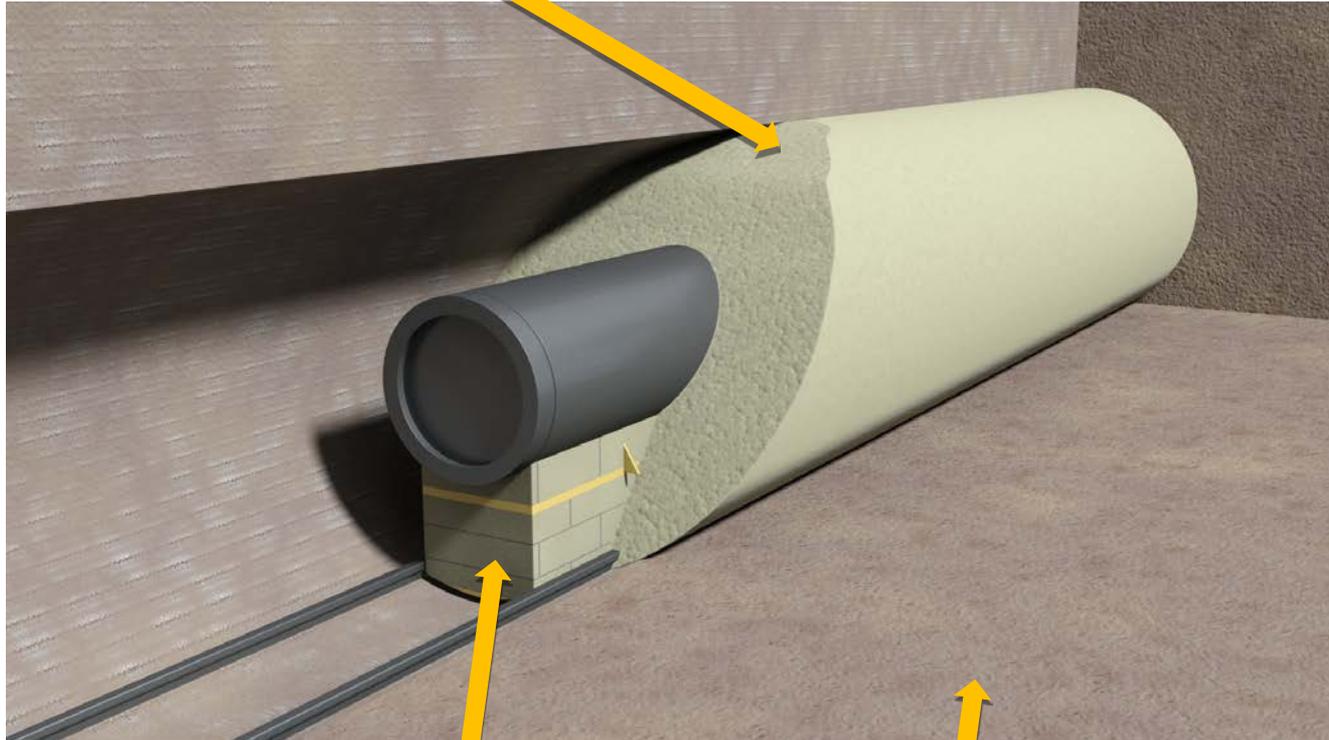
- Bentonit spielt als Verfüllmaterial in den Entsorgungsprogrammen vieler Länder eine wichtige Rolle – auch in der Schweiz
- Bentonit ist ein Oberbegriff für tonreiches Gestein aus umgewandeltem, vulkanischem Glas, das **reich an quellfähigem Montmorillonit** ist.
- Bentonit findet Verwendung unter anderem:
 - Bergbau- und Bohrtechnik
 - Lebensmittelzusatz (E558)
 - Gartenteiche
 - Kosmetik, Pharmazie
 - Keramik
 - Weinproduktion
 - Gießerei-, Papier- und Waschmitteladditive
 - Abwasserbehandlung
 - Lacke und Farben
 - Nanotechnologie – Oberflächenbeschichtungen
 - Trocknungsmittel, z.B. als Trockenbeutel in Verpackungen
 - etc.

(Quelle Wikipedia)



Die Rolle von Ton im Schweizer Lagerkonzept

Das Nahfeld ist verfüllt mit Bentonit (quellfähiger Ton)

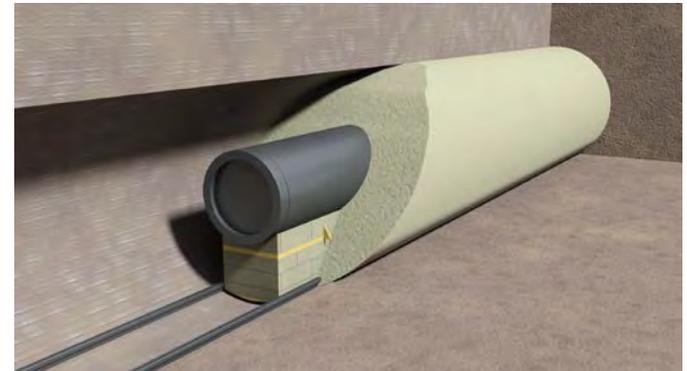
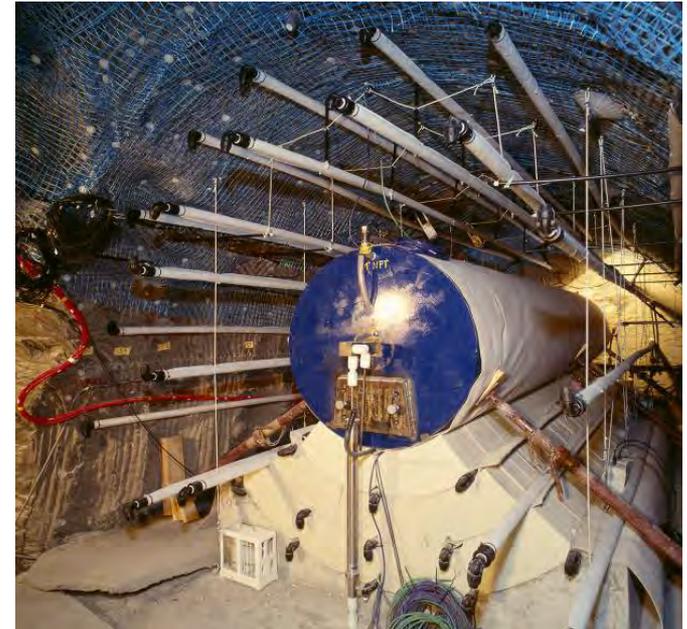


Der Behälter liegt auf einem Auflager aus kompaktierten Bentonitblöcken (quellender Ton)

Das Wirtsgestein ist für das Lager für hochaktiven Abfall Opalinuston

Warum Ton?: Sicherheitsrelevante Eigenschaften

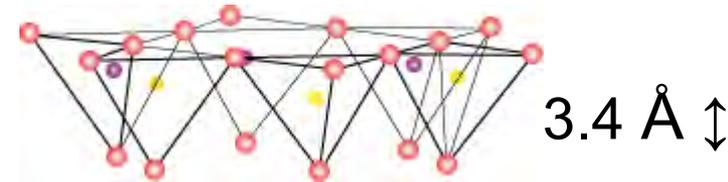
- Opalinuston (als Wirtgestein)
 - Fähigkeit zur Selbstabdichtung (u.a. durch Quell- und Kriechvermögen)
 - Sehr geringe Wasserdurchlässigkeit (Transport ist nur diffusionsdominiert)
 - Hohe Sorptionskapazität für Radionuklide
 - Aber:
 - Bautechnisch anspruchsvoll
 - Niedrige Gasdurchlässigkeit
- Bentonit (zur Verfüllung und Versiegelung der Lagerkammern)
 - Hohes Quellvermögen
 - Bei voller Sättigung sehr geringe Wasserdurchlässigkeit (Transport limitiert durch Diffusion)
 - Sehr hohe Sorptionskapazität für Radionuklide
 - Langzeitstabilität als natürliches Tonmaterial
 - Aber:
 - Wärmeempfindlich bei hohen Temperaturen



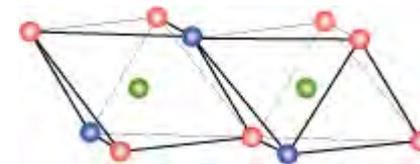
Die Struktur von Ton definiert dessen Eigenschaften

- Tone bestehen aus sich **wiederholenden strukturelle Einheiten**: Tetraeder und Oktaeder
- Diese Einheiten sind zu Schichten verbunden, die sich wiederholen
- Die **Art der Schicht-Wiederholung** definiert das Mineral
- Kationen dienen in den sogenannten Zwischenschichten zum Ladungsausgleich

Tetraeder-Schicht



Oktaeder-Schicht



Kationen

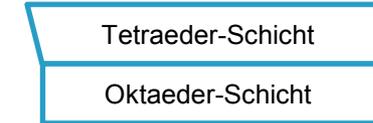


Die Struktur von Ton definiert dessen Eigenschaften

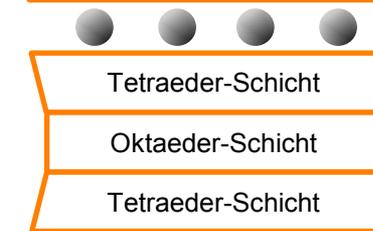
- 7Å: Kaolinit



- 10Å: Glimmer, Talk, Illit, Smektit (Bentonit)



-> Quellende Minerale!

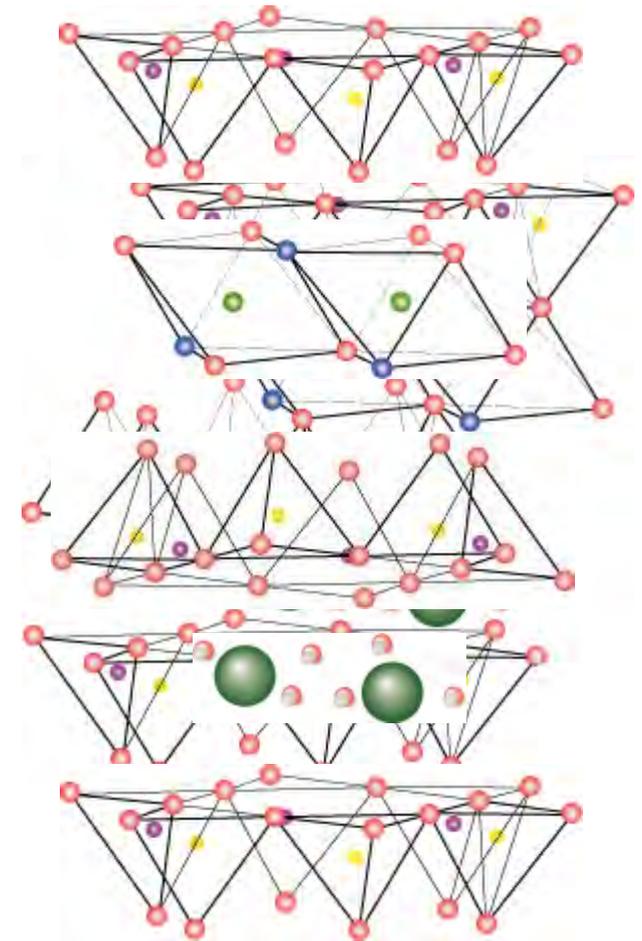


- 14Å: Chlorit



Die Struktur von Ton definiert dessen Eigenschaften

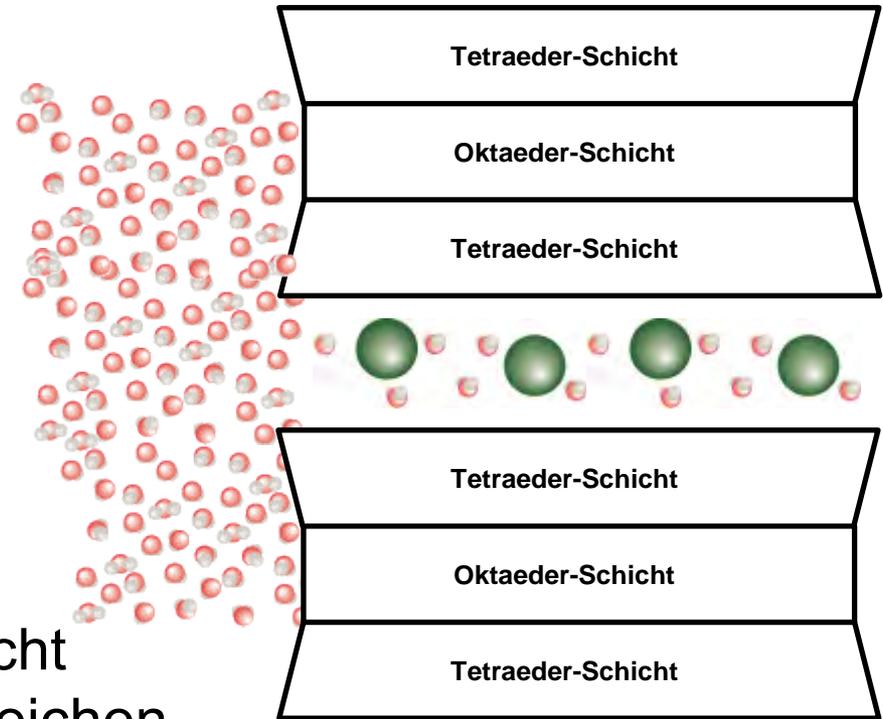
- Und so fügen sich die verschiedenen Einheiten zum Beispiel zu einem Montmorillonit Mineral (Bentonit):



Modified from Grim, 1962

Wieso können gewisse Tone Wasser aufnehmen und dadurch einen Quelldruck aufbauen?

- Gewisse Tone (Smektite) können Wasser aufnehmen und dadurch quellen.
- Der Grund sind osmotische Wasserflüsse, die durch die Zwischenschichtenkationen und dem Porenwasser entstehen.
- Die Quelldrucke können mehrere MPa (1 MPa entspricht 100 Metern Wassersäule) erreichen
- Das Aufnehmen von Wasser ist ein reversibler Prozess



Selbstabdichtung im Opalinuston

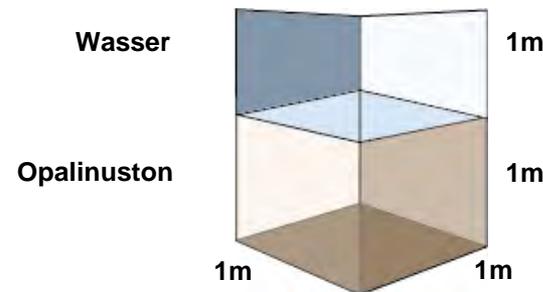
- Selbstabdichtungsvermögen ist die Fähigkeit Brüche und Risse im Gestein bei Wasserzutritt selbständig abzudichten.
- Dies führt zu einer sehr kleinen Wasserdurchlässigkeit auch in Störungszonen oder in der Auflockerungszone um Stollen.
- Selbstabdichtung von Tongesteinen ist auf verschiedenartige physikalische und chemische Prozesse und Mechanismen zurückzuführen. (z. Bsp. Mineralausfällungen, Quellen, Kriechprozesse etc.)
- Es konnte gezeigt werden, dass die Selbstabdichtung auf Skalen von mm bis m funktioniert.



Main fault in FMT (COMET)

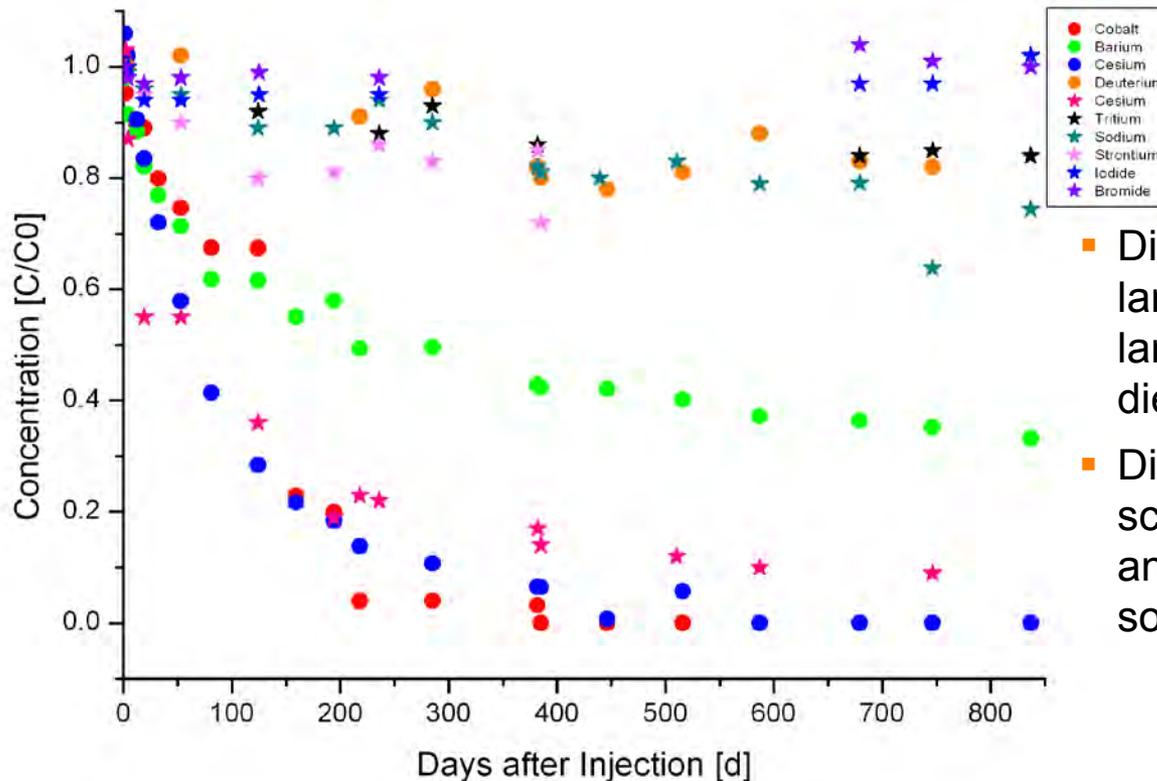
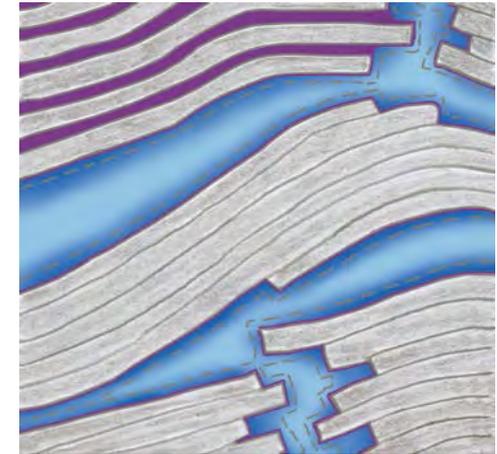
Hydraulische Durchlässigkeiten (Leitfähigkeit)

- **Wasserdurchlässigkeit (kf- od K-Wert) nach DIN 18130:**
- sehr stark durchlässig $>10^{-2}$ m/s *reiner Kies*
- stark durchlässig 10^{-2} bis 10^{-4} m/s *sandiger Kies*
- durchlässig 10^{-4} bis 10^{-6} m/s *mittel- bis feinkörniger Sand*
- schwach durchlässig 10^{-6} bis 10^{-8} m/s *toniger Silt (dt. Schluff)*
- sehr schwach durchlässig $< 10^{-8}$ m/s *Ton (siltig, sandig)*
- Böden mit einer Durchlässigkeit von $< 10^{-9}$ m/s sind nahezu völlig wasserundurchlässig
- Die Durchlässigkeit des Opalinuston ist $<10^{-12}$ m/s - in Tiefen von mehreren hundert Metern meist $< 10^{-13}$ m/s
- 1000 Liter Wasser würden ca. 48'000 Jahren brauchen um durch 1m^3 Opalinuston durchzusickern.



Wege der Diffusion

- Da die hydraulische Durchlässigkeit von Ton sehr tief ist, bewegen sich Nuklide hauptsächlich über Diffusion durch Poren.
- Diffusion ist ein sehr langsamer Prozess, der zum wirksamen Einschluss von Nukliden beiträgt.



- Die Diffusion von Anionen ist sehr langsam. Diese bleiben entsprechend lange in der zirkulierenden Lösung dieses Diffusionsexperiments.
- Die Diffusion der Kationen ist nur scheinbar schneller, da Kationen stark an die Oberfläche der Tonminerale sorbieren.

Wieso können Tone Nuklide adsorbieren?

- Adsorption ist die Akkumulation von Stoffen an der Ton-Wasser Grenzfläche.
- Die Oberfläche von Tonen ist meistens negativ geladen, daher **sorbieren Kationen sehr gut**.
- Tone haben wegen ihrer **riesigen Oberfläche eine hohe Sorptionskapazität** und daher werden Schadstoffe sehr effizient zurückgehalten: OPA ca. 100 m²/g und Bentonit ca. 600 m²/g

Adsorbierte Kationen können ausser- und innersphärische Oberflächenkomplexe bilden

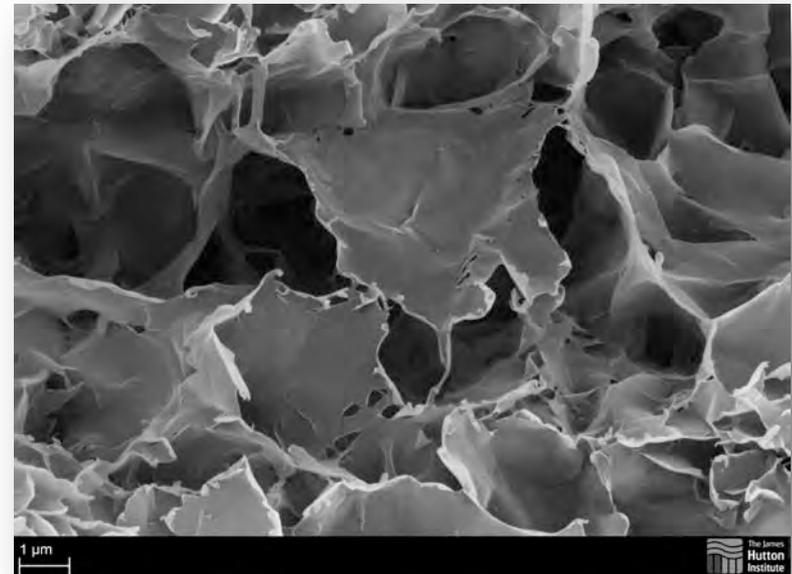
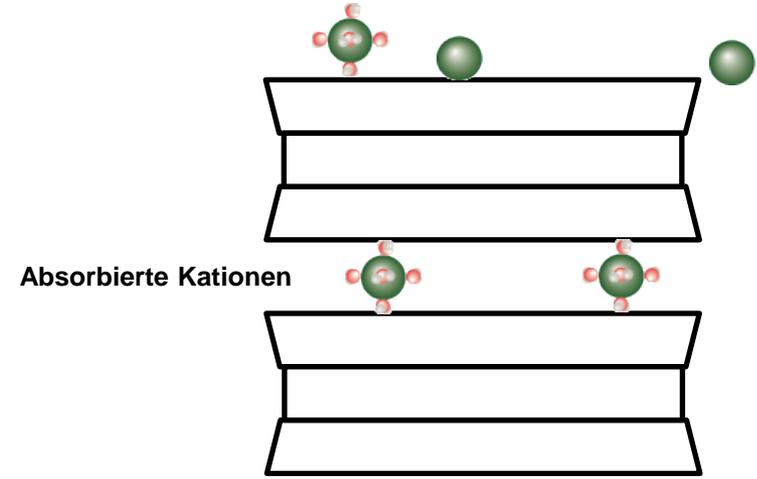


Image reproduced from the 'Images of Clay Archive' of the Mineralogical Society of Great Britain & Ireland and The Clay Minerals Society

Ein Blick über die (räumliche) Grenze

- Tonprogramme und Felslabors in anderen Ländern:



Ein Blick über die (zeitliche) Grenze

- Kleine Teilchen, grosse Wirkung: In der Landwirtschaft verlässt man sich seit Jahrtausenden auf die Kationenaustauschkapazität der Tone im Boden, die es erlaubt, Stickstoff, Phosphat und andere Spurenelemente aus dem Dünger zu binden, und weiss, diese Eigenschaft des Tones durch Pflügen zu reaktivieren.



Circa. 1200 BCE; Burial chamber of Sennedjem, Scene: Plowing farmer.

**Vielen Dank für Ihre
Aufmerksamkeit!**

nagra.