



Agenda

- 17.00 Uhr Begrüßung, Vorstellung der Referent*innen und Einführung
Oliver Helten, Planungsteam Forum Endlagersuche (PFE)
Abfrage: Wer ist hier? (Mentimeter)
- 17.15 Uhr Tonsteine – wie sie sich bilden und
warum sie als Wirtsgesteine in Betracht gezogen werden
Stephan Kaufhold und Jochen Erbacher (BGR)
- 18.00 Uhr Fragen und Diskussion
- 18.30 Uhr Diagenese von Tonsteinen – mineralogische und geotechnische Bedeutung
Lawrence N. Warr (Universität Greifswald)
- 19.15 Uhr Fragen und Diskussion
- 19.50 Uhr Graphic Recording und Schlussworte
- 20.00 Uhr Ende der Veranstaltung

Junge und alte Tone in der Endlagersuche“

Diagenese von Tonsteinen – mineralogische und geotechnische Bedeutung

Laurence N. Warr.

Institute für Geographie und Geologie
Universität Greifswald

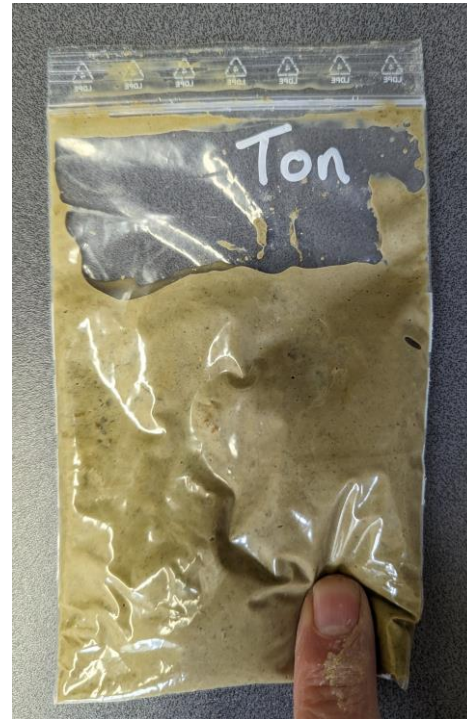
UNIVERSITÄT GREIFSWALD
Wissen lockt. Seit 1456



Ton:

Ton ist ein natürlich vorkommendes, vorwiegend anorganisches Material, das hauptsächlich aus **Tonmineralen** besteht, bei ausreichenden **Wassergehalten** generell **plastisch verformbar** ist und spröde wird, wenn es getrocknet oder gebrannt wird (AIPEA Definition)

[https://de.wikipedia.org/wiki/Ton_\(Bodenart\)](https://de.wikipedia.org/wiki/Ton_(Bodenart))



plastisch wenn nass



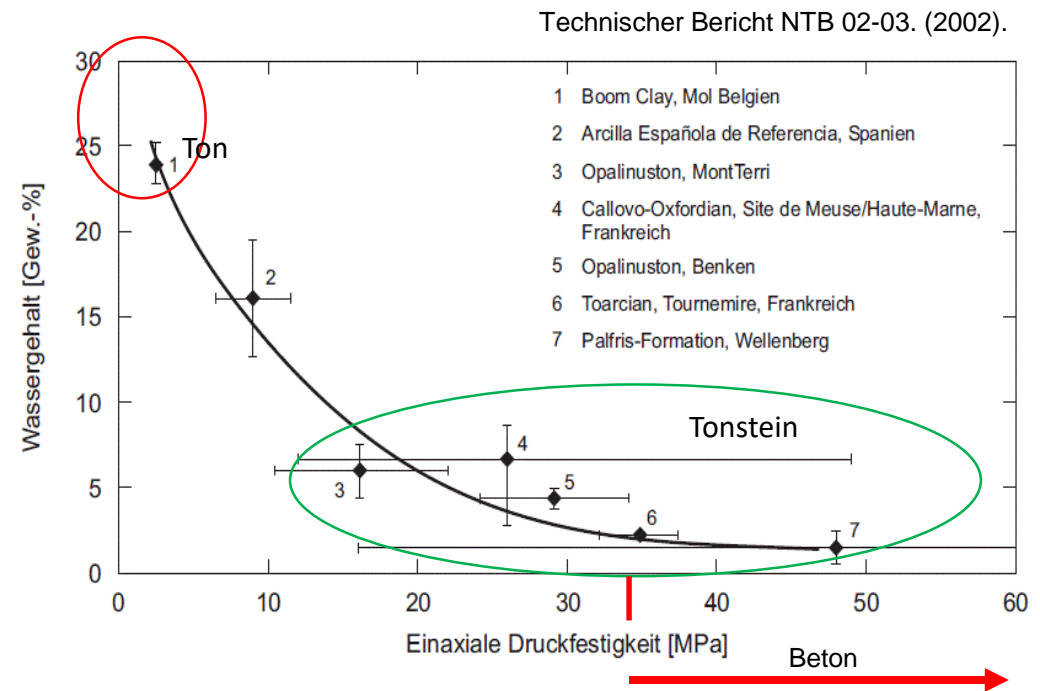
spröde wenn getrocknet

Tonstein:

Ein feinkörniges Sedimentgestein, das größtenteils aus hydratisierten Alumosilikatmineralen (Tonmineralen) besteht.



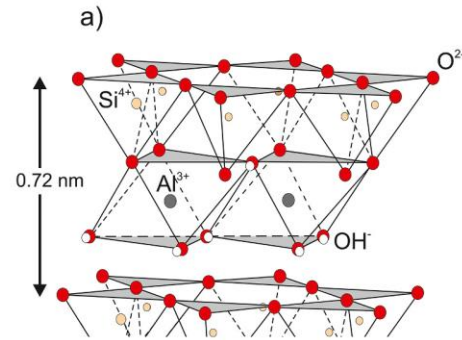
Bleibt fest wenn nass



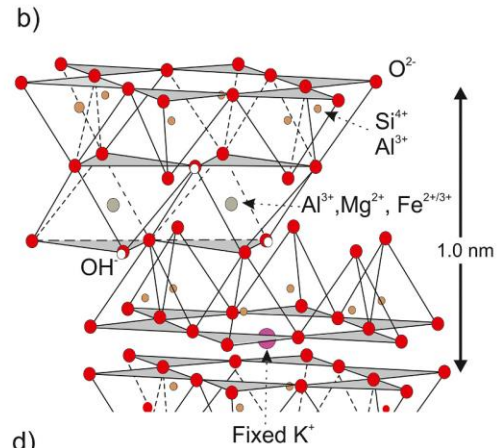
Druckfestigkeit

Tonmineralen: 4 Hauptgruppen

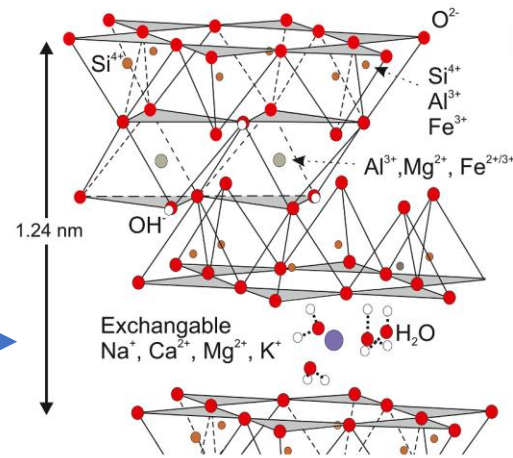
Kaolinit 1:1 Gruppe



Illit 2:1 Gruppe

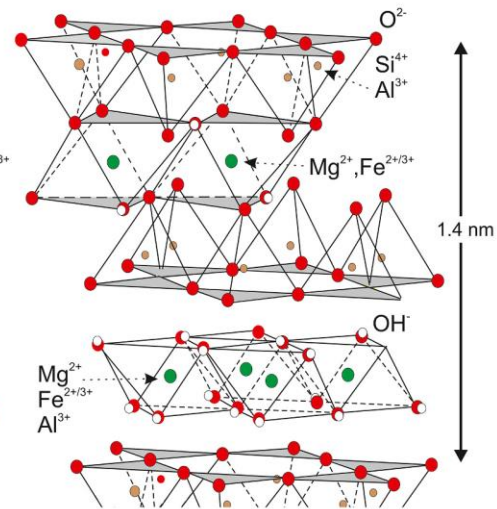


c)



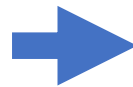
Smektit 2:1 Gruppe

d)



Chlorit 2:1:1 Gruppe

Quellfähigkeit
+
Kationenaustauschkapazität
in
schwach geladenen
„Zwischenschichten“





Die fünf „magischen“ interaktiven Eigenschaften der Tonminerale

1

Große spezifische Oberfläche
Typischerweise 10 – 136 m²/g
(basierend auf N₂ Adsorption)



EIGENSCHAFTEN



Die fünf „magischen“ interaktiven Eigenschaften der Tonminerale

1

Große spezifische Oberfläche
Typischerweise 10 – 136 m²/g
(basierend auf N₂ Adsorption)

2

Negativ geladene Oberflächen
und geladene Kanten (pH-abhängig).
Guter Adsorber und Puffer.



EIGENSCHAFTEN



Die fünf „magischen“ interaktiven Eigenschaften der Tonminerale

1 Große spezifische Oberfläche
Typischerweise 10 – 136 m²/g
(basierend auf N₂ Adsorption)

2 Negativ geladene Oberflächen
und geladene Kanten (pH-abhängig).
Guter Adsorber und Puffer.



3 Kationenaustauschkapazität
zwischen 3-210 cmol(+)/kg



Die fünf „magischen“ interaktiven Eigenschaften der Tonminerale

1

Große spezifische Oberfläche
Typischerweise 10 – 136 m²/g
(basierend auf N₂ Adsorption)

2

Negativ geladene Oberflächen
und geladene Kanten (pH-abhängig).
Guter Adsorber und Puffer.

EIGENSCHAFTEN

3

Kationenaustauschkapazität
zwischen 3-210 cmol(+)/kg

4

Quellvermögen
durch Adsorption von Wasser
in Zwischenschichten.
Erzeugt Drücke(<14 MPa).
z.B. Smektit.



Die fünf „magischen“ interaktiven Eigenschaften der Tonminerale

1

Große spezifische Oberfläche
Typischerweise 10 – 136 m²/g
(basierend auf N₂ Adsorption)

2

Negativ geladene Oberflächen
und geladene Kanten (pH-abhängig).
Guter Adsorber und Puffer.

5

Sehr geringe Durchlässigkeiten
Typischerweise <10⁻¹⁰ m/s
Macht hervorragende Abdichtungen
in kompaktierter Form

EIGENSCHAFTEN

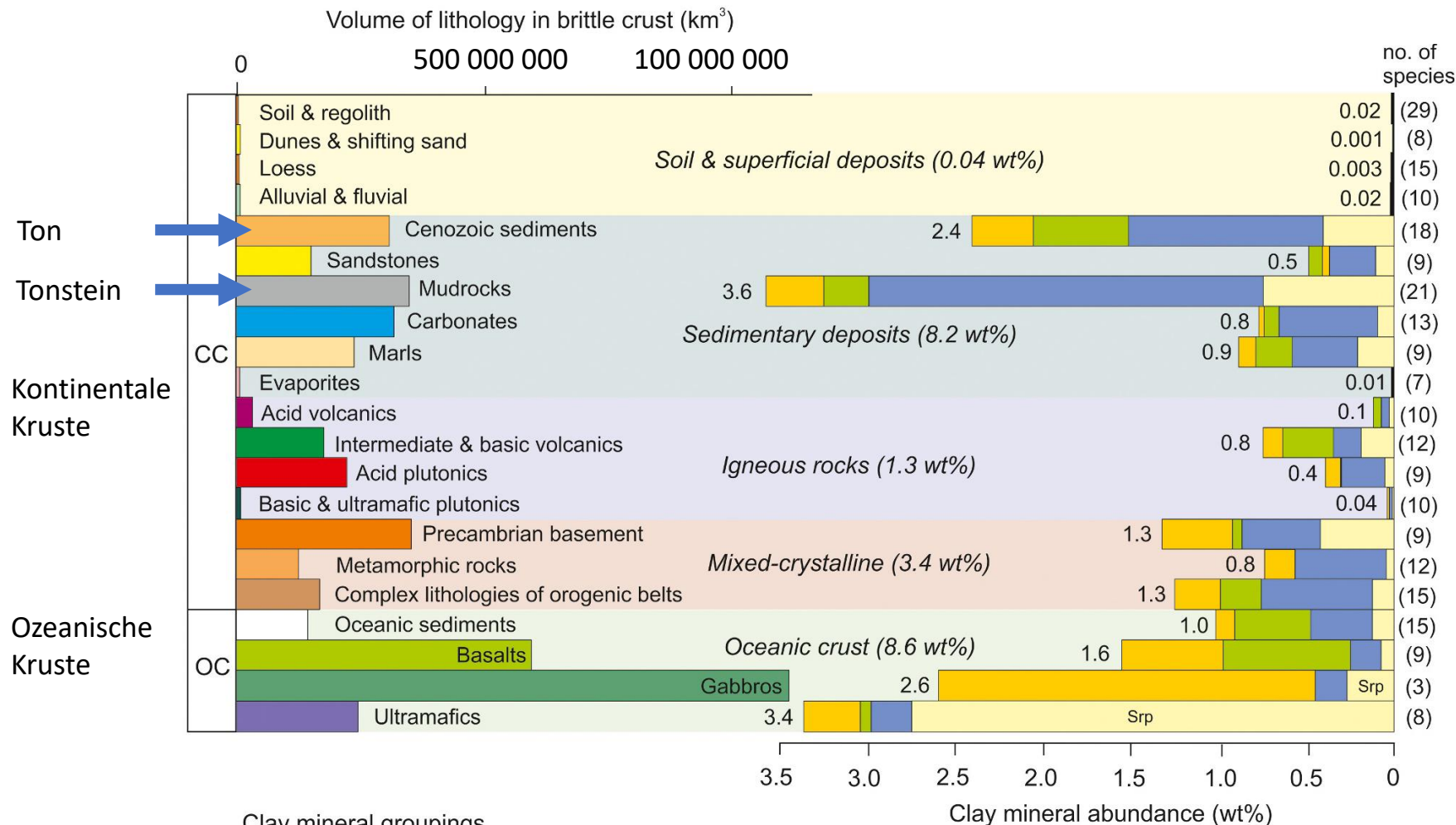
3

Kationenaustauschkapazität
zwischen 3-210 cmol(+)/kg

4

Quellvermögen
durch Adsorption von Wasser
in Zwischenschichten.
Erzeugt Drücke(<14 MPa).
z.B. Smektit.

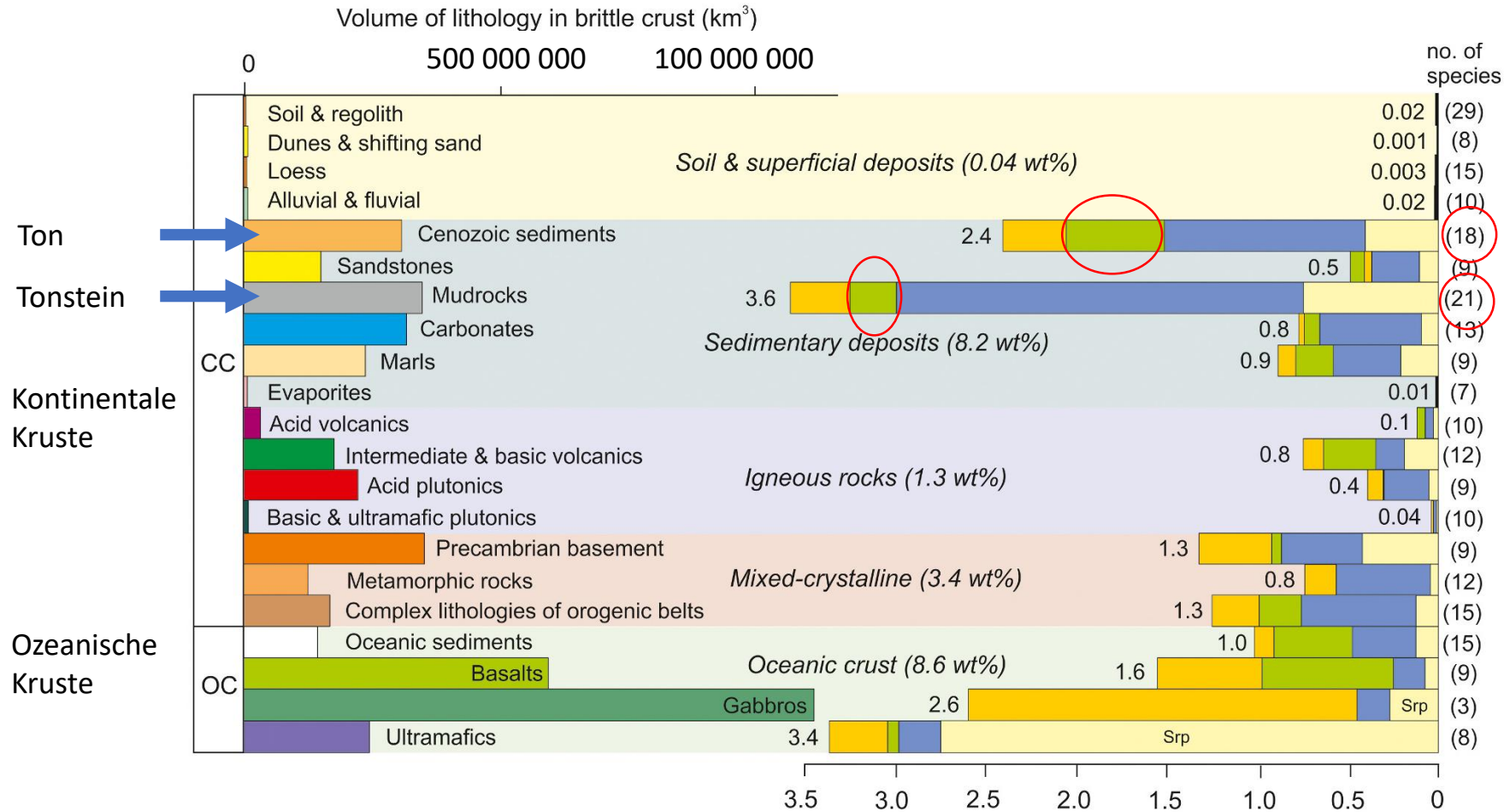
Lithologie und Tonmineralogie der brüchigen Erdkruste



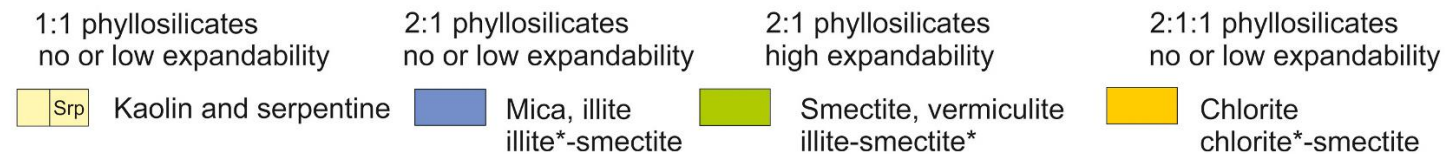
Tonstein (11,4% Landoberfläche) = ca. 359 302 437 km³

Deutschland max. 100 000 km³

Lithologie und Tonmineralogie der brüchigen Erdkruste

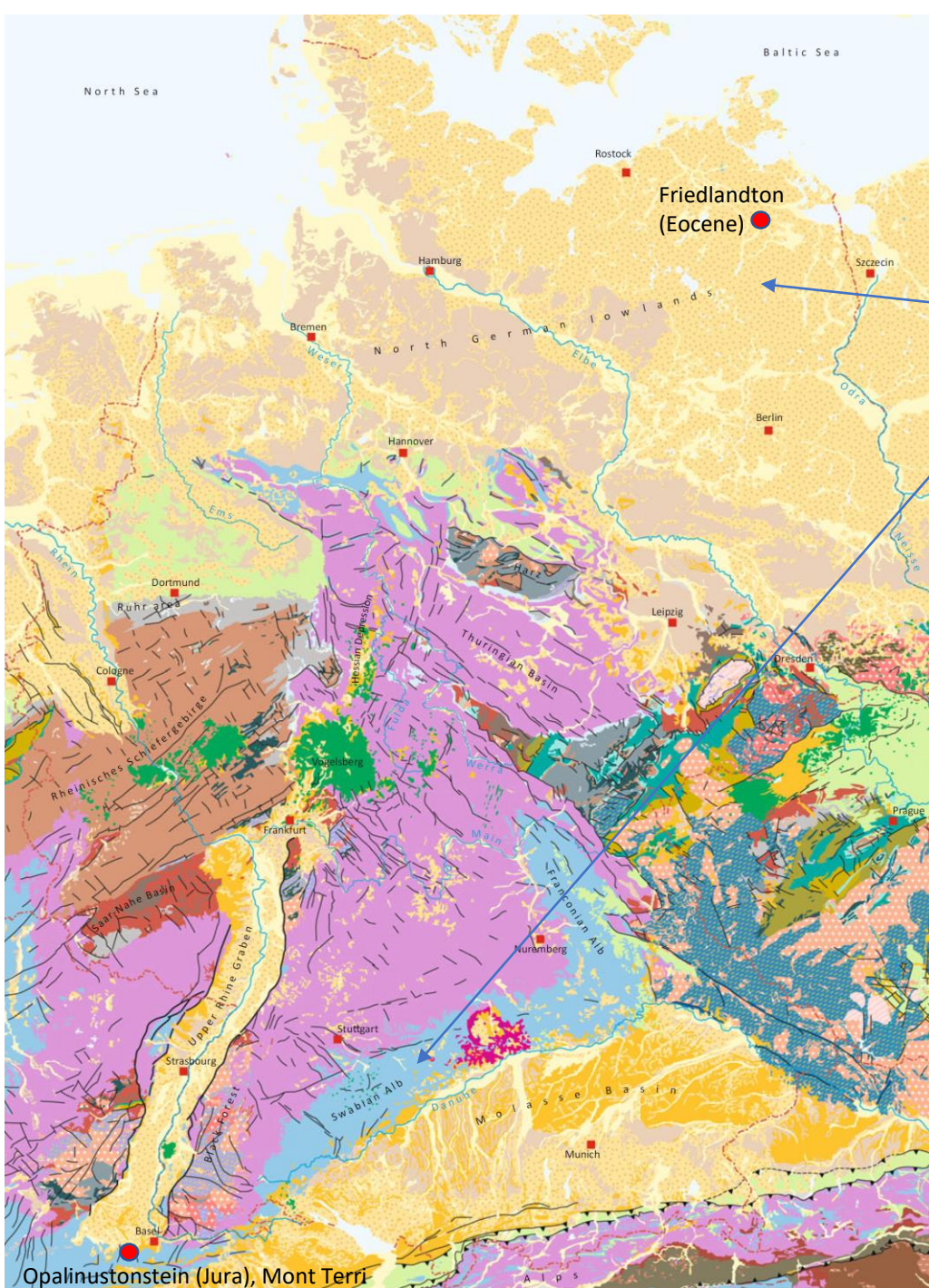


Clay mineral groupings



Tonstein (11,4% Landoberfläche) = ca. 359 302 437 km³

Deutschland max. 100 000 km³



Geological map of Germany and surrounding areas

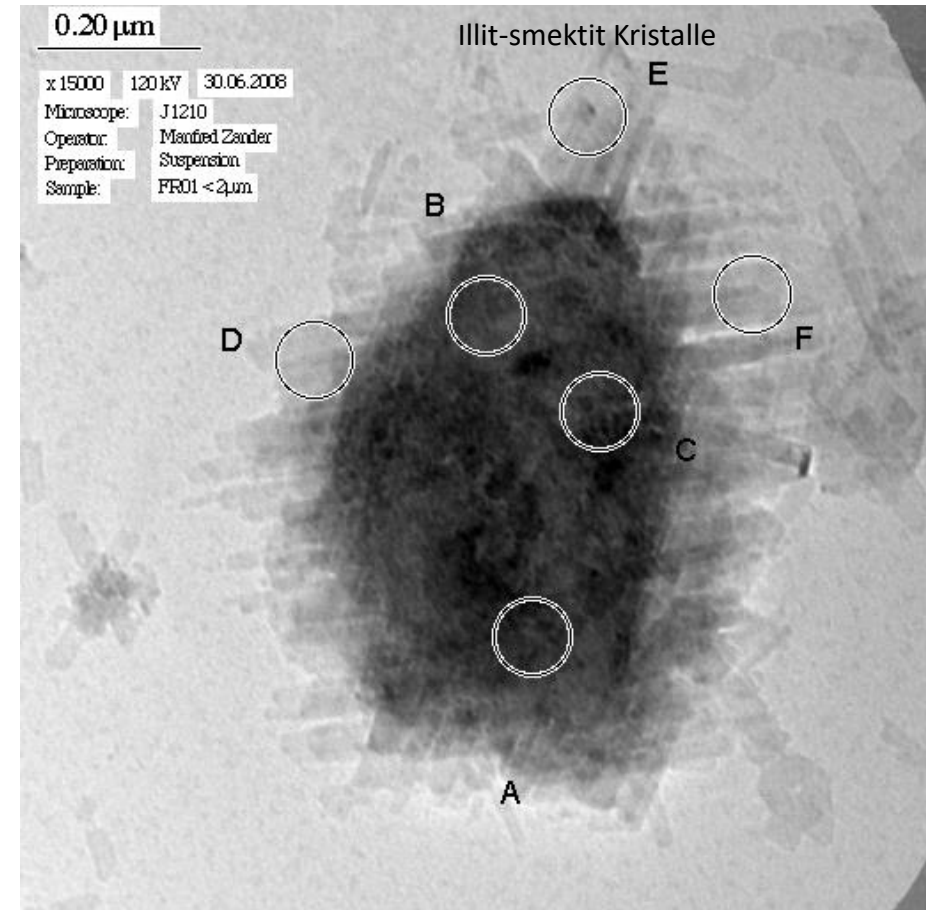
simplified after the 1 : 1.000.000 geological map of the Federal Republic of Germany, BGR, 1993



- Holocene
 - Late Pleistocene, deposits of the Vistula resp. Riss glaciation
 - Middle and Early Pleistocene, deposits of older glacial periods
- } Quaternary
- sedimentary rocks
 - volcanics
 - Cretaceous
 - Jurassic
 - Triassic
- } Tertiary
- Zechstein
 - Rotliegend
 - Rotliegend volcanics
 - Late Carboniferous
 - Early Carboniferous
 - Devonian
 - Silurian
 - Ordovician
 - Cambrian
 - Precambrian
- } Permian
- } Carboniferous
- Pre-Mesozoic volcanics (Precambrian to Carboniferous)
 - Variscan intrusive rocks (granite, granodiorite, gabbro)
 - Cadomian intrusive rocks (granite, granodiorite, gabbro)
 - Variscan metamorphic rocks
 - Early Paleozoic metamorphic rocks
 - granulite
- Permian to Skythian, Austroalpine
 - Paleozoic rocks of the Graywacke Zone, Austroalpine
 - metamorphic rocks
 - orthogneiss
- } crystalline basement of the Tauern Window, Penninic
- fault
 - nappe thrust
 - national border
 - river
- 100 km

Opalinustonstein (Jura), Mont Terri

Eozäner Friedlandton (M-V)



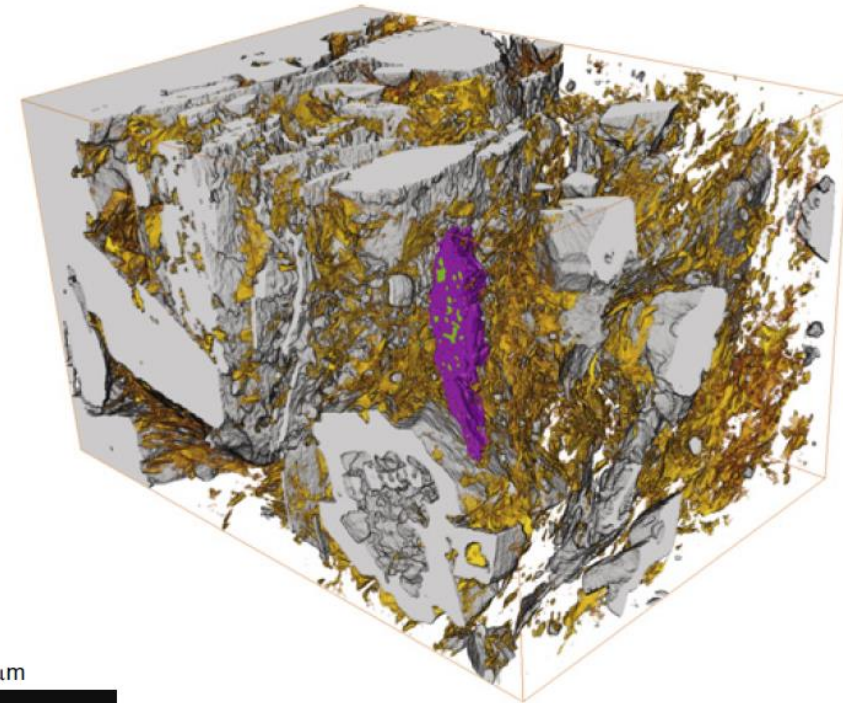
ca. 21 % Smektitgehalt

30% Illit-Smektit Wechsellagerung (30% Illit und 70% Smektit) von Dietel et al. (2017)

Jurassischer Opalinustonstein (Mont Terri, Schweiz)



<https://nagra.ch/>



Keller et al. (2013)

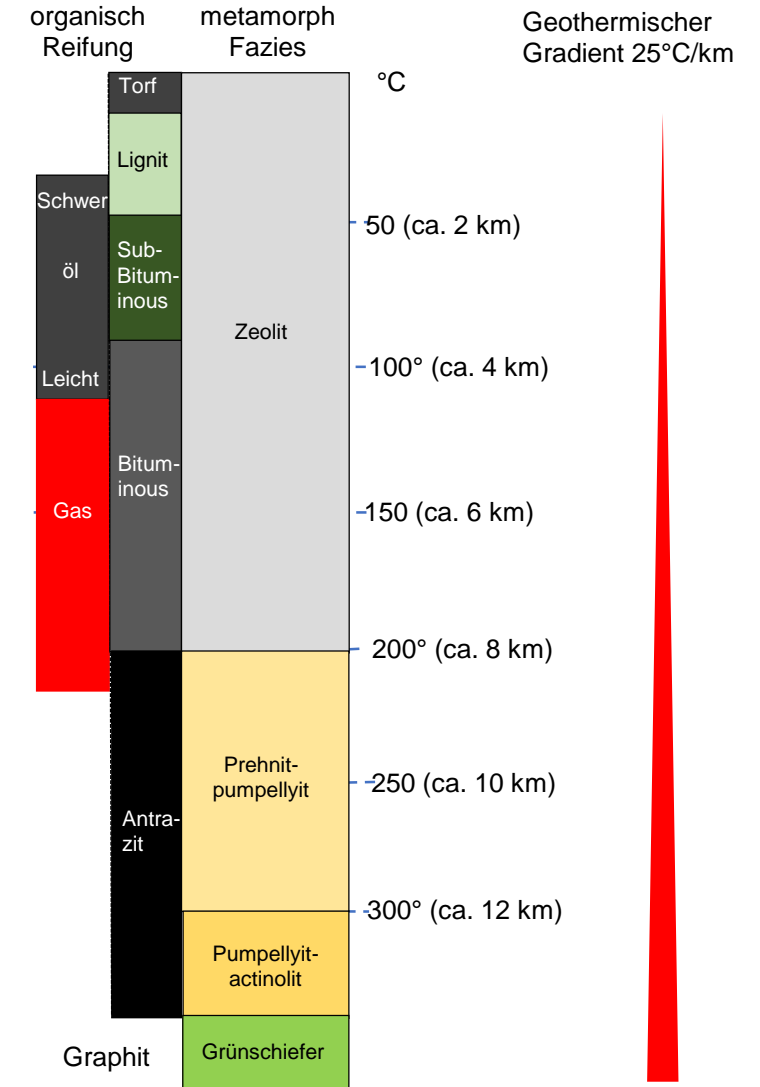
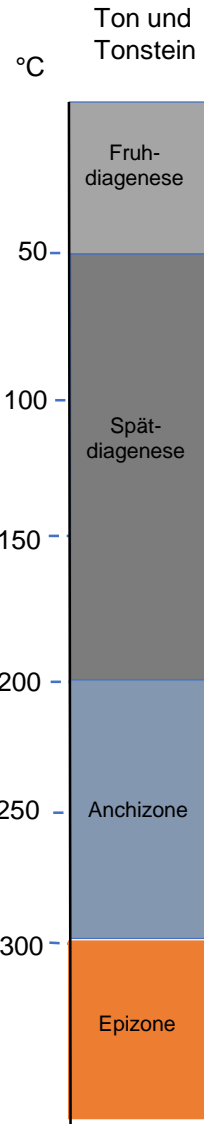
ca. 5,6 % Smekitgehalt

ca. 24,4 % Illit-Smektit Wechsellagerung mit ca. 77% Illit und 23% Smektit (Kneucker et al. 2023)



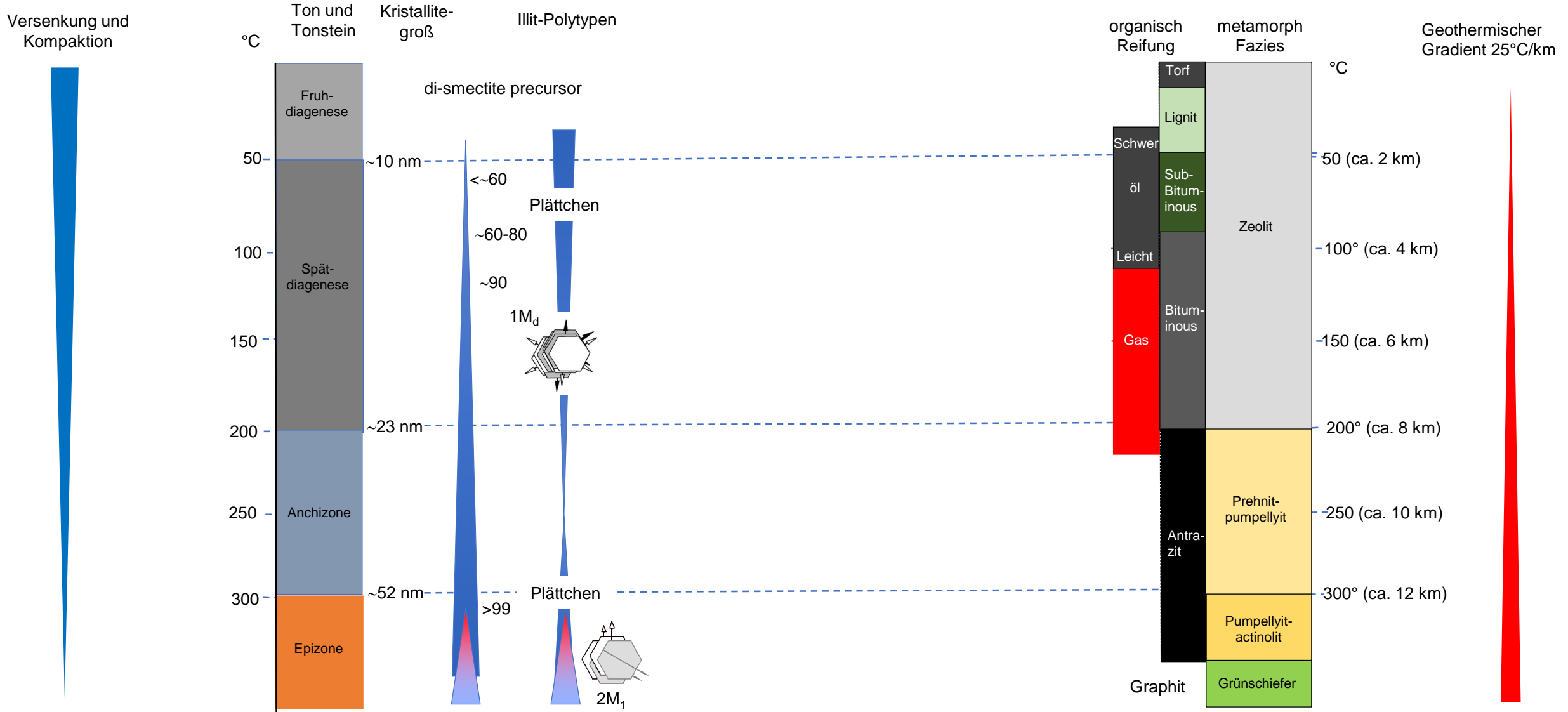
Diagenetische Reaktionen in Tonen und Tonsteinen

Versenkung und Kompaktion





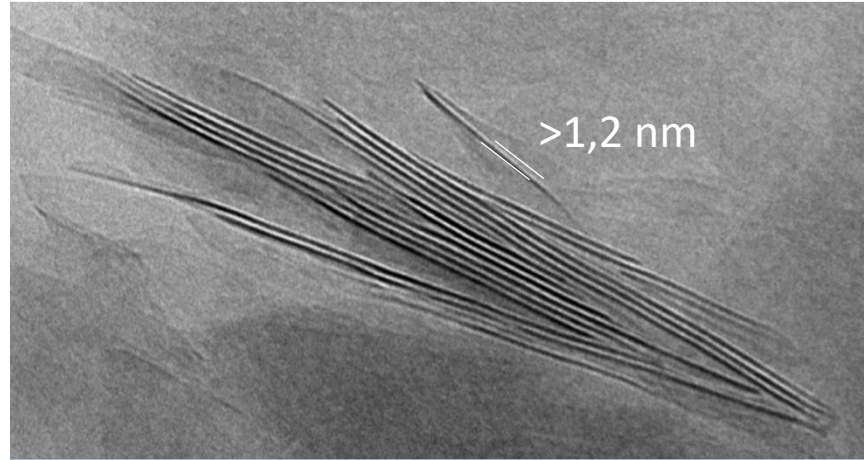
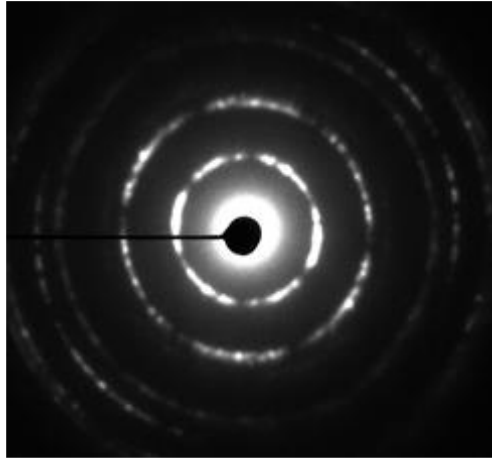
Diagenetische Reaktionen in Tonen und Tonsteinen



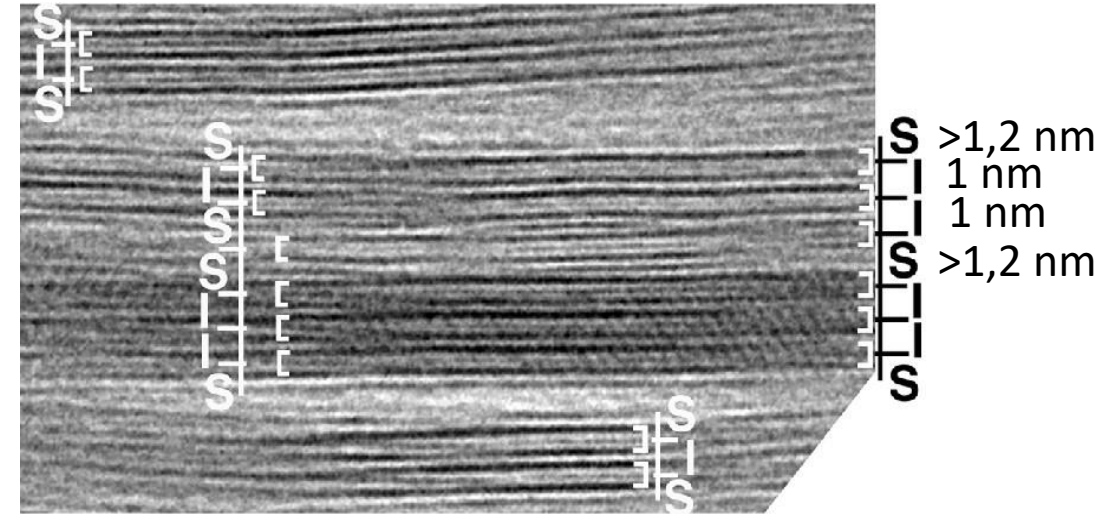
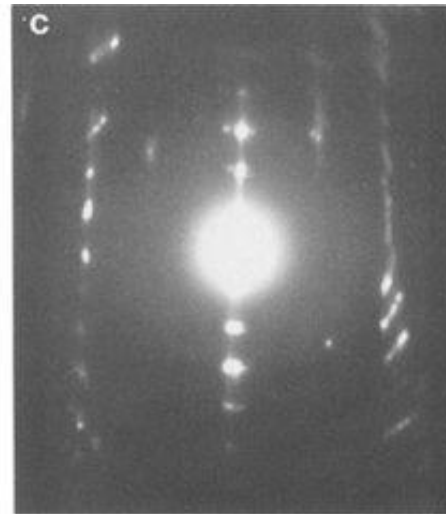
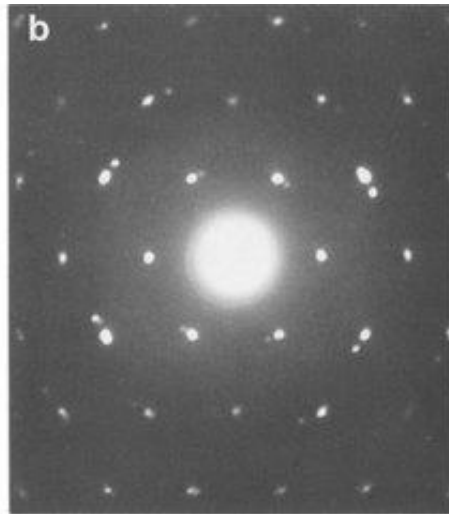
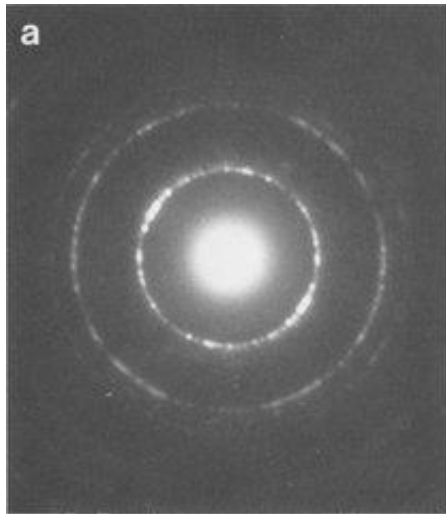
Diagenetische Reaktionen in Tonen und Tonsteinen

Turbostratisch

<https://eesa.lbl.gov/programs/bes-geochemistry/cryo-tem-hydrated-smectite/>



Kryo-TEM

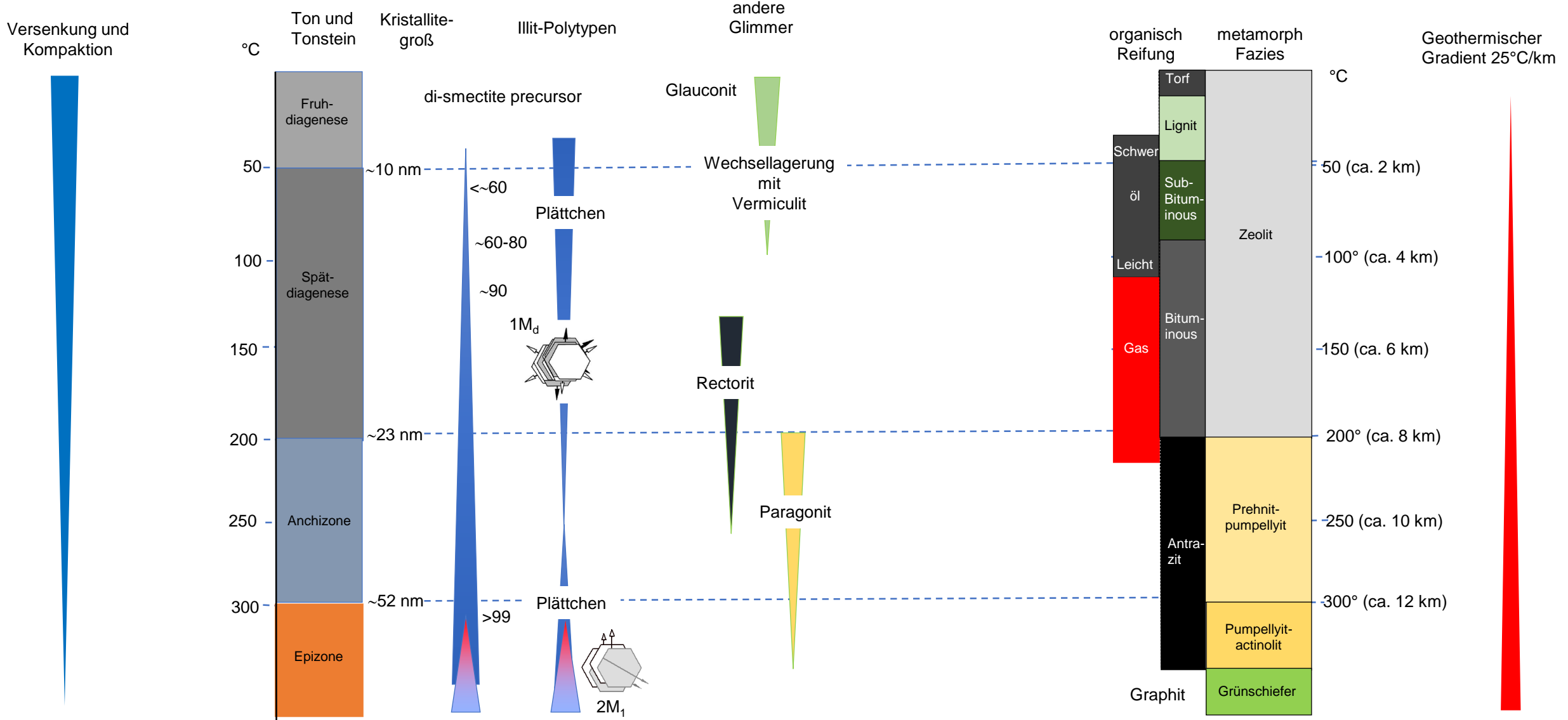


Elektronenbeugung: Illit-Smektit Wechsellagerung (Veblen et al. 1990)

Lanson (2011)

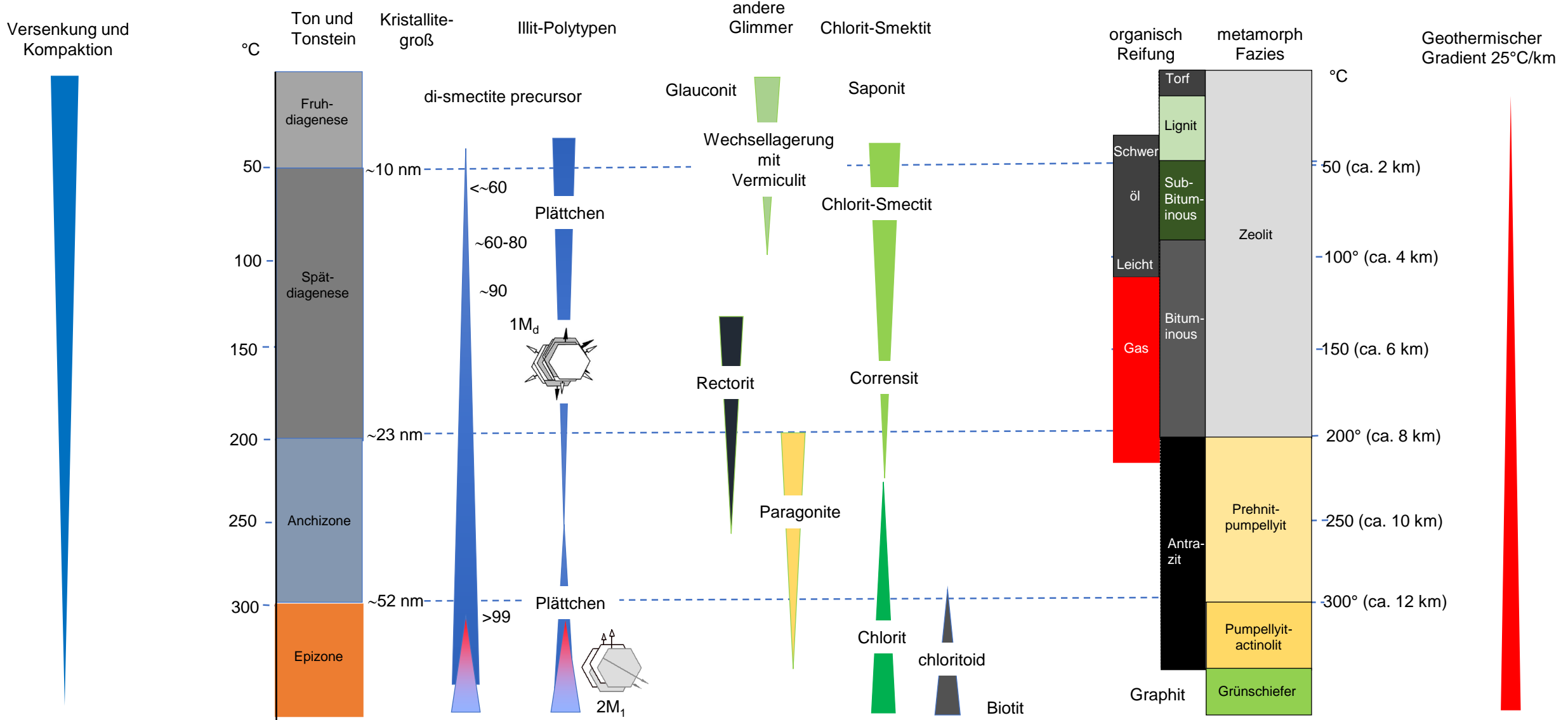


Diagenetische Reaktionen in Tonen und Tonsteinen



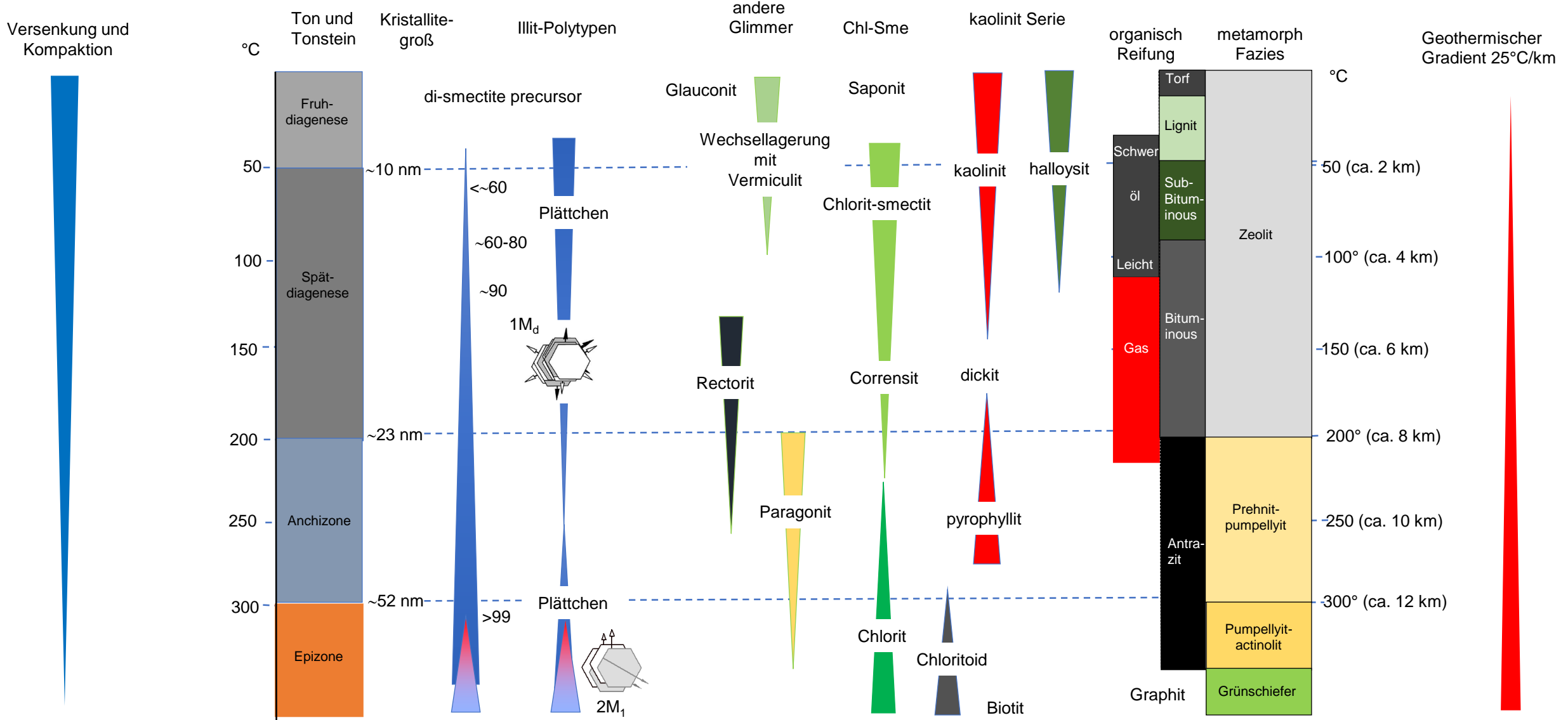


Diagenetische Reaktionen in Tonen und Tonsteinen





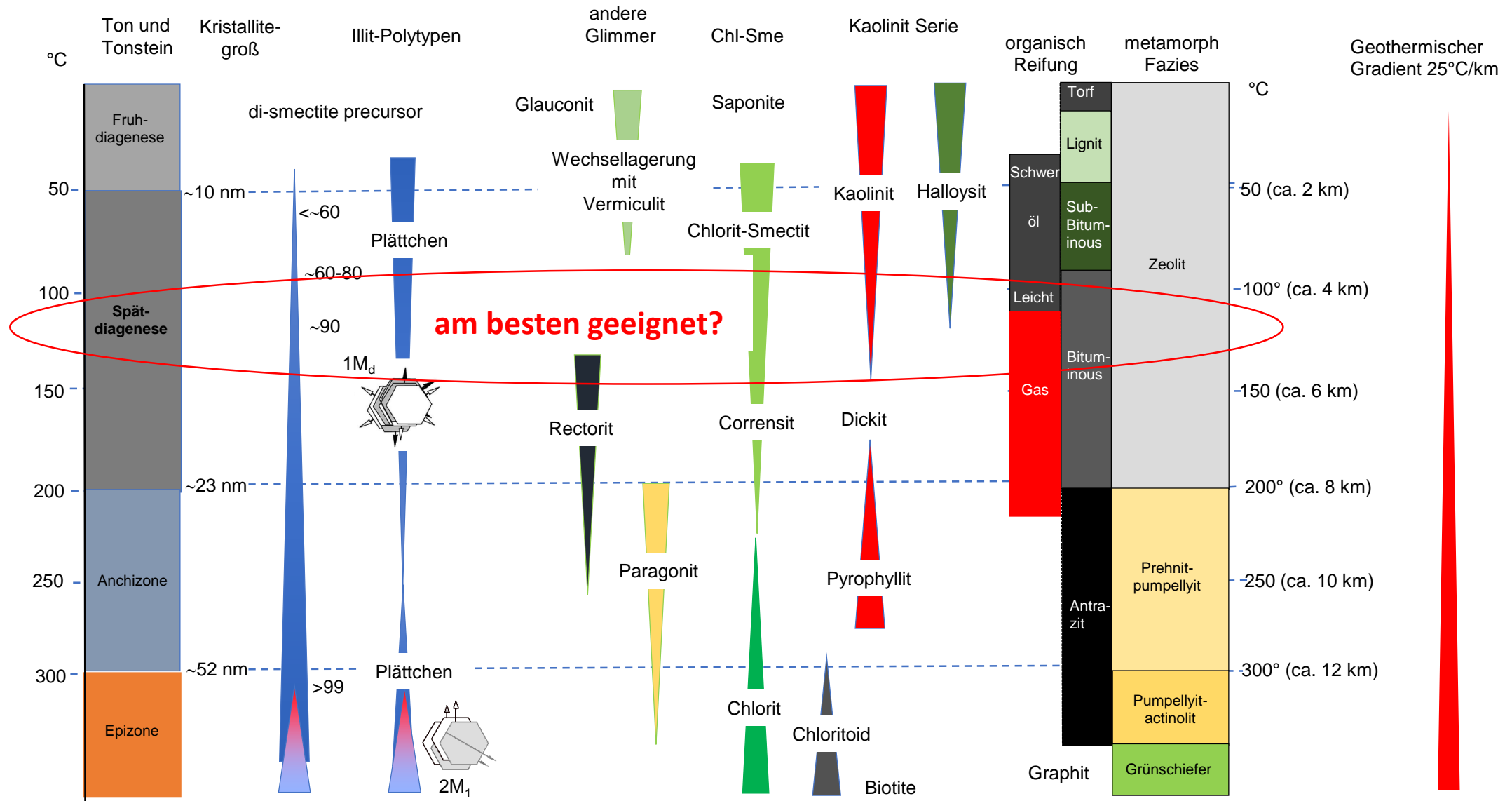
Diagenetische Reaktionen in Tonen und Tonsteinen



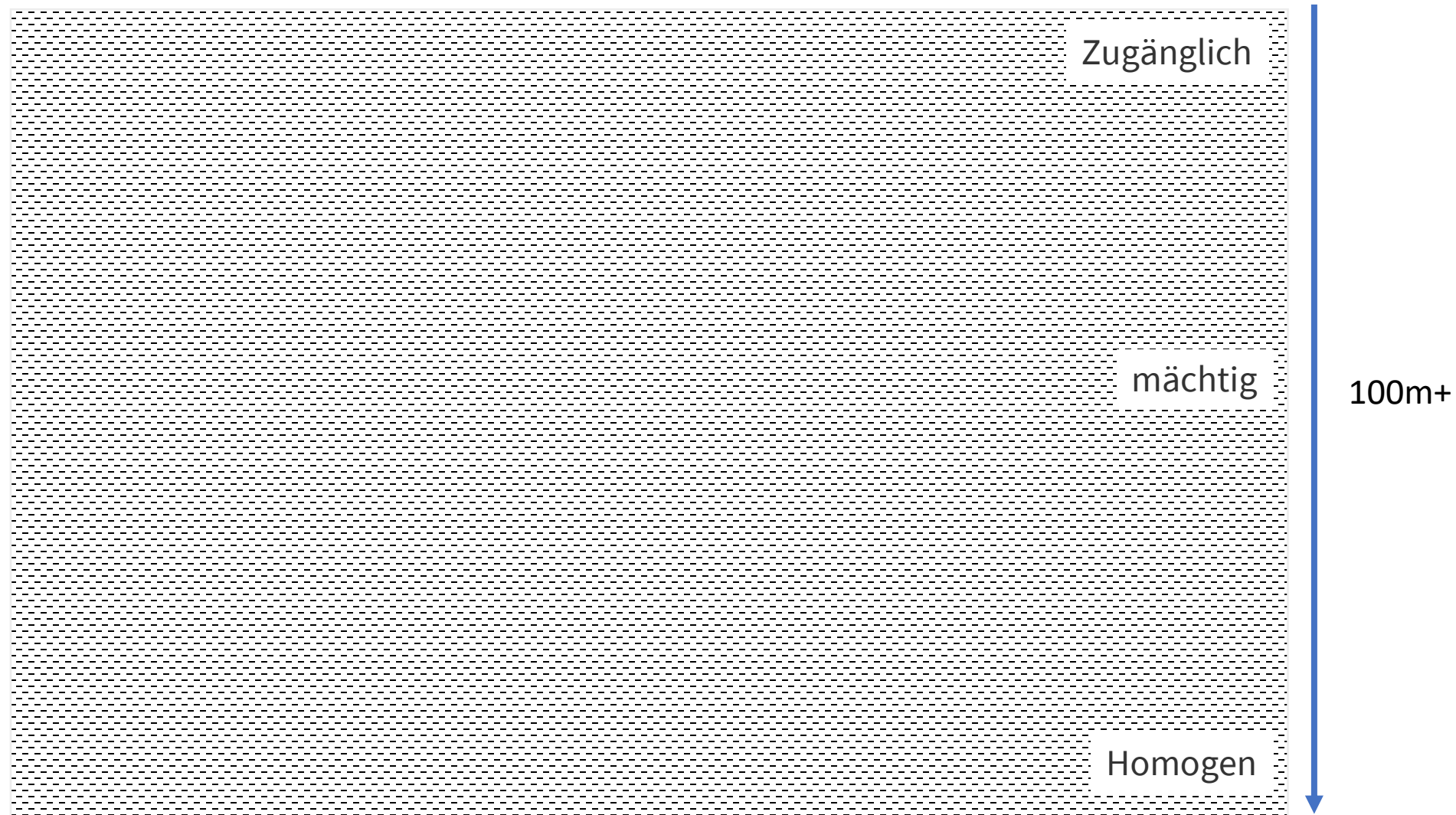


Diagenetische Reaktionen in Tonen und Tonsteinen

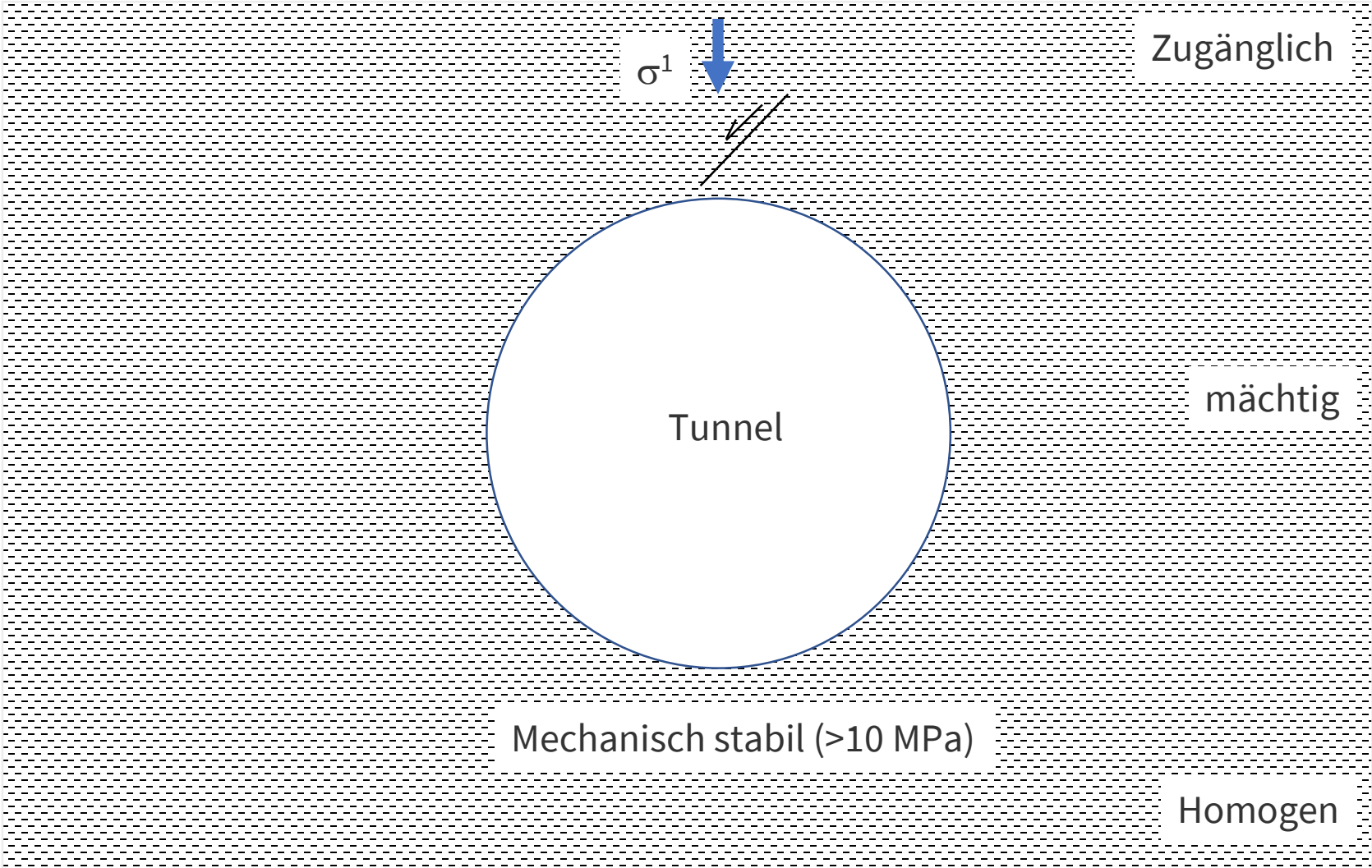
Versenkung und Kompaktion



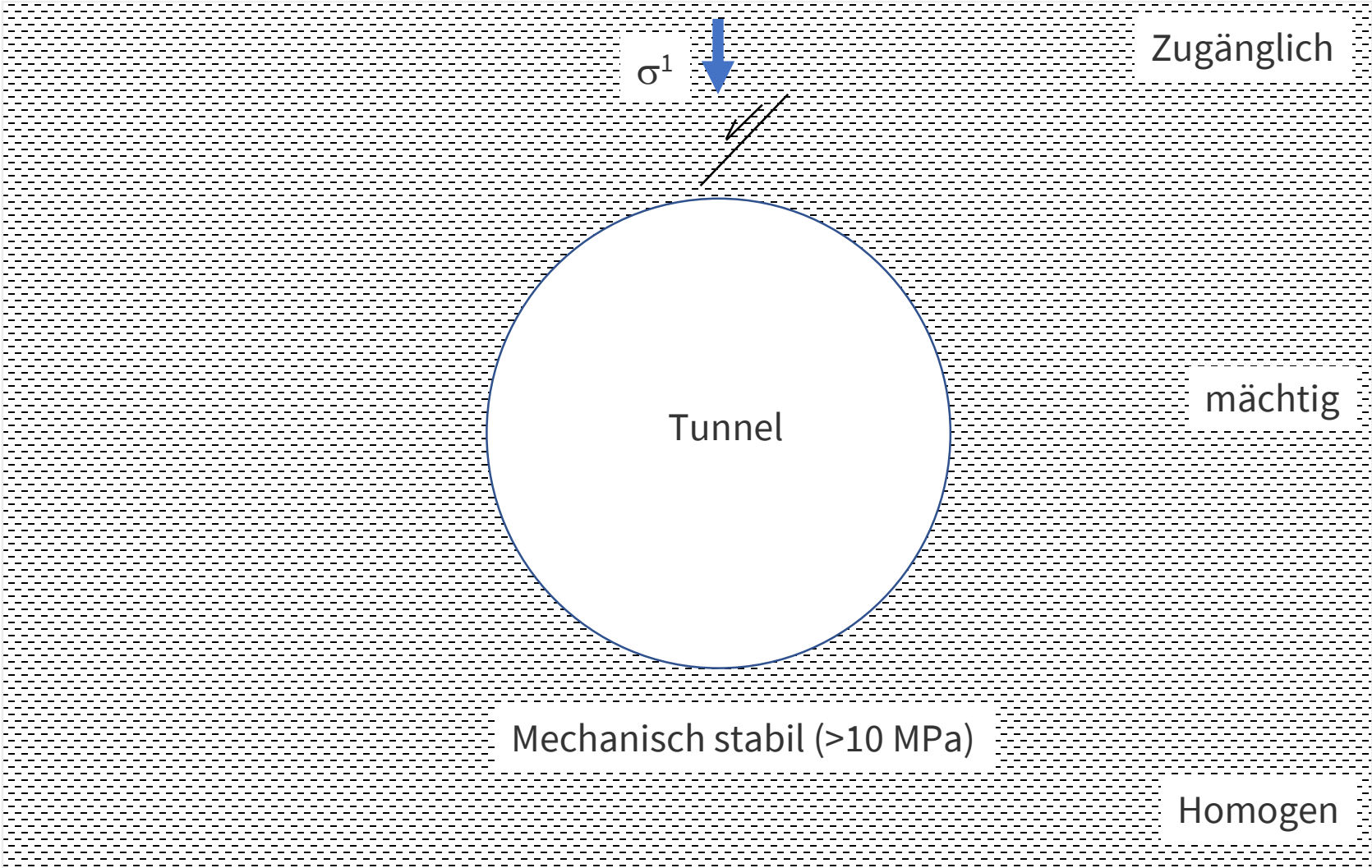
Welcher Ton oder Tonstein eignet sich am besten für ein Endlager?



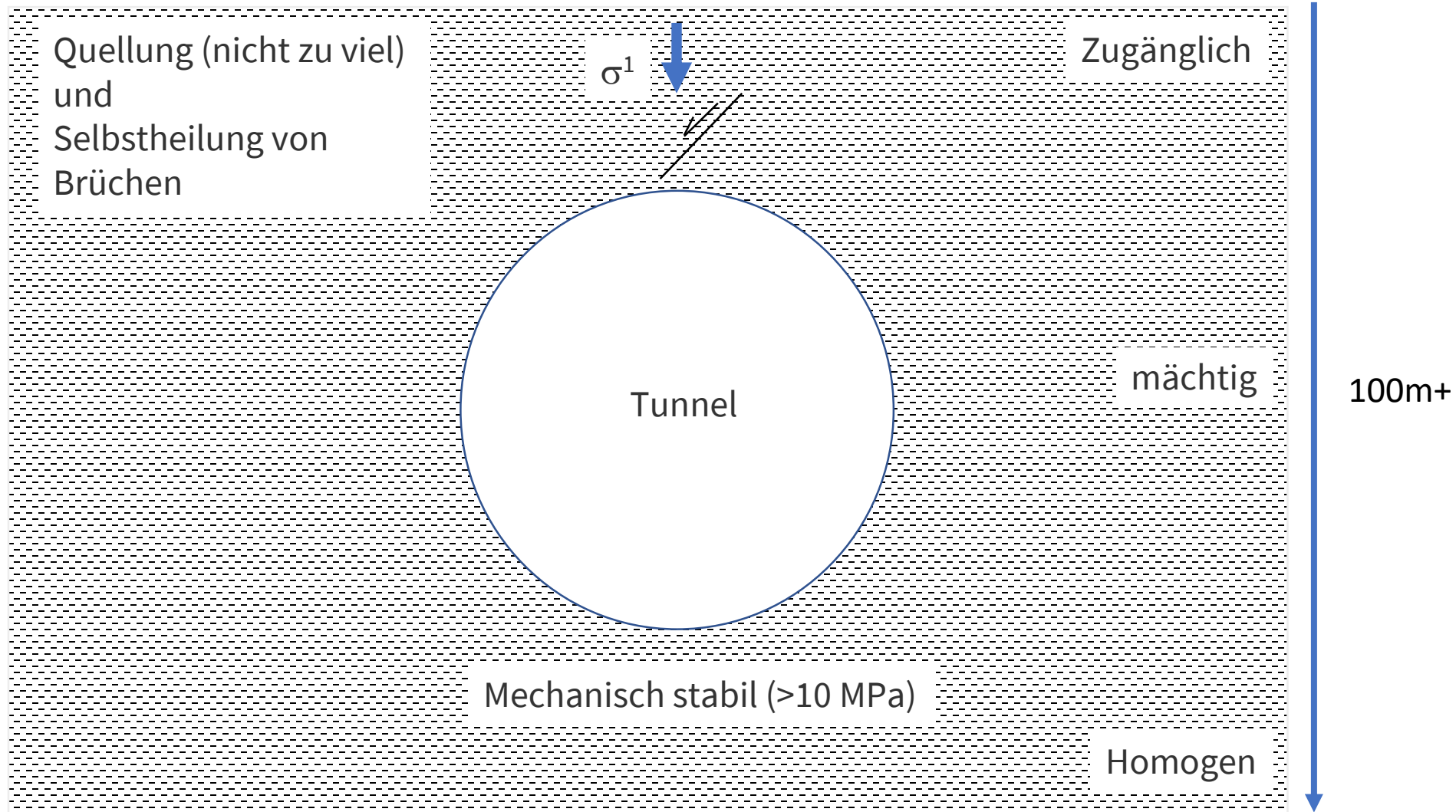
Welcher Ton oder Tonstein eignet sich am besten für ein Endlager?



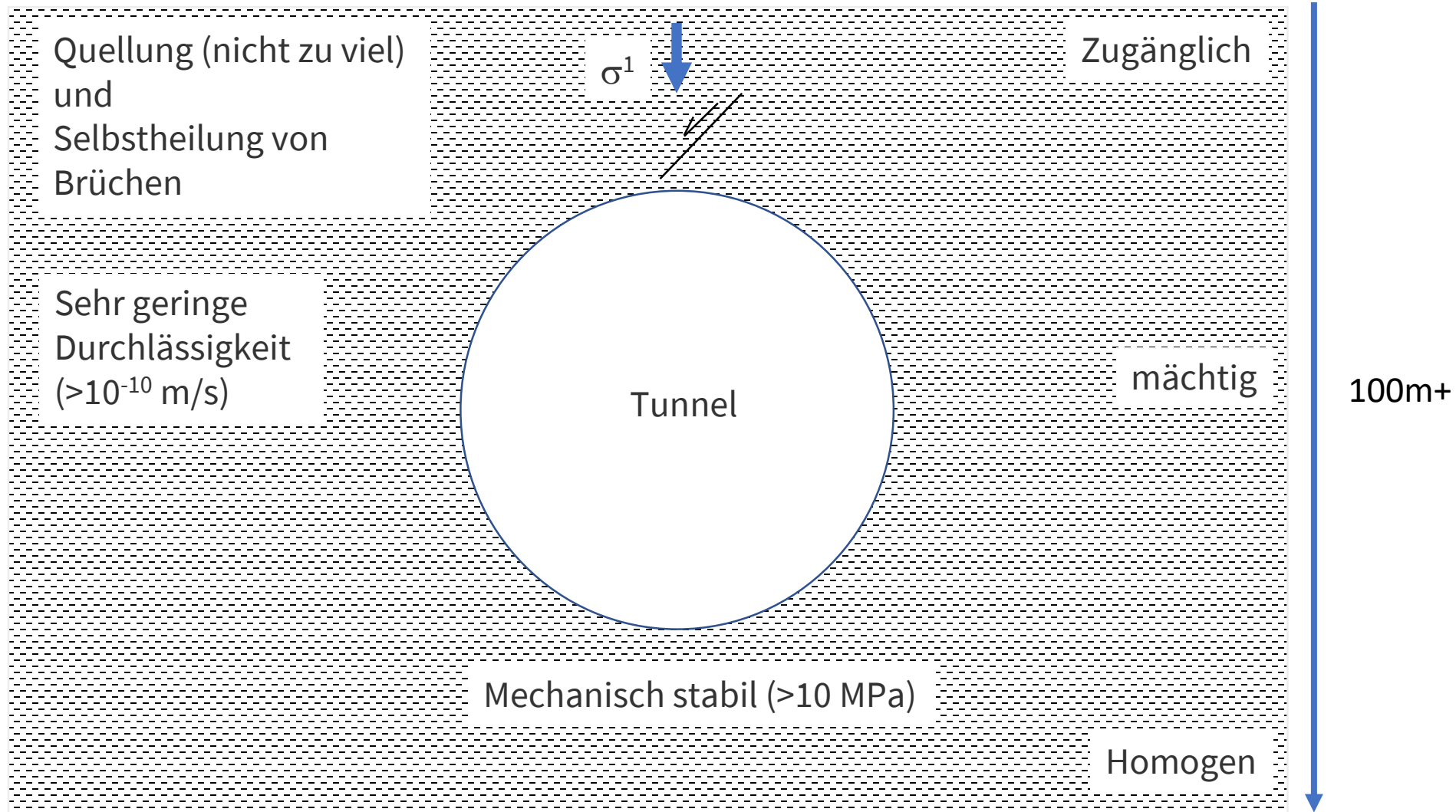
Welcher Ton oder Tonstein eignet sich am besten für ein Endlager?



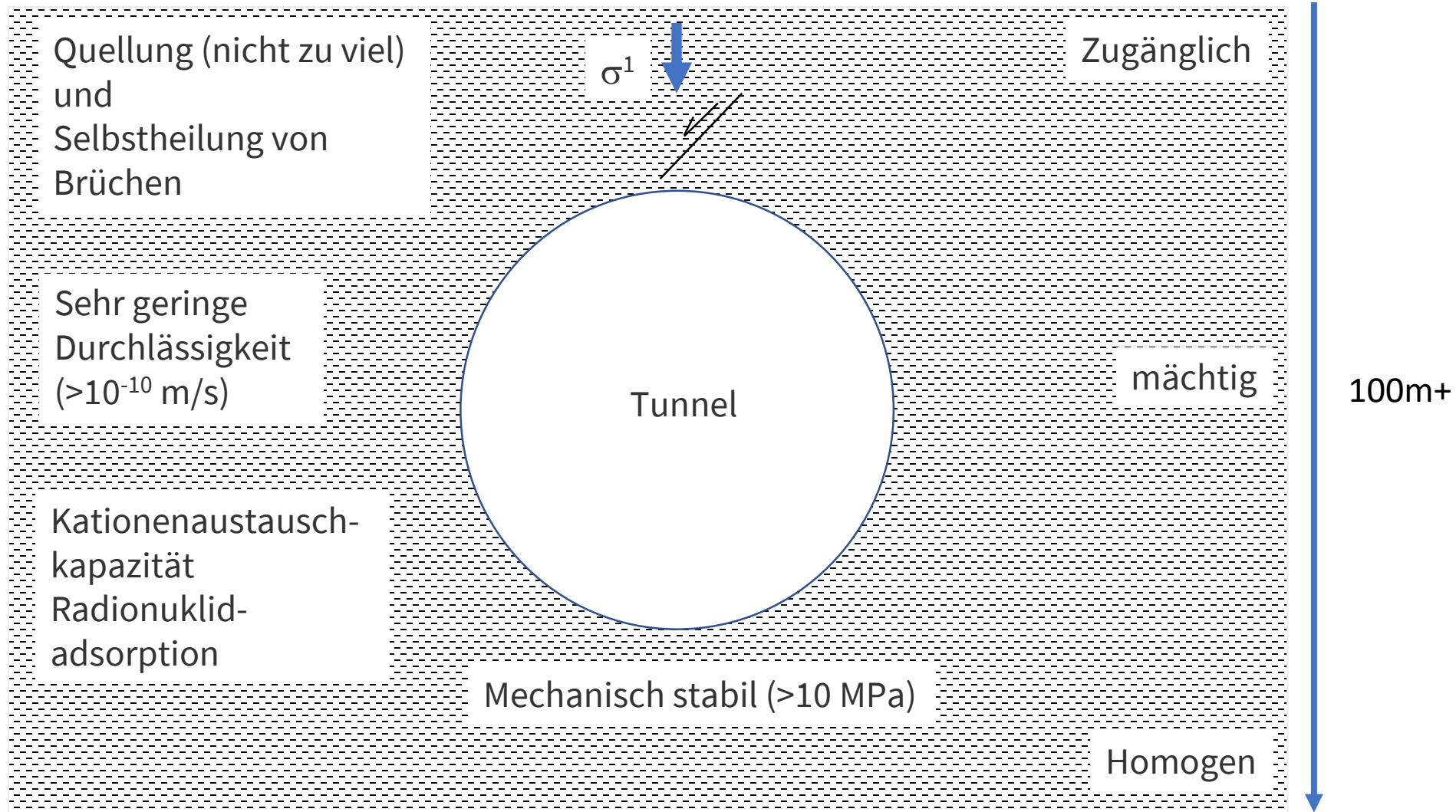
Welcher Ton oder Tonstein eignet sich am besten für ein Endlager?



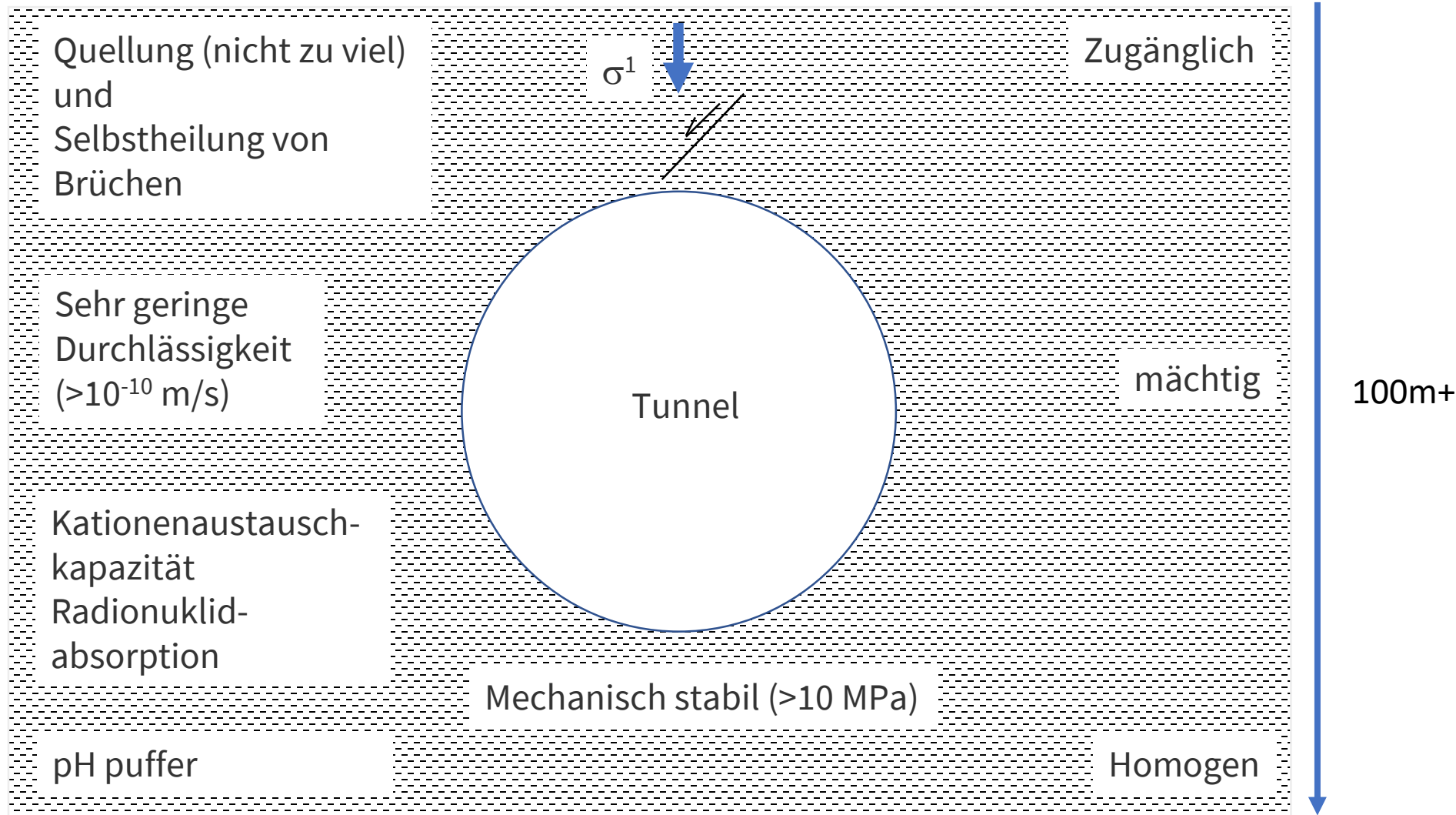
Welcher Ton oder Tonstein eignet sich am besten für ein Endlager?



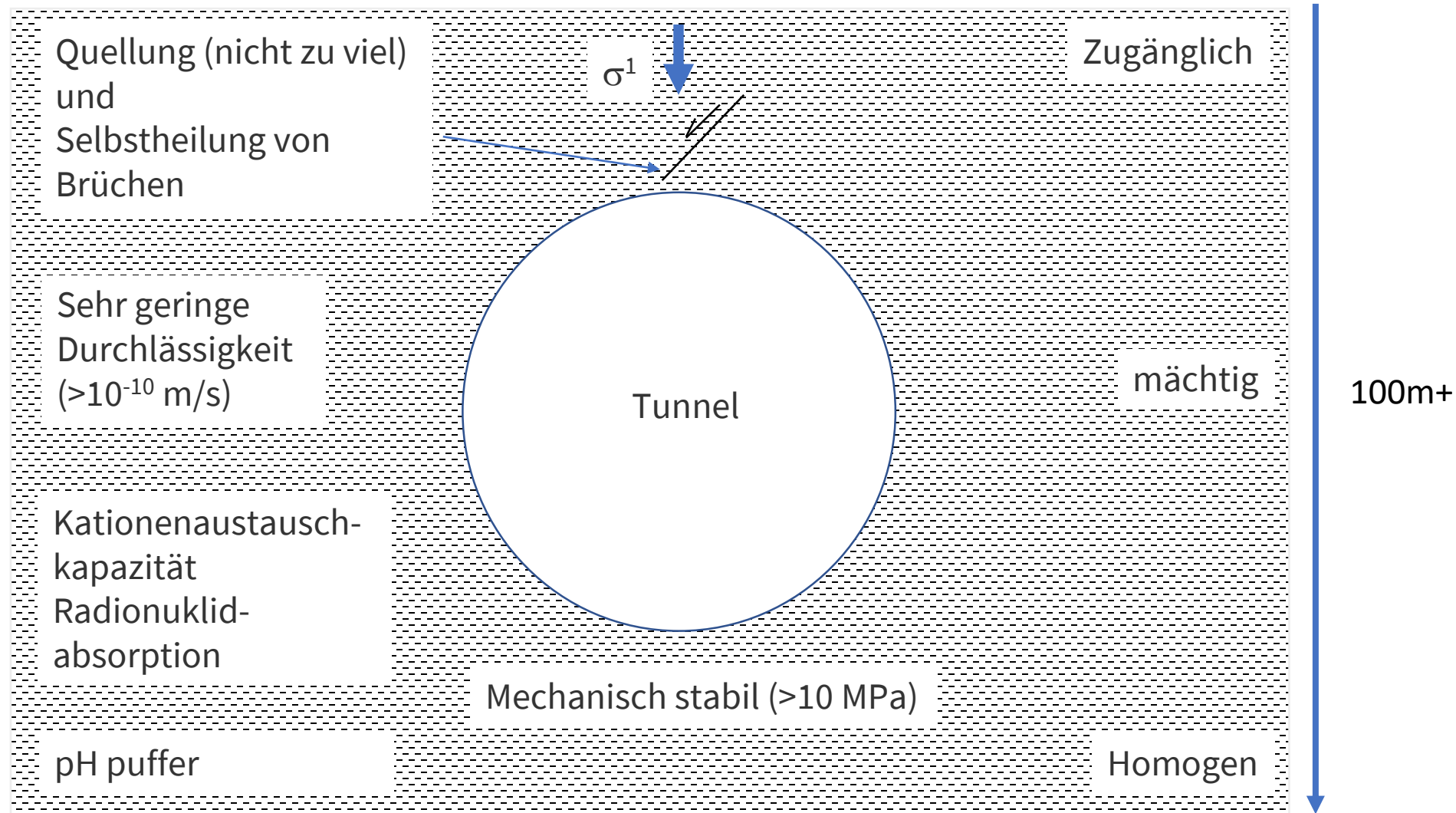
Welcher Ton oder Tonstein eignet sich am besten für ein Endlager?



Welcher Ton oder Tonstein eignet sich am besten für ein Endlager?



Welcher Ton oder Tonstein eignet sich am besten für ein Endlager?



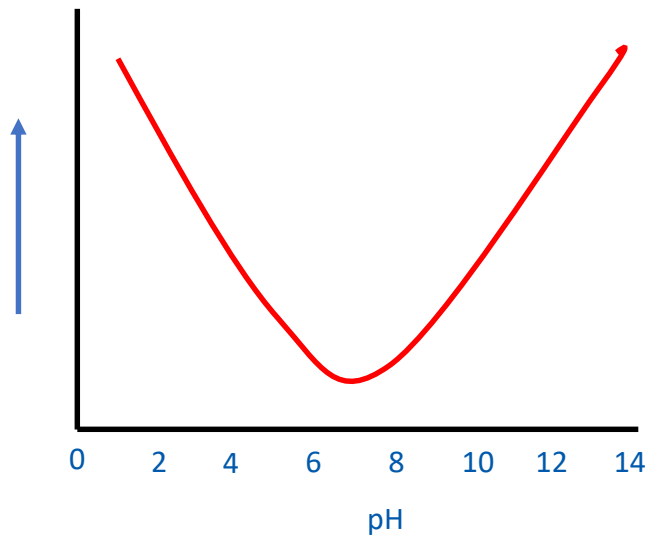
Mineralogie: Hoher Tonmineralgehalt $>30\%$, Illit-Smektit Wechellagerung (mit geringem Smektitgehalt), wenig Pyrit, wenig organisches Material, nicht zu viel Karbonat = **z.B. spät diagenetischer Mesozoischer Tonstein**



Löslichkeitsraten von Mineralen (Illit und Smektit) $1 \times 10^{-12} - 1 \times 10^{-15} \text{ mol g}^{-1} \text{ s}^{-1}$ bei 50°C

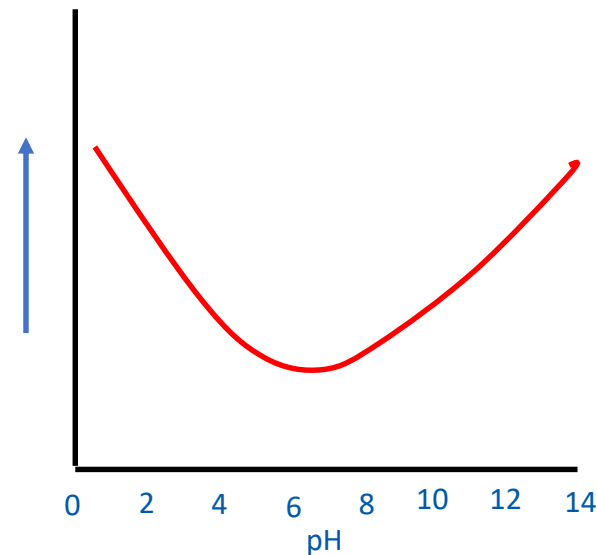
Illit lösung

Lösungsgeschwindigkeit



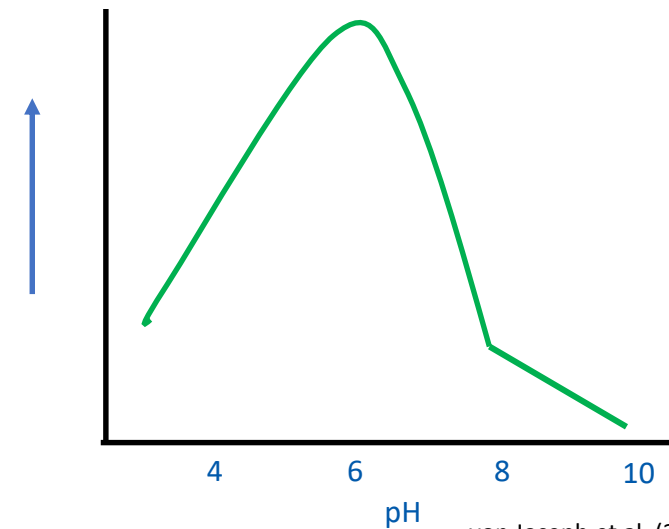
Smektit lösung

Lösungsgeschwindigkeit



U(VI)-Adsorption Opalinustonstein

Adsorption (%)



von Joseph et al. (2013)

Minimale Mineralauflösung zwischen pH 6 – 7 und maximale U(VI)-Adsorption

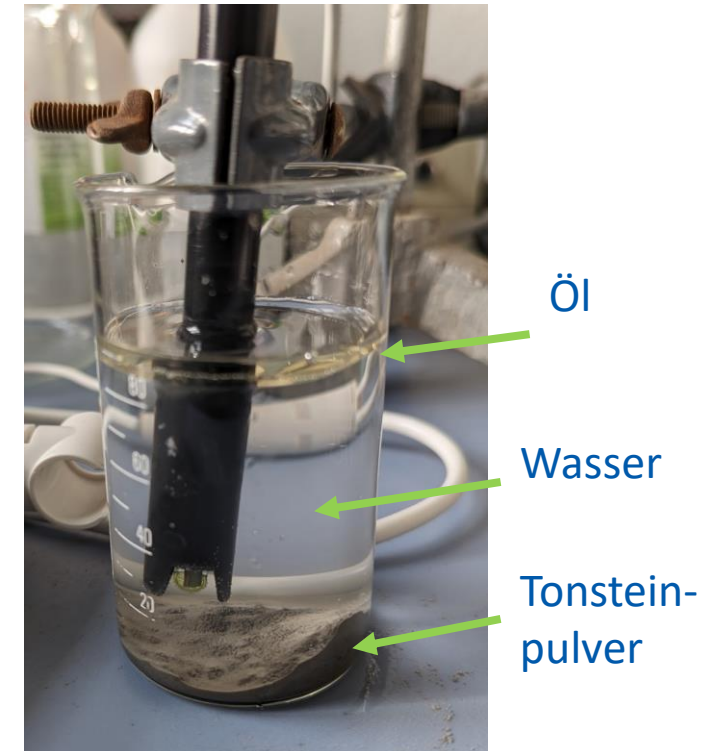
Puffer experiment mit Opalinustonstein

80 ml Wasser, 5 g Tonsteinpulver
Zeit „0“



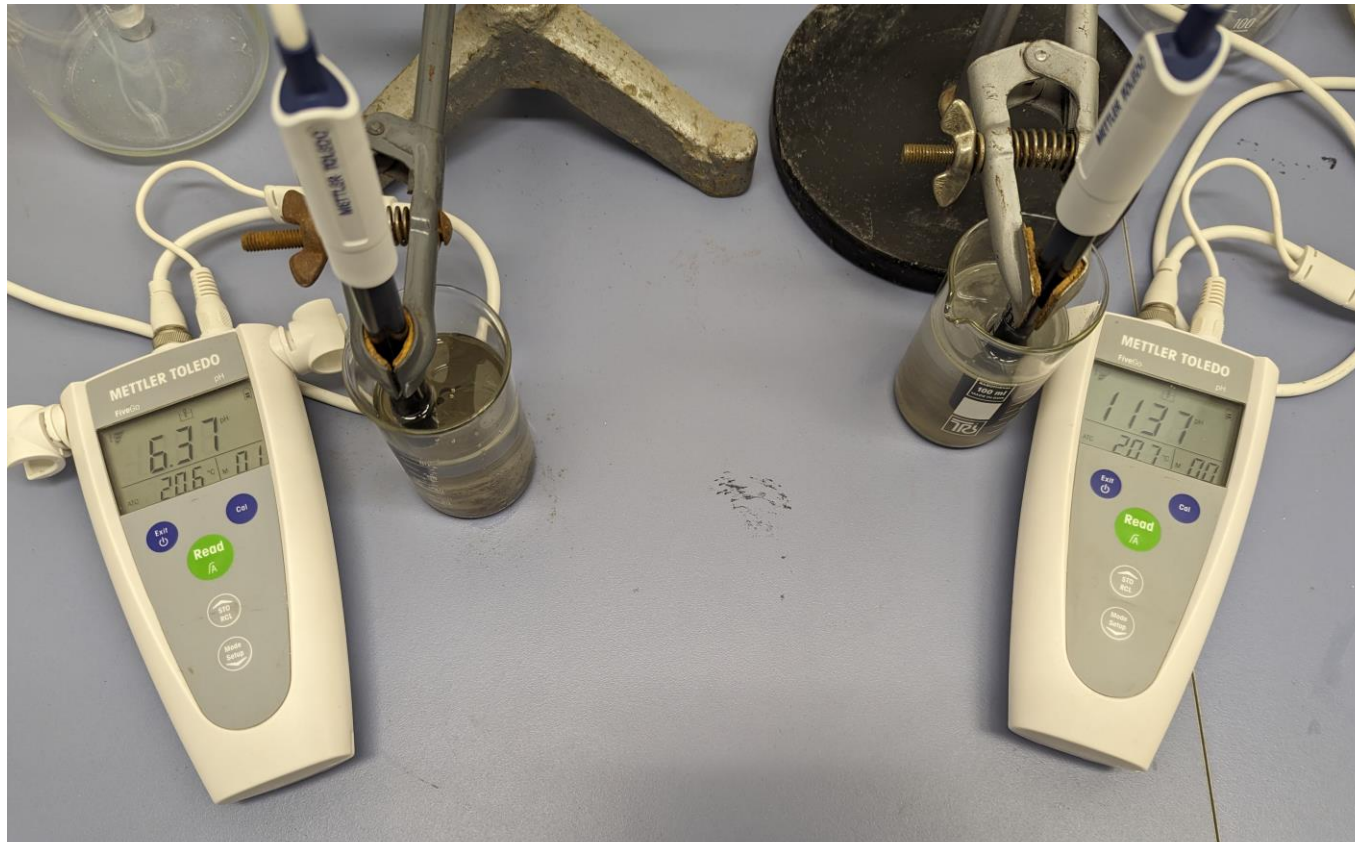
pH 2

pH 12



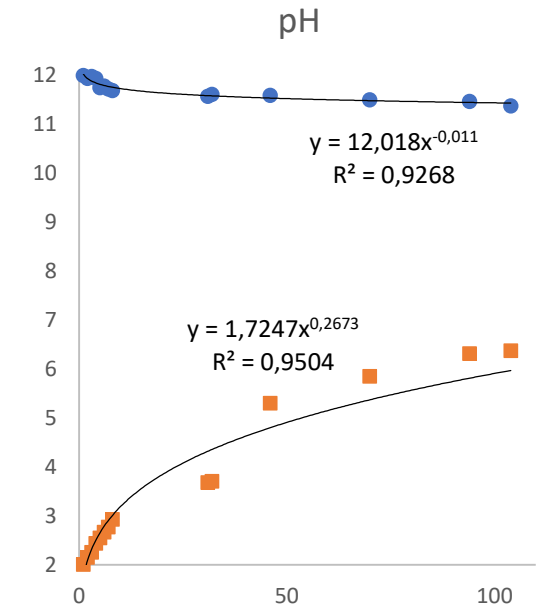
Puffer experiment mit Opalinustonstein

80 ml wasser, 5 g Tonsteinpulver
Nach 5 Tagen



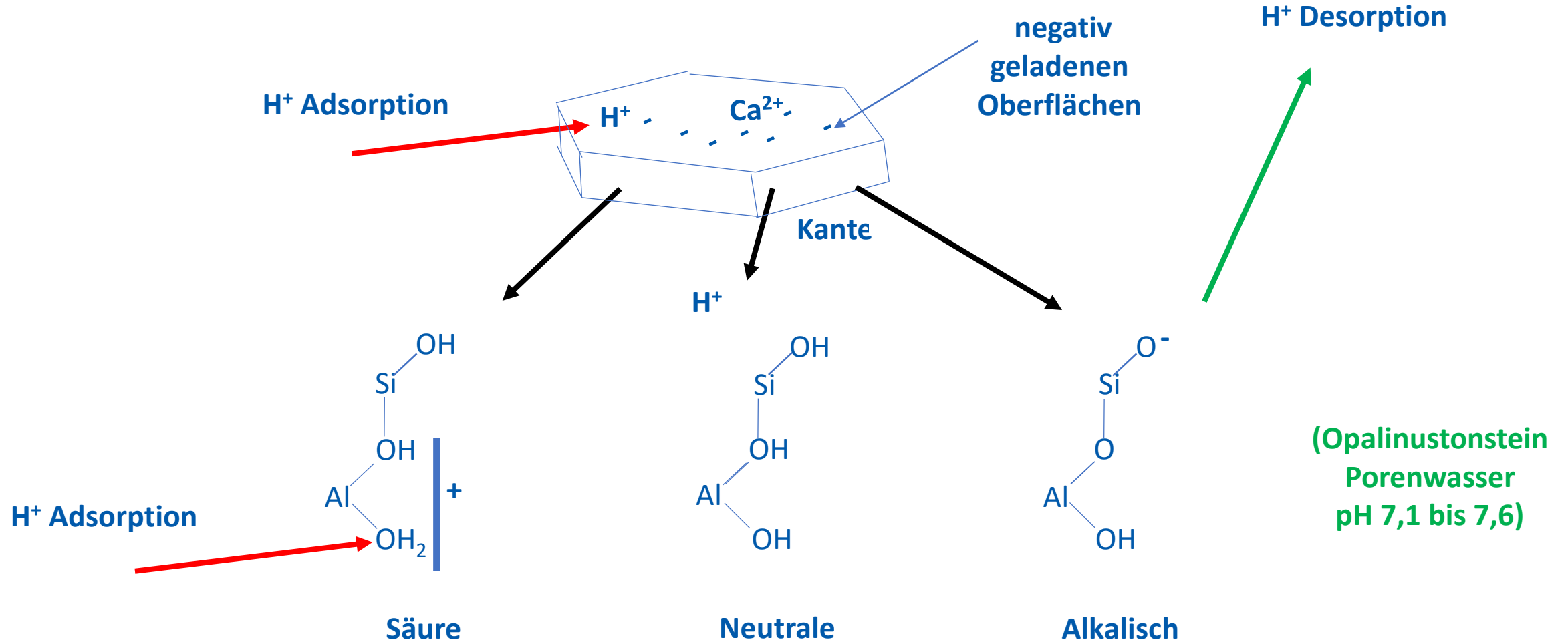
pH 6,37

pH 11,37





Mechanismus des Tonmineralpuffers





Zusammenfassung

Tonsteine sind in Deutschland häufig vorkommende Gesteine und haben viele günstige Eigenschaften als Endlagergestein u.a. Mächtigkeit, Quellung und Selbstheilung von Brüchen, mechanisch stabil, sehr geringe Durchlässigkeit, Kationenaustausch-kapazität mit Radionuklid-adsorption und pH puffer.

Günstig sind thermisch gereifte Tonsteine mit geringem Quellvermögen und ausreichender mechanischer Festigkeit. Als besonders geeignet gelten Illit-Smektit-Tongesteine mit geringem Pyrit- und geringem organischen Anteil.



Literatur

Dietel, J., Warr, L.N., Bertmer, M., Steudel, A., Grathoff, G.H., Emmerich, K. (2017). The importance of specific surface area in the geopolymerization of heated illitic clay. *Applied Clay Science*. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2017.01.001>

Keller, L.M., Philipp Schuetz, P., Rolf Erni, R., Rossell M.D., Lucas, F., Gasser, P., Holzer, L. (2013). Characterization of multi-scale microstructural features in Opalinus Clay. *Microporous and Mesoporous Materials*. <https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2012.11.029>

Kneuker, T., Dohrmann, R., Ufer, K., Jaeggi, D. (2023). Compositional-structural characterization of the Opalinus Clay and Passwang Formation: New insights from Rietveld refinement (Mont Terri URL, Switzerland). *Applied Clay Science*. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2023.107017>

Joseph, C., Stockmann, M., Schmeide, K., Sachs, S., Brendler, V., Bernhard, G. (2013). Sorption of U(VI) onto Opalinus Clay: Effects of pH and humic acid. *Applied Geochemistry*. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2013.06.016>

Lanson, B. (2011). Modelling of X-ray diffraction profiles: Investigation of defective lamellar structure crystal chemistry. *EMU Notes in Mineralogy*, Vol.11, Chapter 4, 151–202.

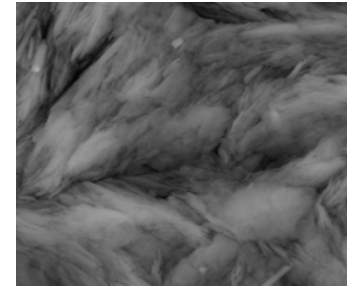
Meschede, M and Warr, L.N. (2019). *The Geology of Germany*, Springer

Technischer Bericht NTB 02-03. (2002). Projekt Opalinuston. Synthese der geowissenschaftlichen Untersuchungsergebnisse – Entsorgungsnachweis für abgebrannte Brennelemente, verglaste hochaktive sowie langlebige mittelaktive Abfälle. <https://nagra.ch/downloads/technischer-bericht-ntb-02-03/>

Veblen, D.R., Guthrie, G.D., Livi, K.J.T., Reynolds, R.C. (1990). High-Resolution Transmission Electron Microscopy and Electron Diffraction of Mixed-Layer Illite/Smectite: Experimental Results. *Clays and Clay Minerals*. <https://link.springer.com/article/10.1346/CCMN.1990.0380101>

Warr, L.N. (2022). Earth's clay mineral inventory and its climate interaction: A quantitative assessment. *Earth-Science Reviews*. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2022.104198>

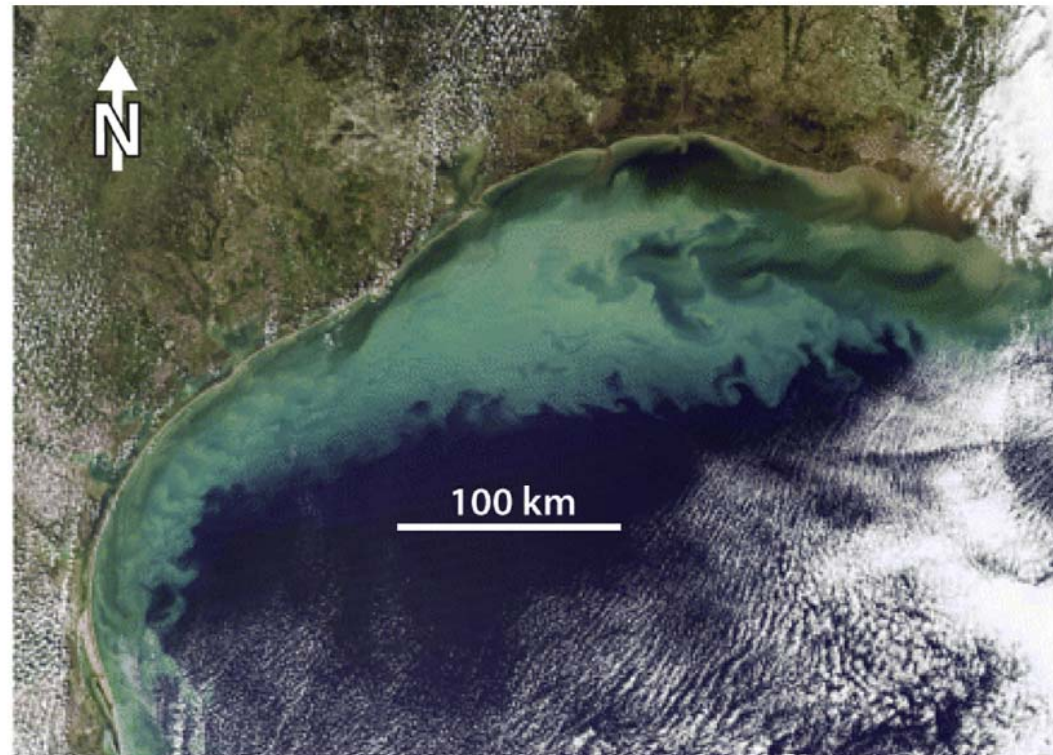
Warr, L.N. and Grathoff, G.H. (2023). Unpublished MSc. lecture notes on “Clay minerals and the Environment”. Universität Greifswald.



Tonsteine – wie sie sich bilden und warum sie als Wirtsgesteine in Betracht gezogen werden

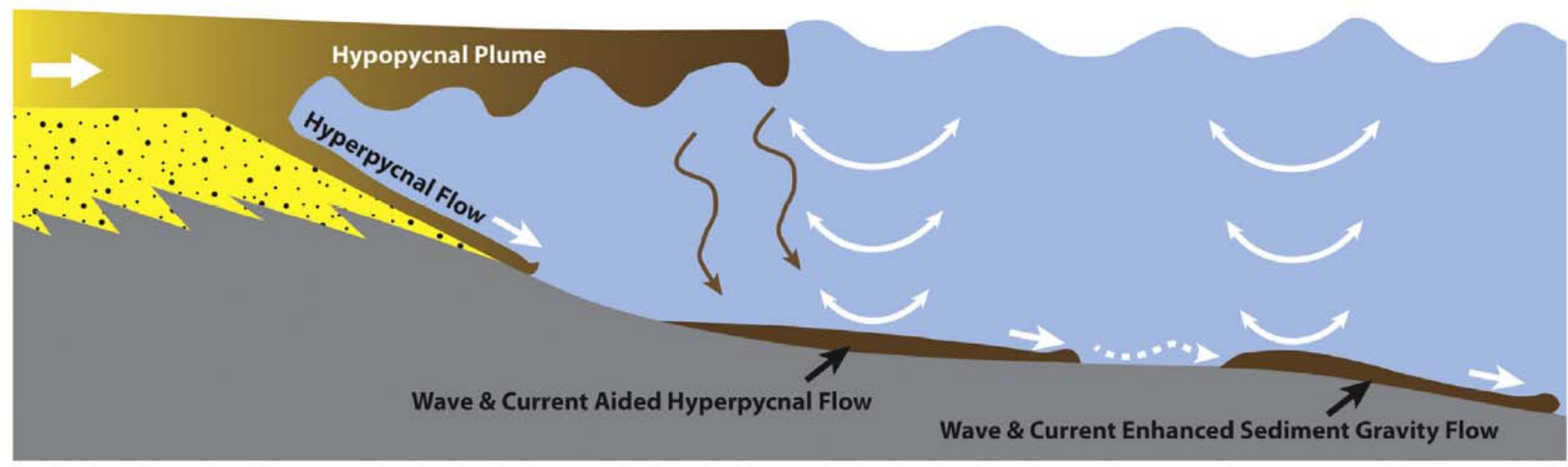
Jochen Erbacher und Stephan Kaufhold - Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR)

Marine, feinkörnige Sedimente (mud deposits oder „Tone“) – Ablagerungsprozesse



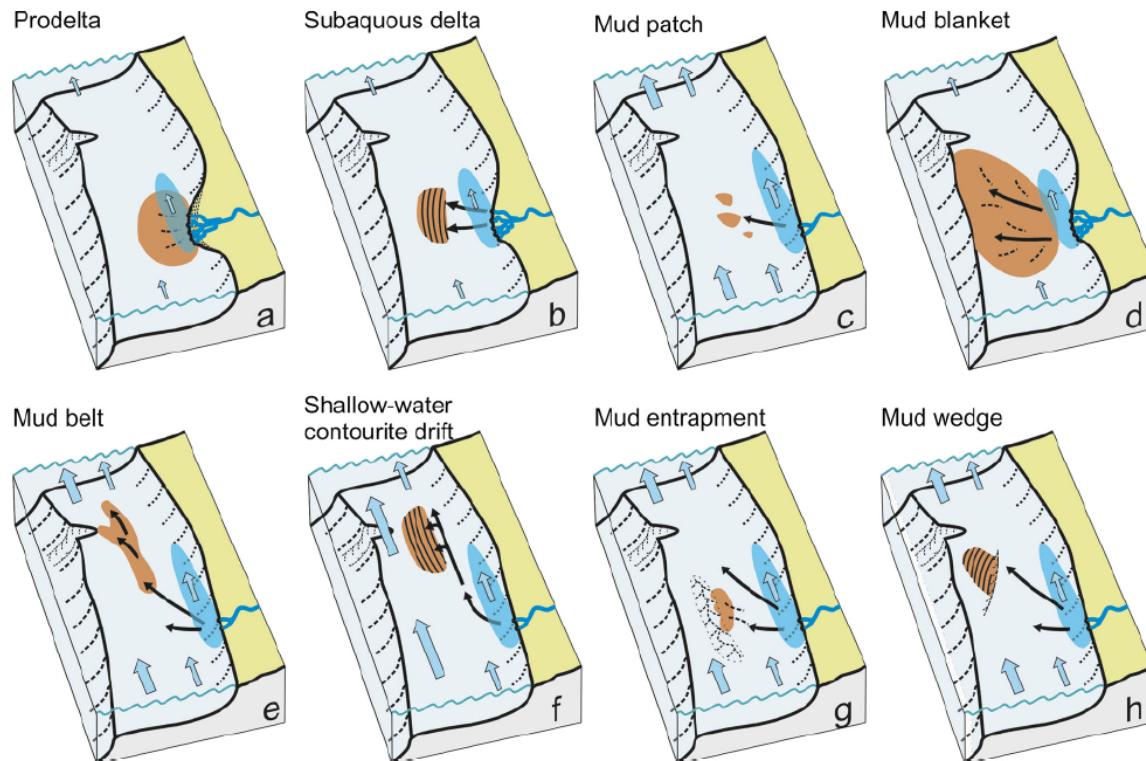
Sedimenteintrag von Mississippi und Brazos River in den Golf von Mexiko
aus Weight et al. 2011

Fluvialer Eintrag, Transport- und Umlagerung



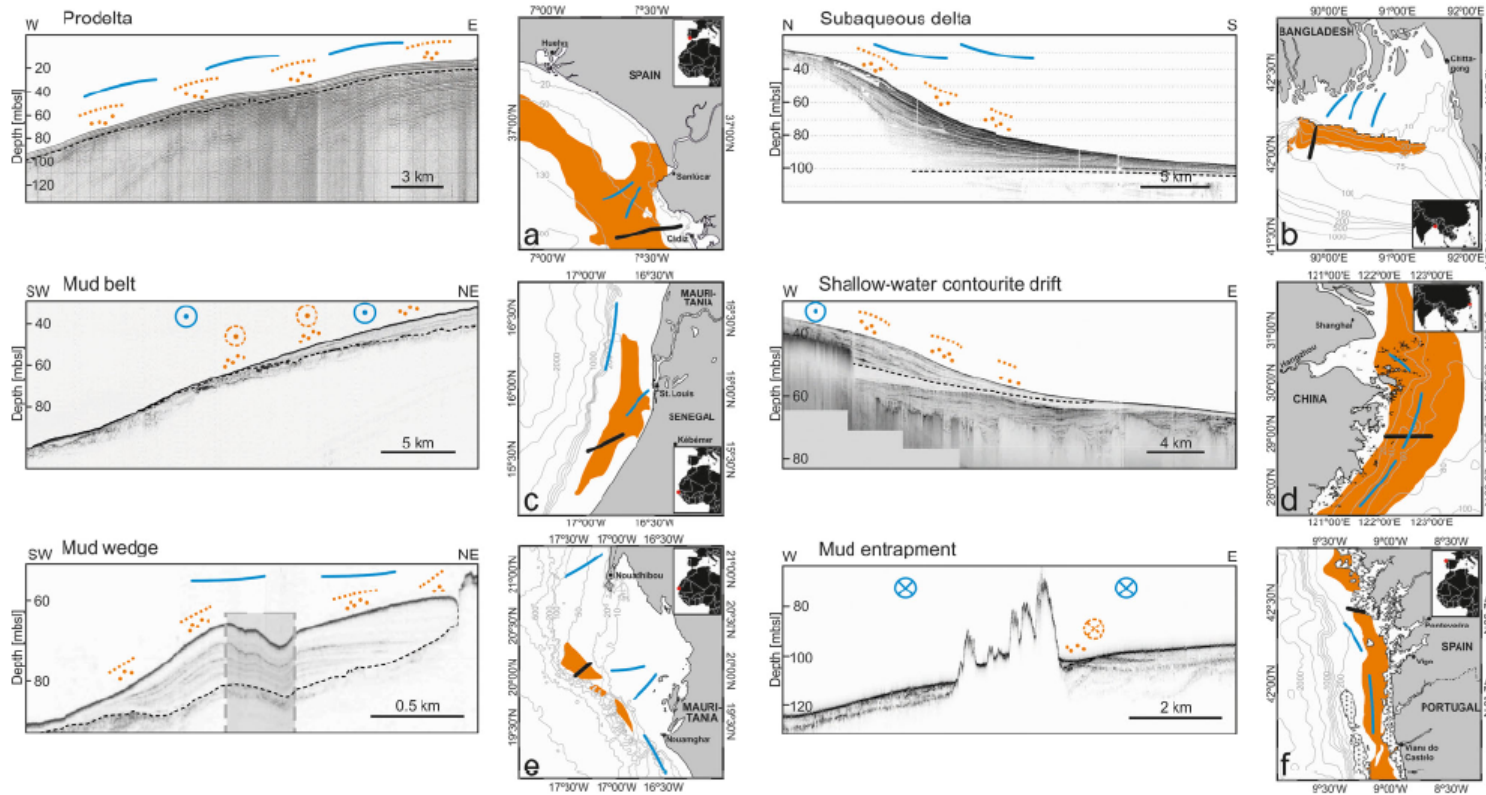
aus Schieber 2015

Feinkörnige Ablagerungen in rezenten Schelfmeeren



aus Hanebuth et al. 2015

Feinkörnige Ablagerungen in rezenten Schelfmeeren



aus Hanebuth et al. 2015

Feinkörnige Ablagerungen in rezenten Schelfmeeren



Take-Home-Message 1: Unterschiedliche Ablagerungsprozesse verursachen unterschiedliche Geometrien und räumliche Verbreitungen der Gesteinspakete (Endlagerrelevanz) UND Tonsteine sind mitnichten das Ergebnis ruhiger einheitlicher Ablagerungsbedingungen

aus Hanebuth et al. 2015

Wo Ton ist, sind Silt und Sand nicht weit...

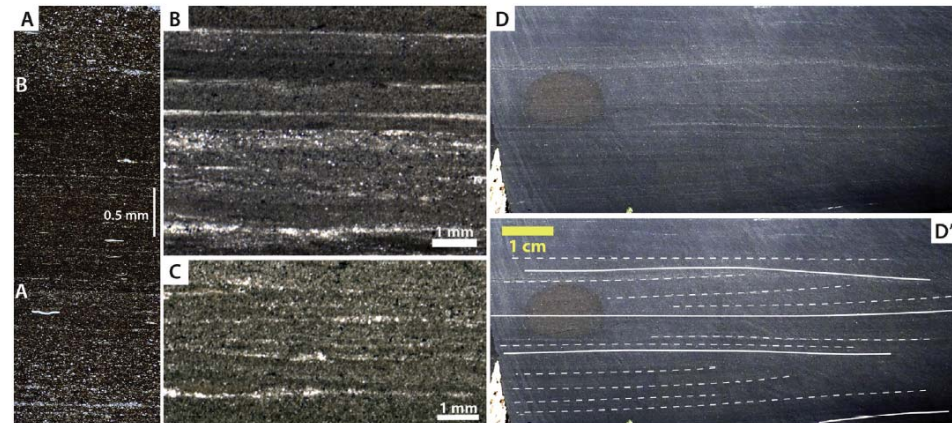


Opalinuston Nordschweiz

Texture	Macrofacies	Microfacies
SF1 		
SF2 		
SF3 		
SF4 		

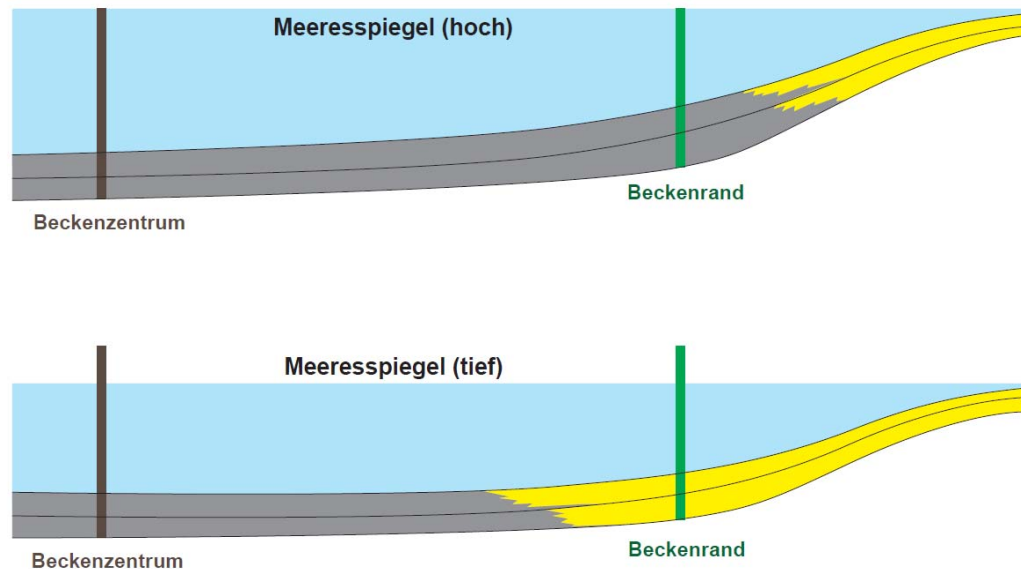
aus Lauper et al. 2021

Tonsteine Nordamerika: Devon (A) und Oberkreide (B-D)



aus Schieber 2015

Wo Ton ist, sind Silt und Sand nicht weit...



Neben dem Sedimenttransport spielen allogene Prozesse (wie Meeresspiegel und Klimaschwankungen) eine große Rolle:

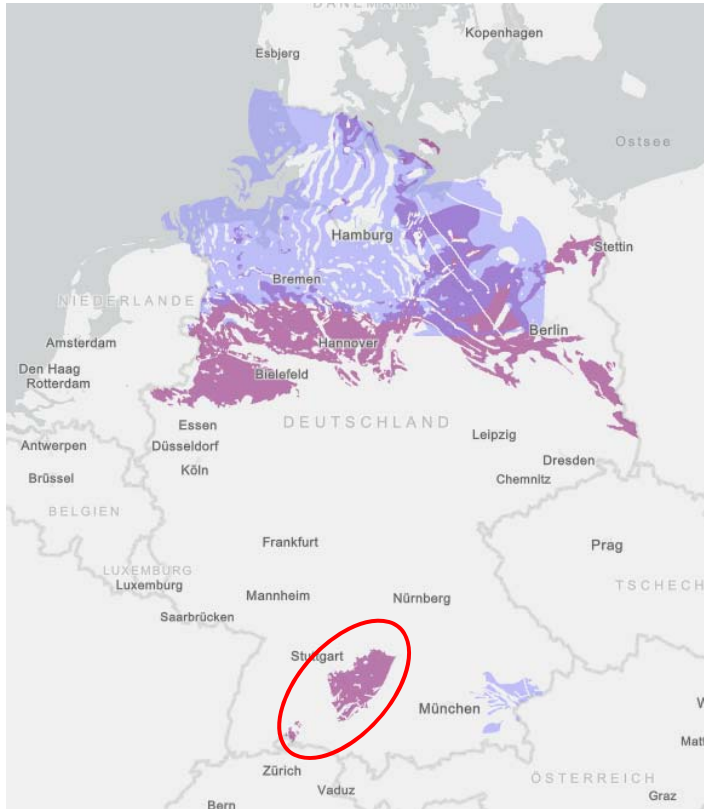
- Heterogenität von Barrieregesteinen (Korngröße, Lithologie, etc.)
- Verzahnung von Speicher- und Barrieregesteinen
- Einfluss auf Porosität und Permeabilität

Wo Ton ist, sind Silt und Sand nicht weit...



Take-Home-Message 2: Korngrößenschwankungen werden durch Meeresspiegel und Transportprozesse definiert (Heterogenität)

Tonreiche Wirtsgesteine in Deutschland



Die Sedimentationsgeschichte bestimmt die Heterogenität des Wirtsgesteins Ton.

Wissen wir genug über die Sedimentationsgeschichte der Tongesteine in Deutschland?

Take-Home-Message 3 vorweg: : Nein!

www.bgr.de (15. April 22)

Potenzielle Wirtsgesteine in Deutschland: Bsp.: Aalenium (Mitteljura, Opalinuston-Formation in Süddeutschland)



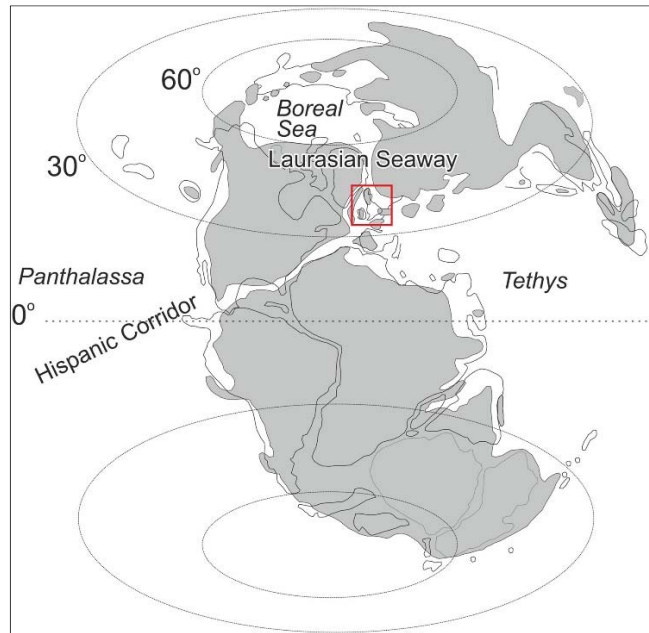
Opalinuston-Fm., Aubächle bei Blumberg (Wutachgebiet, BW)



5 cm

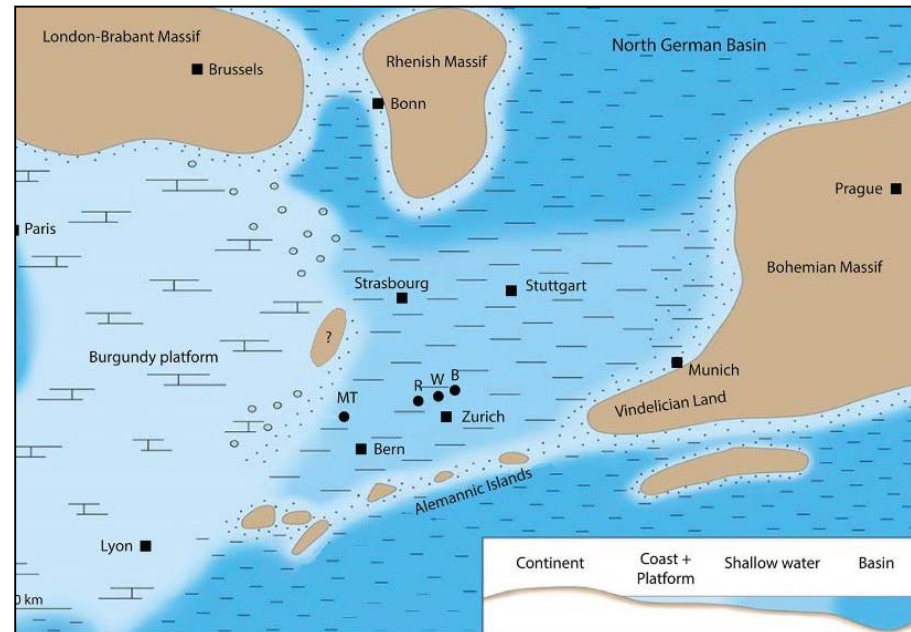
Opalinuston-Fm., Bhrg. SEPIA-Röttingen (Ostalbkreis östl. Aalen, BW)

Potenzielle Wirtsgesteine in Deutschland: Bsp.: Aalenium (Opalinuston-Formation)



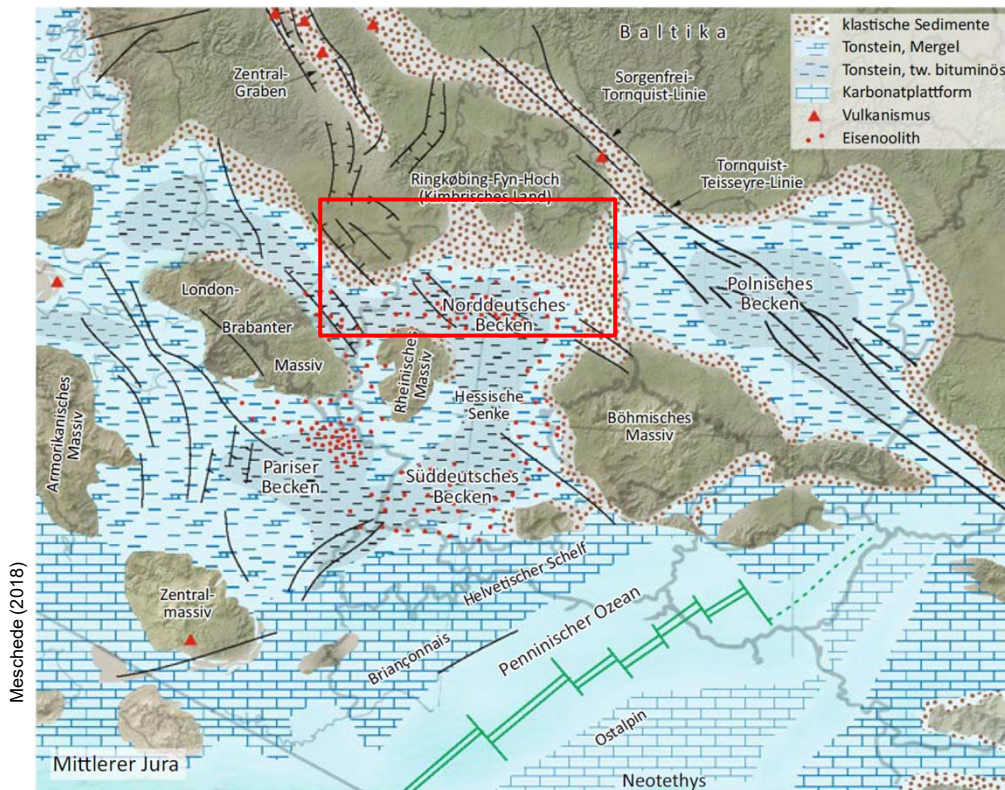
Pieńkowski et al.
2021

- **Flaches, epikontinentales Meer** in Europa
- Ablagerung von **Tonsteinen im Beckenzentrum**



Lauper et al. 2021

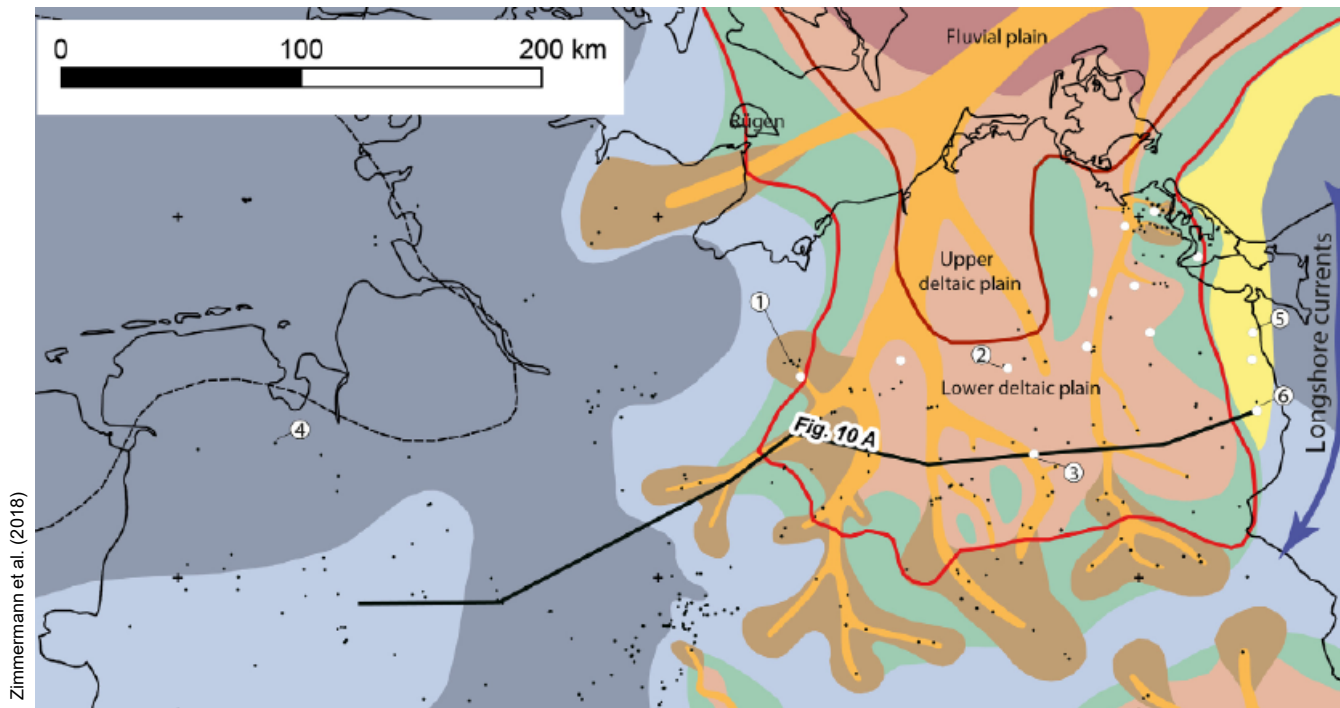
Potenzielle Wirtsgesteine in Deutschland: Bsp.: Aalenium (Opalinuston-Formation)



Mittlerer Jura:

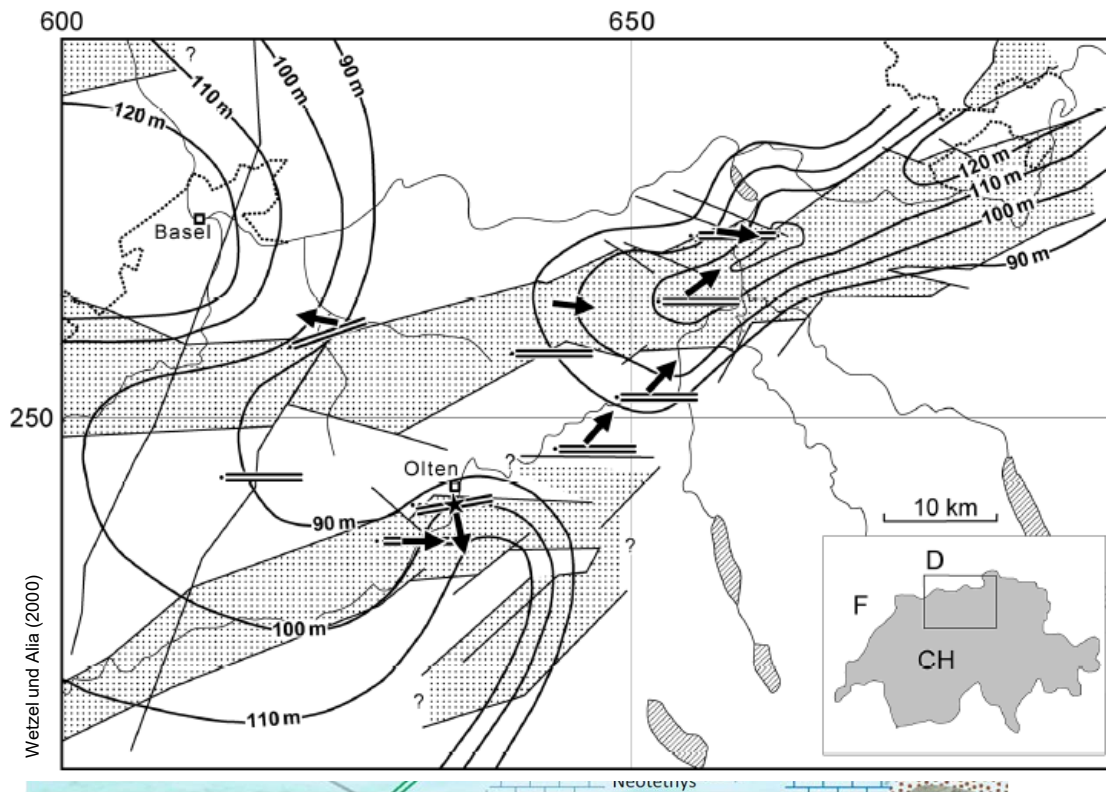
- Transgression aus Süden und Hebung im Norden
- Flaches Meer über Mitteleuropa
- Tonsteine im Beckenzentrum und Oolithe und Sandsteine an den Küsten

Aalenium in Norddeutschland



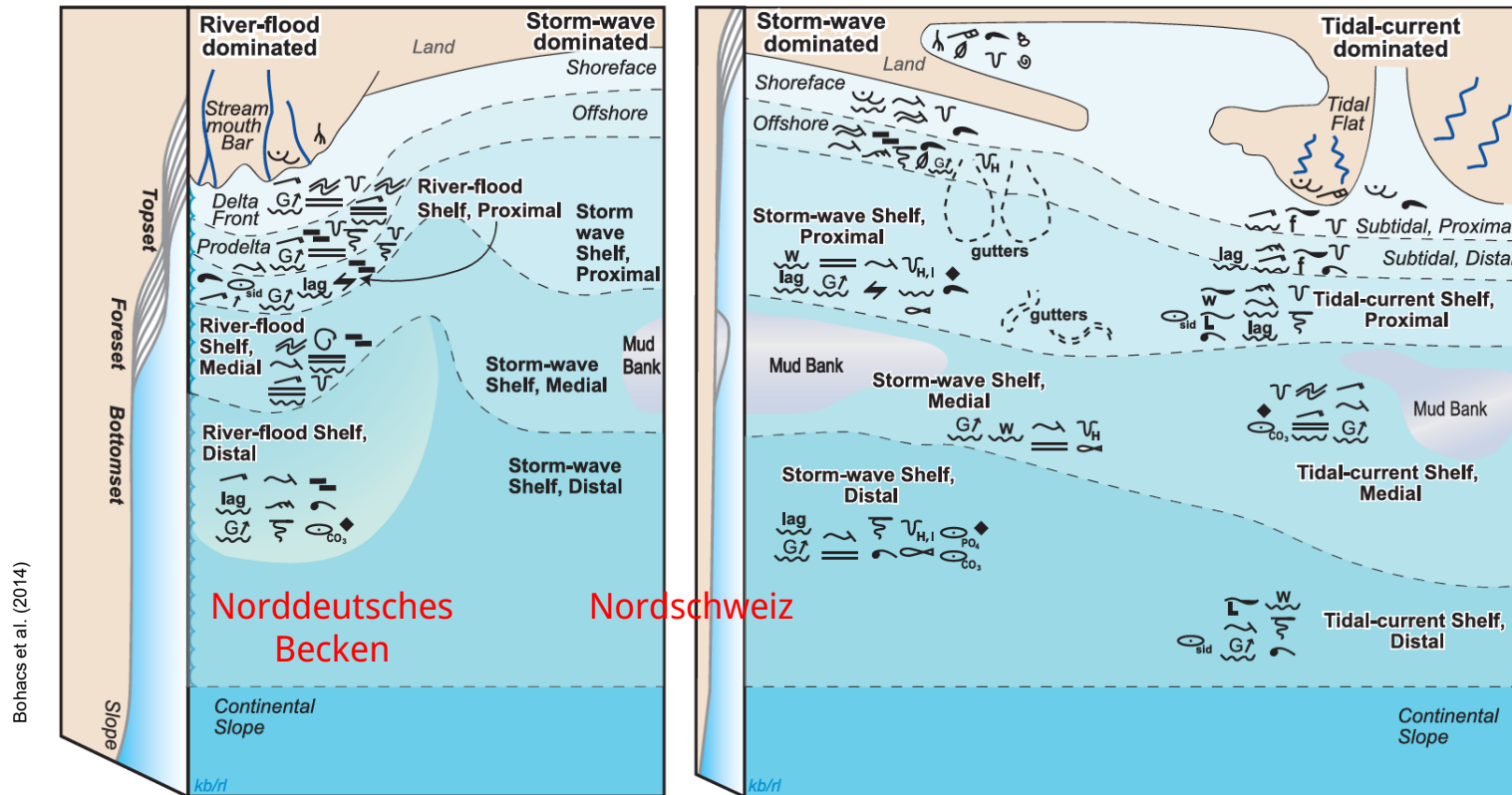
- Gute Vorstellungen über Faziesverteilung
- Moderne Ablagerungsmodelle
 - Ablagerung im Einflussbereich eines großen Flußdeltas
- Schüttung aus Norden von Fennoskandia (Skandinavien, Baltikum)

Aalenium in der Nordschweiz

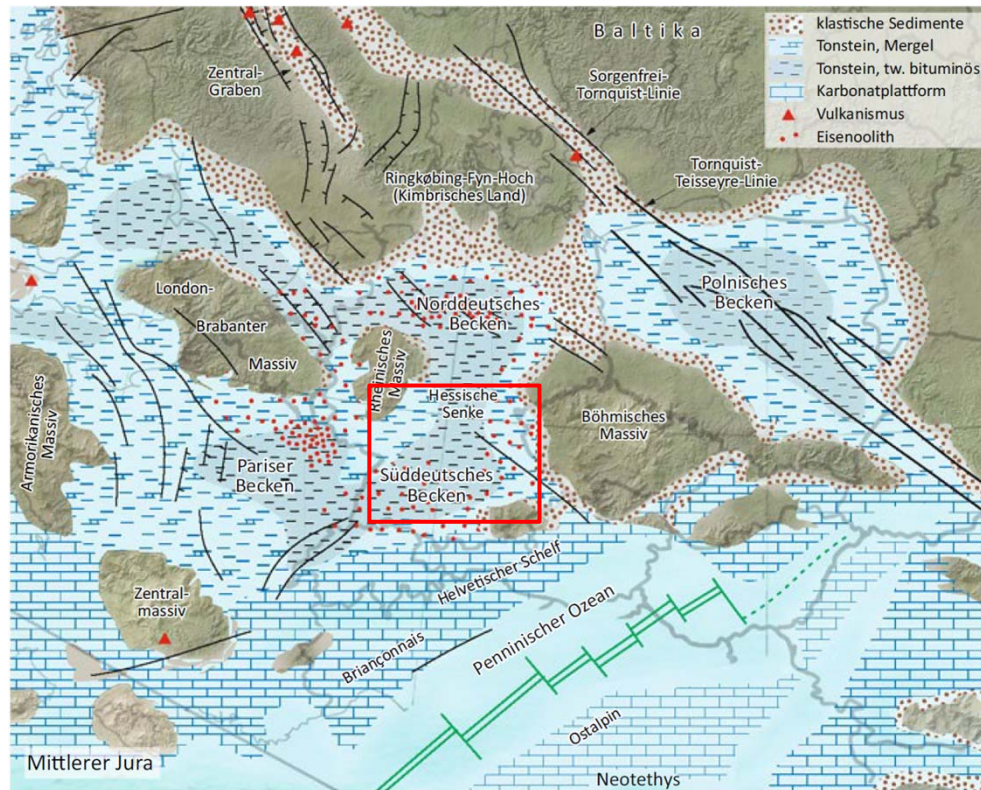


- Gute Vorstellungen über Faziesverteilung
- Moderne Ablagerungsmodelle
 - Starke Beeinflussung der Ablagerungen durch Stürme
- Transport durch sturminduzierte Wellen in Richtung der Depozentren

Der Untere und Mittlere Jura in Süddeutschland

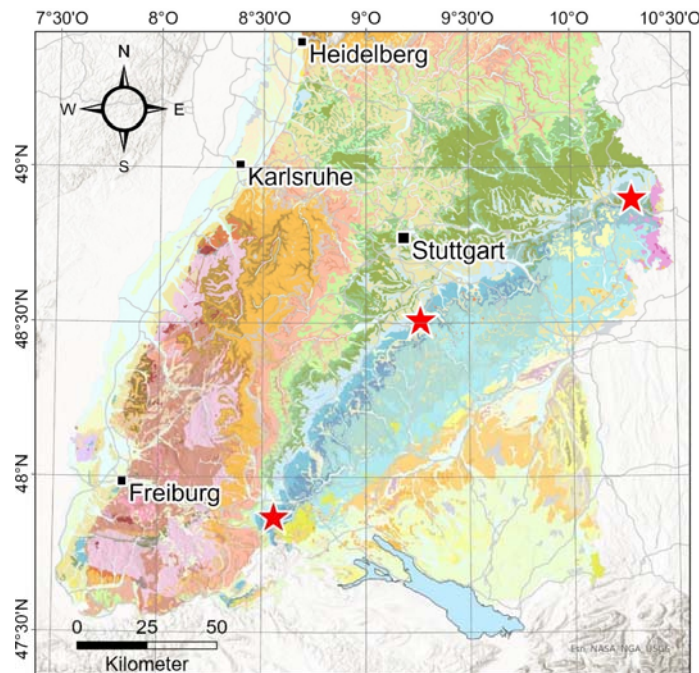


Aalenium in Süddeutschland?

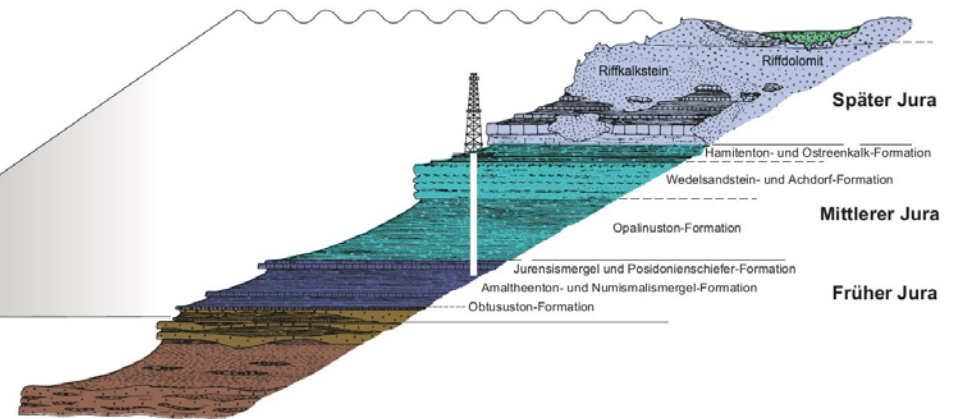


Meschede (2018)

SEPIA - Sequenzstratigraphie im Aalenium von Süddeutschland

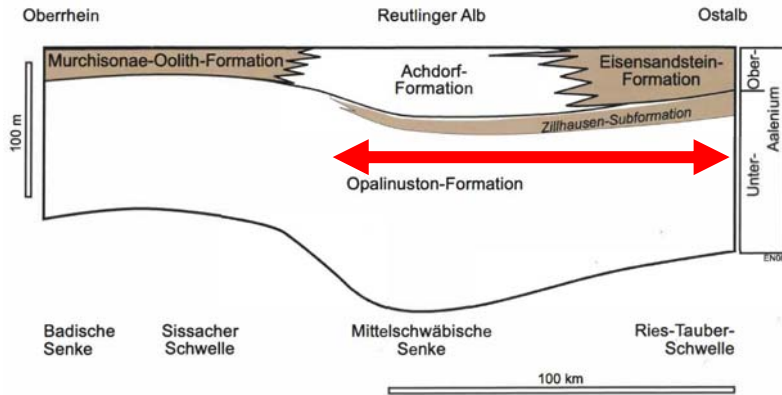


ÄRA	MILLIARDE JAHRE VOR HEUTE	PERIODE
ERDNEUZEIT	2,6	QUARTÄR
		TERTIÄR
ERDMITTELALTER	65	KREIDE
	142	JURA
	203	TRIAS



- Selten an der Erdoberfläche aufgeschlossen aufgrund der weitestgehend tonigen Lithologie
- 3 neue Forschungsbohrungen in Baden-Württemberg

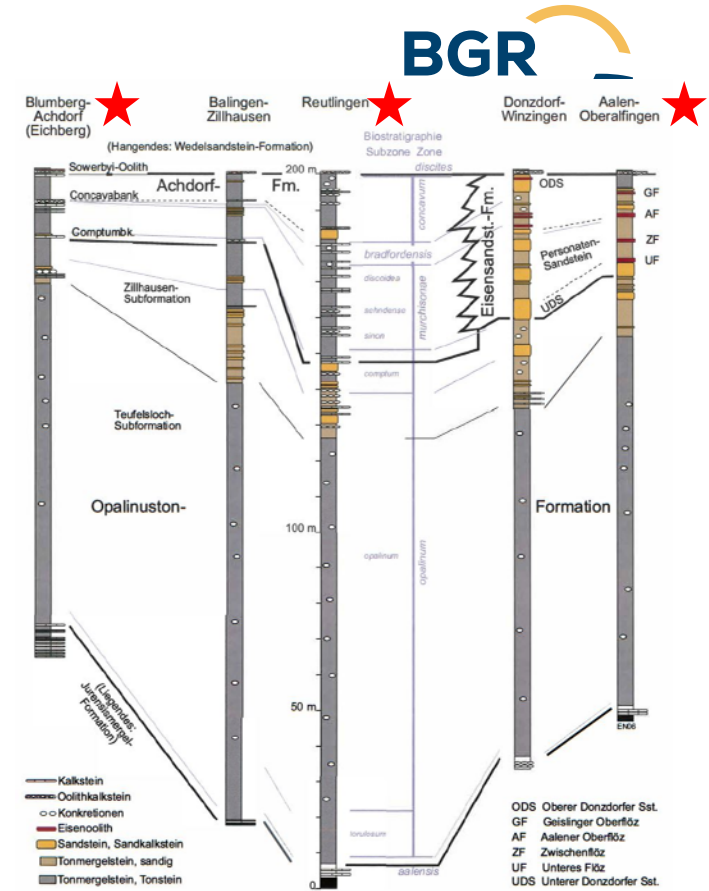
Lithostratigraphie des Aaleniums in



Franz & Nitsch (2009)

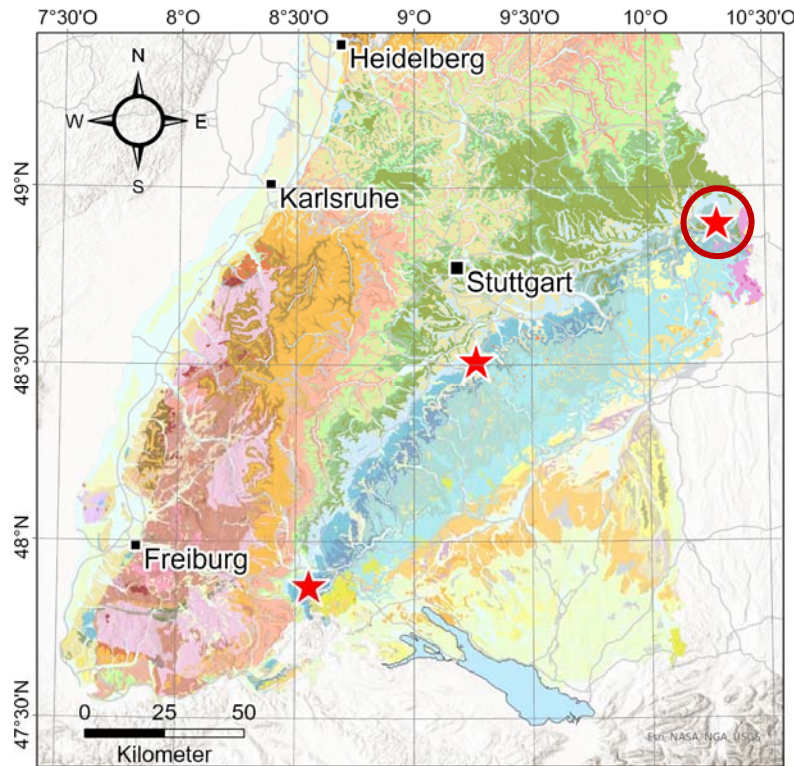
ZIELE

- Identifizierung der Heterogenität in visuell sehr homogenen Tonsteinabfolgen
- Entwicklung sequenzstratigraphischer Modelle und besseres Verständnis der Ablagerungsprozesse
- Untersuchung der vertikalen und horizontalen faziellen Variabilität von Barriere- bzw. Wirtsgesteinen im Süddeutschen Becken

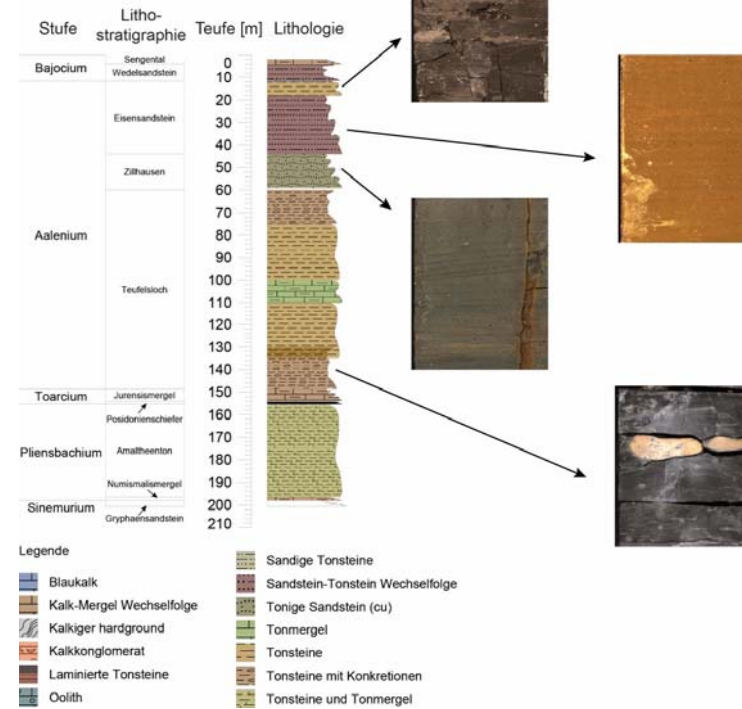


Franz & Nitsch (2009)

Ergebnisse - Lithofazies Röttingen



WMS LGRB-BW GÜK300

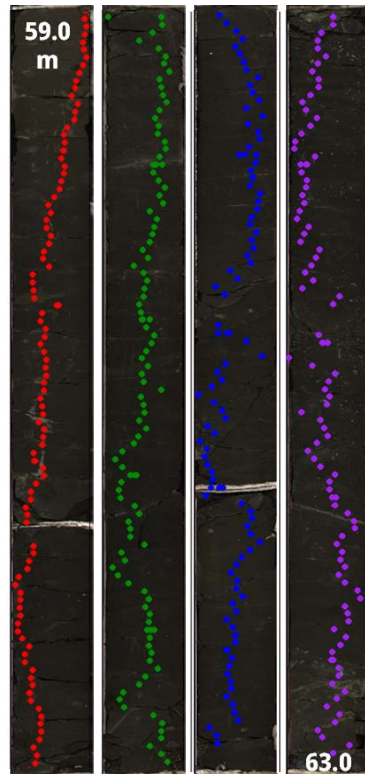


Ziel: Heterogenität tonreicher Wirtsgesteine (hier am Bsp. Opalinuston-Formation) zu beschreiben und deren Genese zu verstehen

XRF-Bohrkernscanner



Zuckerfabrik 2

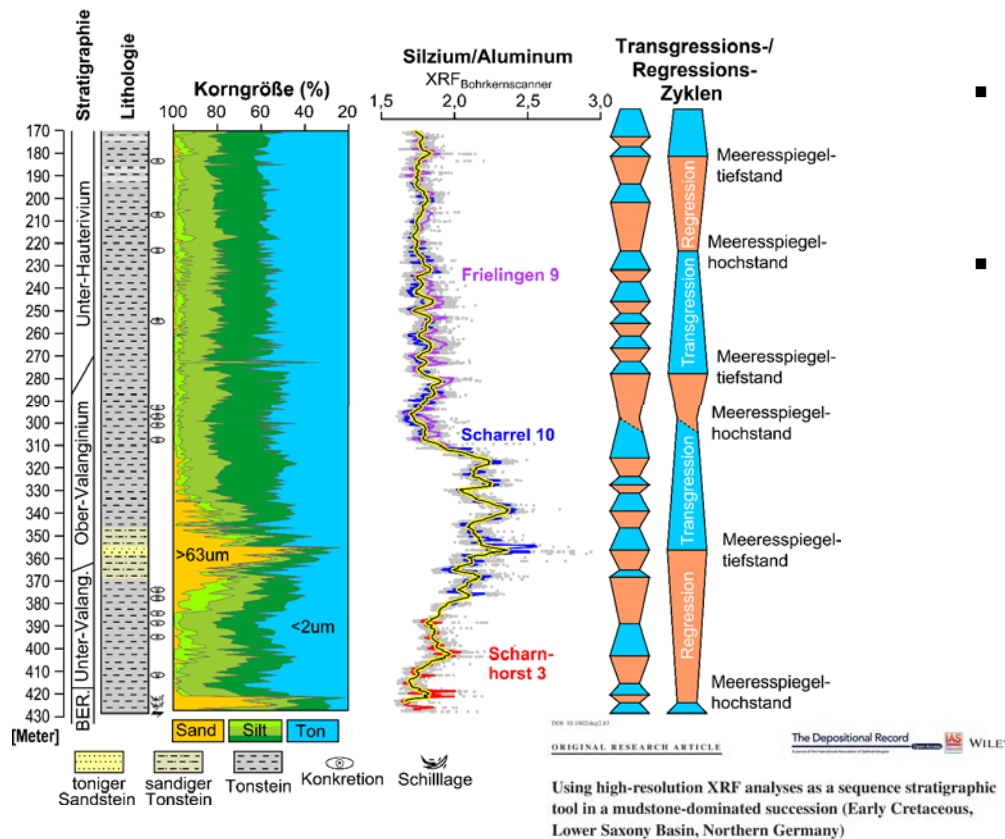


Ca/Ti K/Ti Si/Al Si/Ti

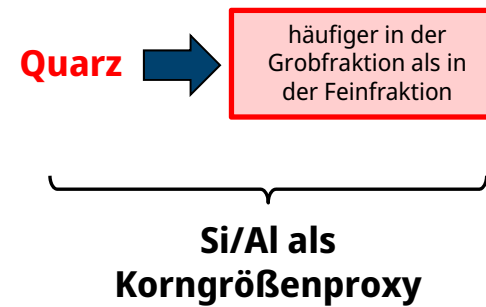
Zerstörungsfreie Methode zur Bestimmung der Elementzusammensetzung von Sedimentkernen



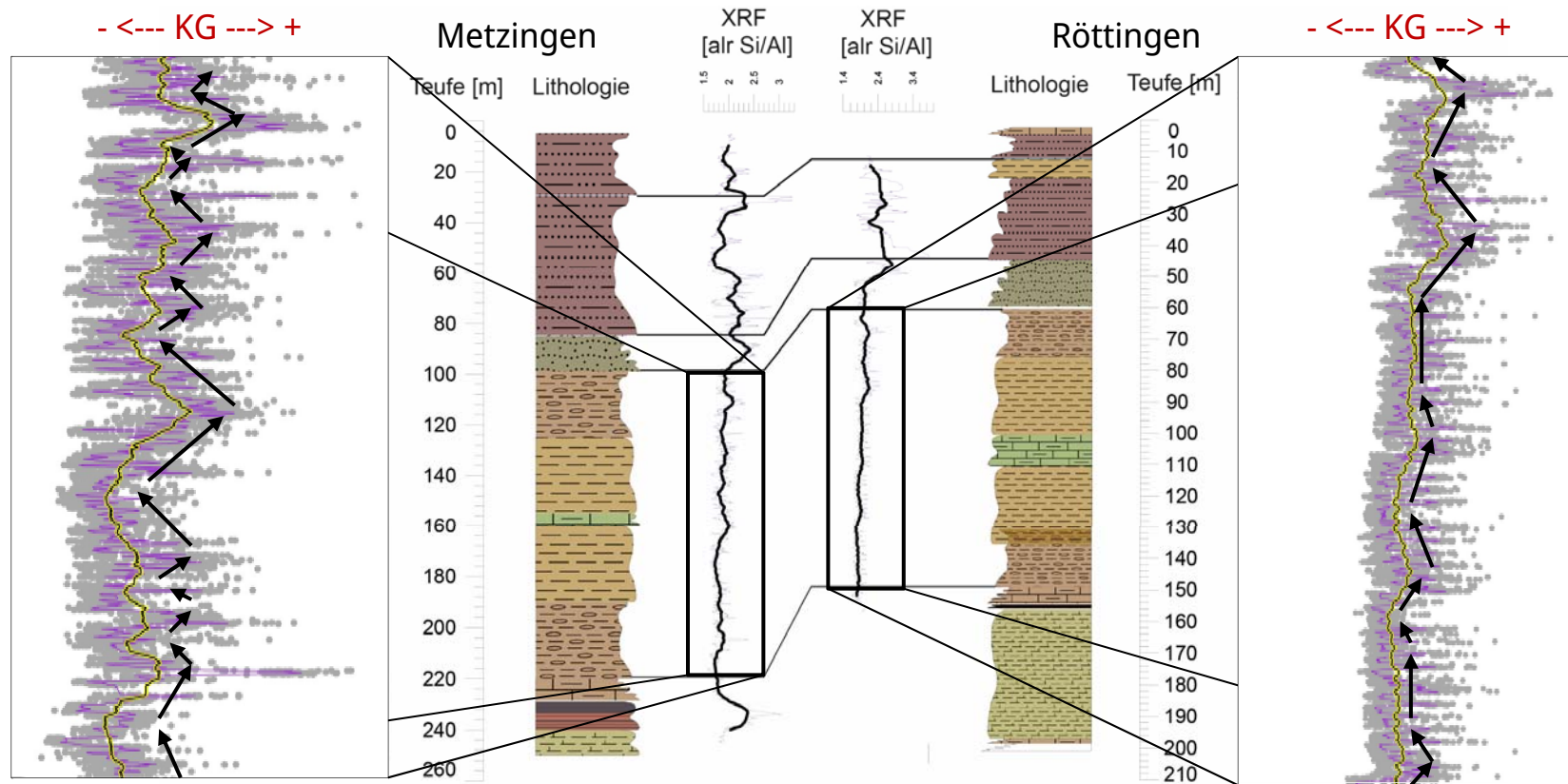
Wie können Heterogenitäten in Tonsteinen identifiziert werden?



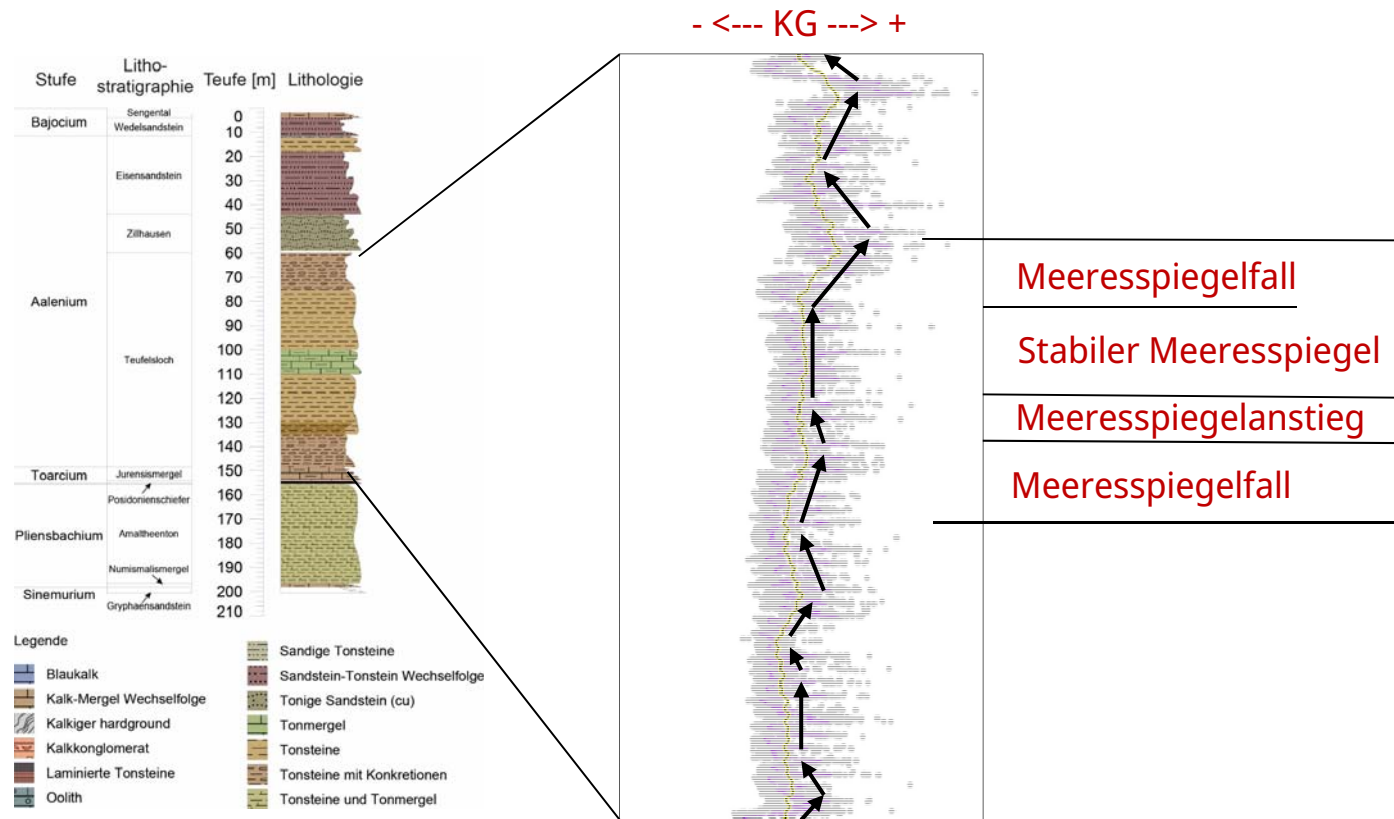
- Korngrößenänderungen sind ein wichtiger Bestandteil für die Rekonstruktion von Ablagerungsbedingungen
- Si/Al repräsentiert das Verhältnis von Quarz (Si-reich) zu Ton (Al-reich) in feinkörnigen, siliziklastischen Sedimenten

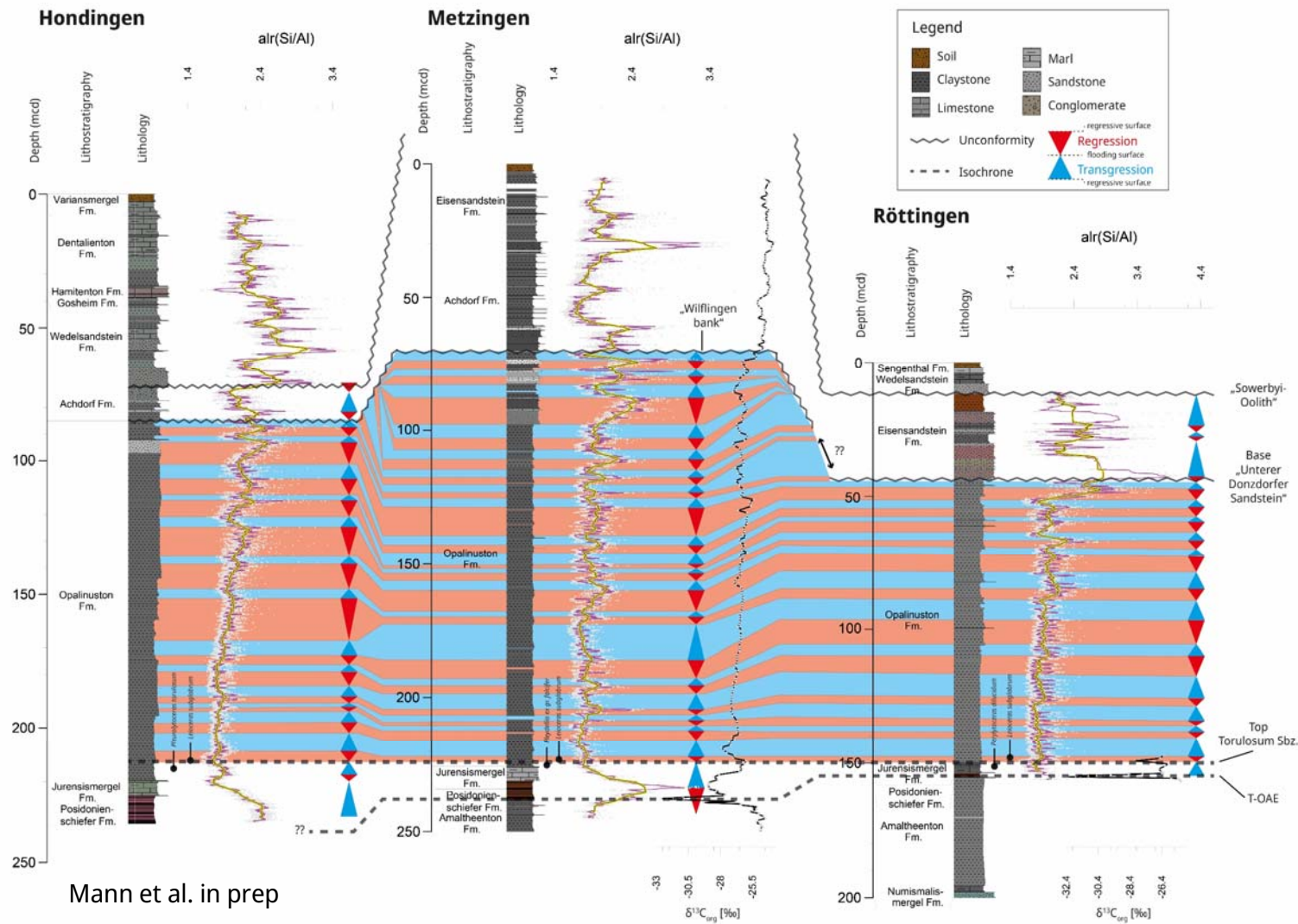


Ergebnisse – Geochemische Variabilität = Korngrößenveränderungen



Ergebnisse – Geochemische Variabilität





Mann et al. in prep

Zusammenfassung und Ausblick

- Die moderne Sedimentologie liefert wichtige Hinweise auf beckenweite Mindestmächtigkeiten sowie auf die Verbreitung und fazielle Heterogenität innerhalb von Tonsteinabfolgen:
 - Ausschlusskriterien, Mindestanforderungen und Abwägungskriterien bei der Suche nach einem Endlager für hochradioaktive Abfälle

- Um unterschiedliche Einflüsse voneinander unterscheiden zu können wird das fazielle Gerüst mit weiteren Daten und Analysen (XRD, Porosität, Paläontologie, Provenienz, etc.) untermauert.

Take-Home-Message 4: Sedimentologie, Faziesinterpretation und Stratigraphie (Sequenzstratigraphie) sind Grundvoraussetzungen für die weiteren Untersuchungen von Wirtsgesteinen in den Teilgebieten. Sie ermöglichen eine Vorhersage zur Geometrie von Tongesteinskörpern, zu Korngrößenvariationen und zur Verzahnung mit „ungeeigneten“ Gesteinen (Sandsteinen und Karbonaten).

Heterogen – „na und?“

Welchen Einfluss hat die beschriebene Heterogenität auf die Eignung eines Gesteinskörpers als Wirtsgestein?

Tonsteine als Wirtsgesteine



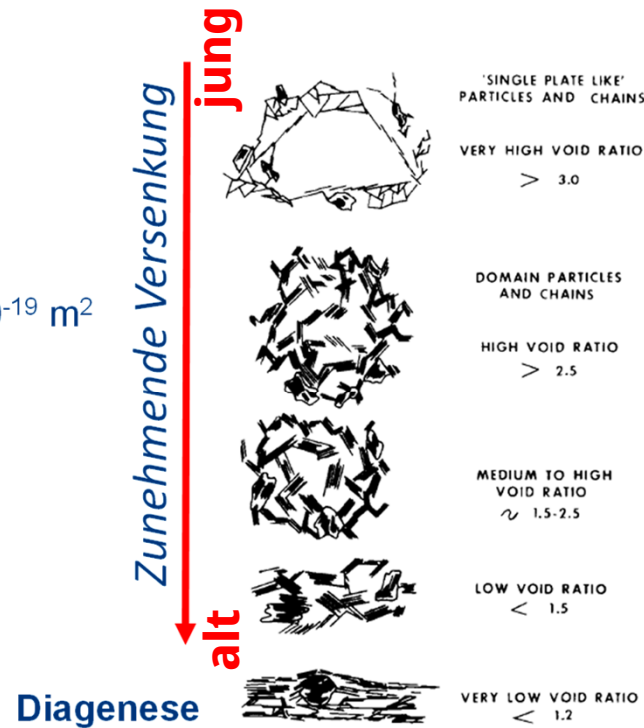
Neben geologischen Bildungsbedingungen ist auch die Versenkungsgeschichte wichtig

- Ton (mudstone)**

 - glacial till (surface) $10^{-17} - 10^{-19} \text{ m}^2$
 - plastic clay (overconsolidated) 10^{-19} m^2
- Tonstein (shale)**

 - clayshale $10^{-20} - 10^{-21} \text{ m}^2$
- Schiefer (schist)**

 - schist 10^{-22} m^2



USDA-NRCS

Horseman et al. (1996)

Bennet (1977,1989)

Tonsteine als Wirtsgesteine



relevante Tonwirtsgestein-Eigenschaften?

Mechanische Festigkeit/Stabilität

Thermische Leitfähigkeit

Paläotemperatur (maximale T-load)

Porosität / Permeabilität (hydraulische Leitfähigkeit)

Kolloidabspaltung

Mikrobiologie

Quellfähigkeit

Verformbarkeit

Sorptionsvermögen (Schadstoffrückhaltepotential)

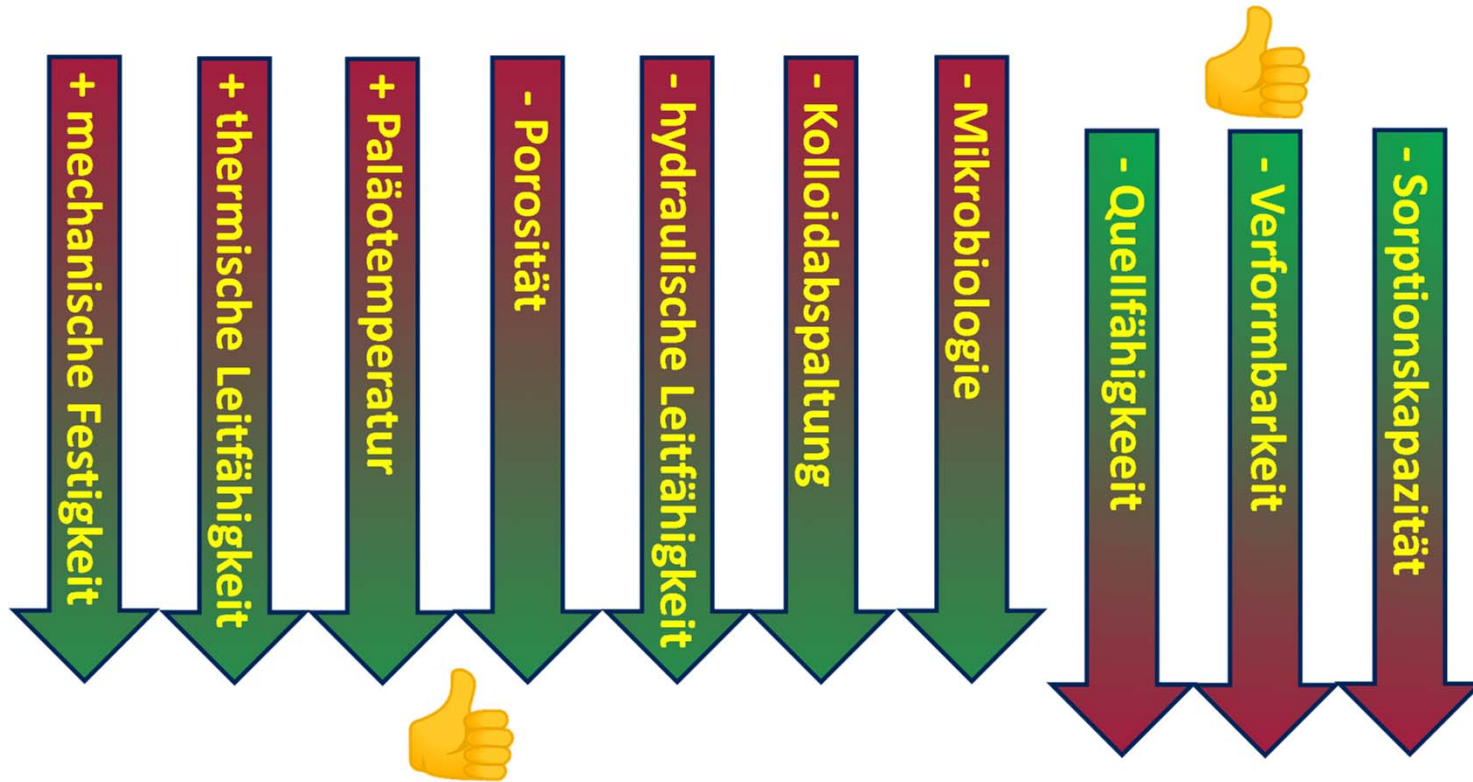
Abhängigkeit vom Alter (Versenkungstiefe / Diagenese)?

Tonsteine als Wirtsgesteine

Wirtsgestein-relevante Parameter und Diagenese

jung

alt



Tonsteine als Wirtsgesteine

Mechanische Festigkeit (Stabilität des Grubengebäudes)

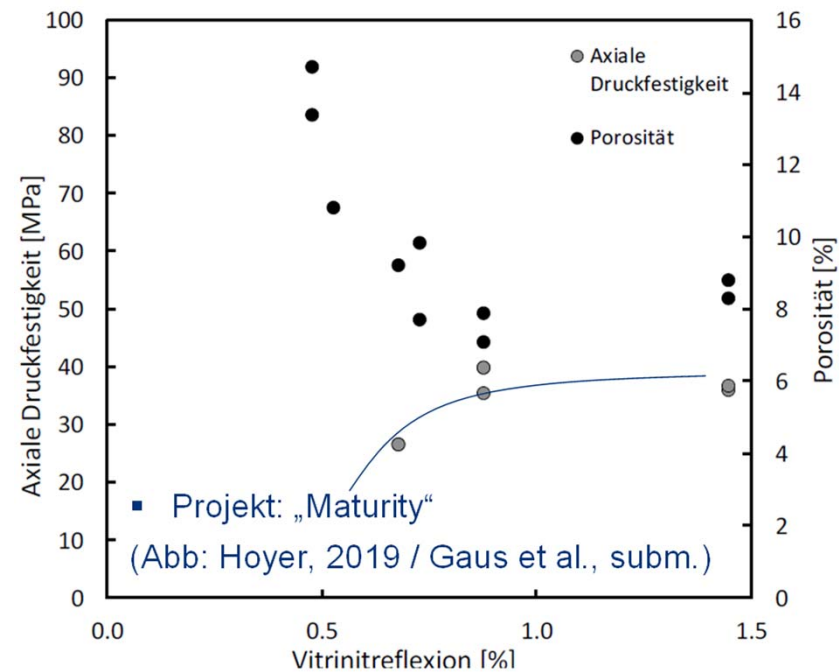
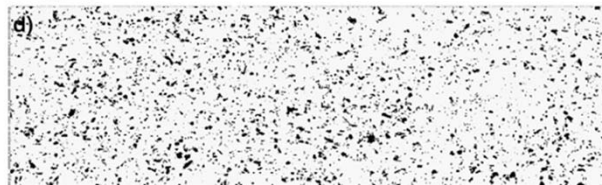
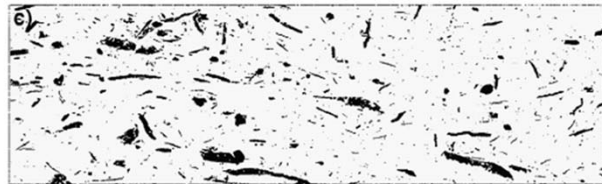
Bei geringer Versenkung starke Abhängigkeit von Versenkungstiefe

Bei hoher Kompaktion:
Gefüge und mineralogische Zusammensetzung



Influence of carbonate microfabrics on the failure strength of claystones

M. Klinkenberg ^{a,b,*}, S. Kaufhold ^a, R. Dohrmann ^a, S. Siegesmund ^b



Tonsteine als Wirtsgesteine



Thermische Leitfähigkeit (Abfuhr der Wärme, Auslegung des Endlagers)

Bei Wassersättigung hängt thermische Leitfähigkeit von Porosität ab

Porosität sinkt mit zunehmender Versenkung, daher steigt die thermische Leitfähigkeit

Quarz	3 - 8 W/Km (anisotr.)	
Luft	0.03...	
Wasser	0.6 W/Km	Blackwell & Steele (1989)
Illit	~ 1.9 W/Km	
„Shale“	1.0 – 1.5 W/Km	

Tonsteine als Wirtsgesteine

Paläotemperatur (Grenztemperatur im Endlager, Kapazität)

Die höchste Temperatur, die das Gestein in seiner Geschichte jemals erlebt hat

Beste Parameter um Grenztemperatur festzulegen

Mit zunehmender Versenkungstiefe steigt T_{\max} (allerdings nicht in jedem Becken gleich)

- **Schweiz: Paläotemperatur 75 - 100°C (Mt. Terri: 80°C)**
Mazurek et al., 2006; Bossart et al., 2017
- **Frankreich: Paläotemperatur 40°C**
 T_{\max} auf 70°C festgelegt (basierend auf Modellierung; Delay et al. 2010)

Hilsmulde (D): Beispiel für geothermische Anomalie

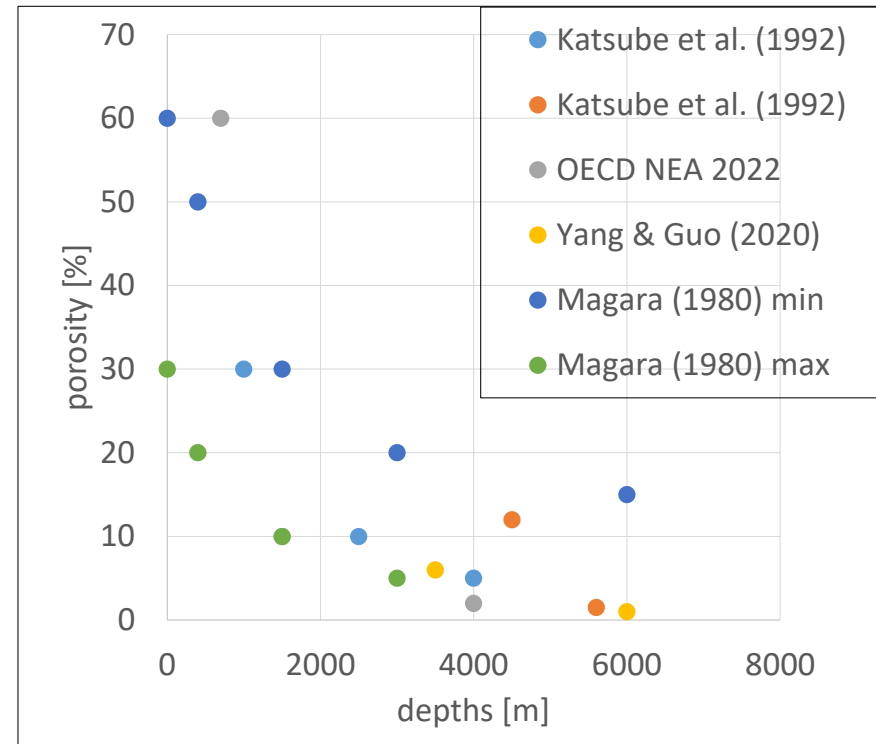
Tonsteine als Wirtsgesteine



Porosität/Permeabilität/hydraulische Leitfähigkeit (Dichtigkeit)

Mit zunehmender Versenkung weniger Porosität

Bei ca. 4 km Versenkung Annäherung an Grenzwert (Porosität < 15 %)



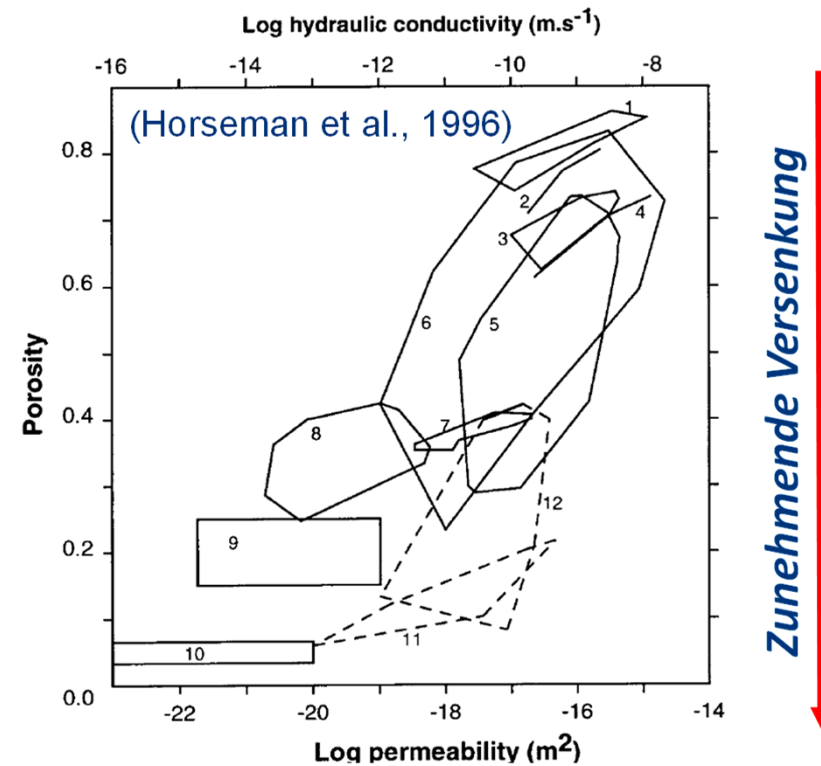
Tonsteine als Wirtsgesteine



Porosität/Permeabilität/hydraulische Leitfähigkeit (Dichtigkeit)

Mit zunehmender Versenkung auch geringere hydraulische Leitfähigkeit

Auch bei Tonsteinen „Poro/Perm“ Beziehung

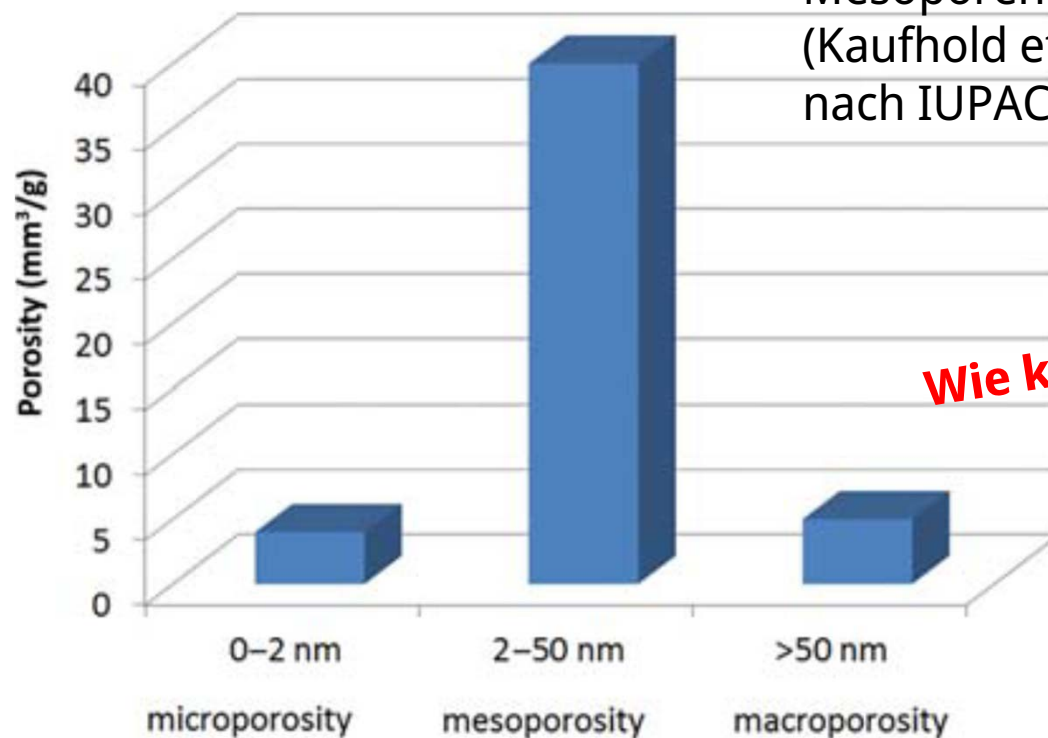


Tonsteine als Wirtsgesteine



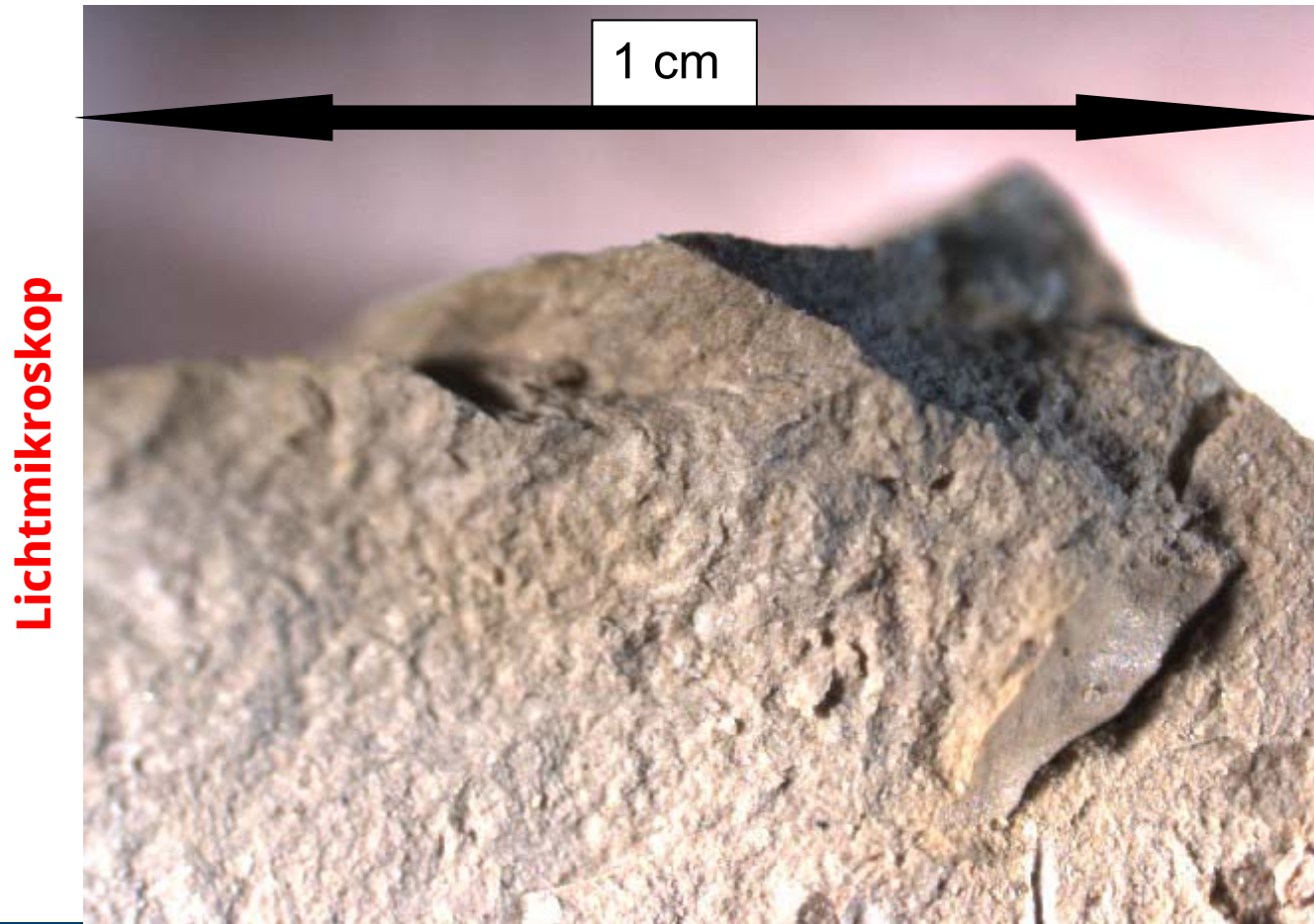
Exkurs: Poren im Tonstein???

- Mesoporen dominieren bei Tonsteinen (Kaufhold et al., 2016) (Porenklassifikation nach IUPAC, 2015)

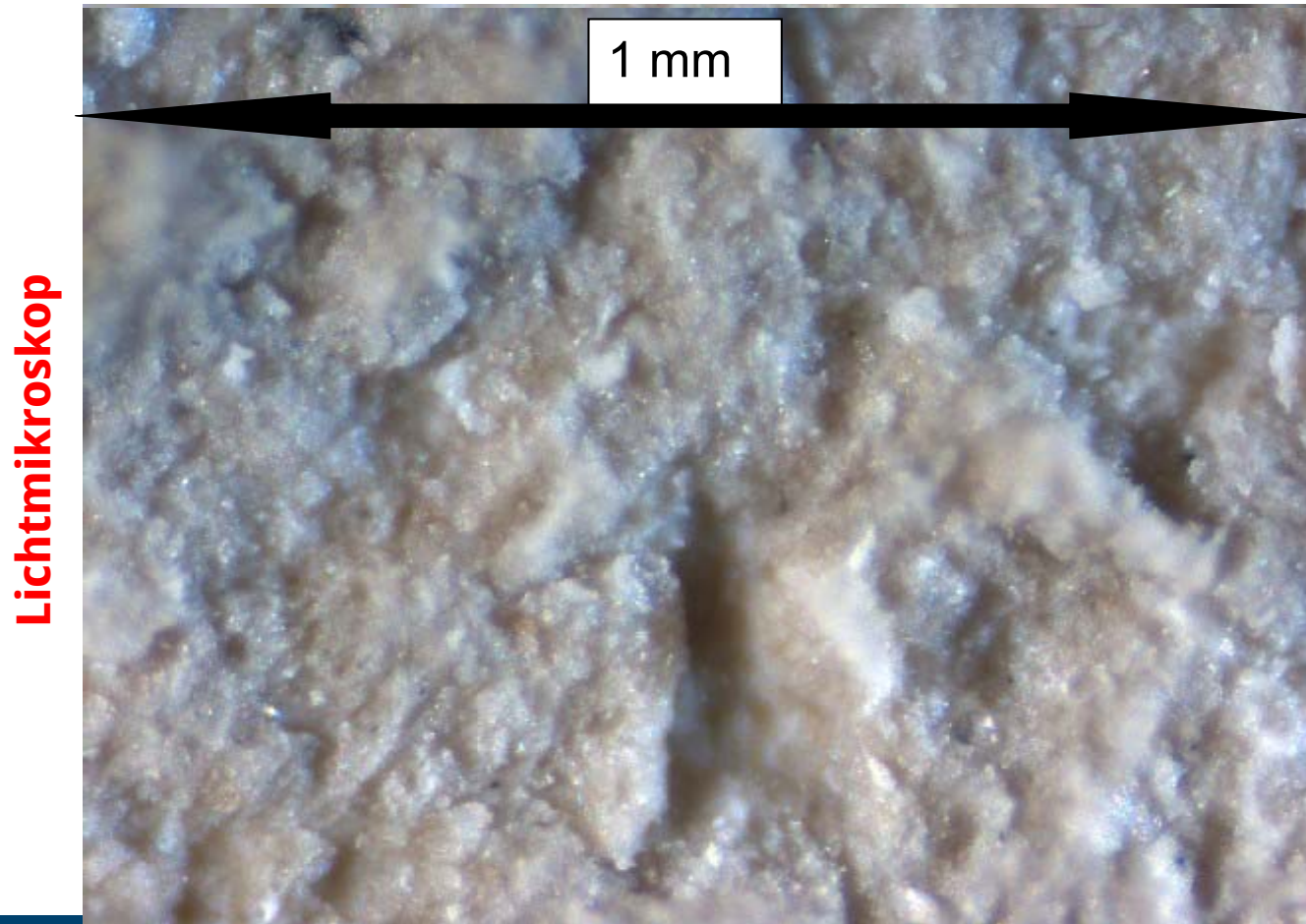


Wie kann man sich das vorstellen??

Tonsteine als Wirtsgesteine



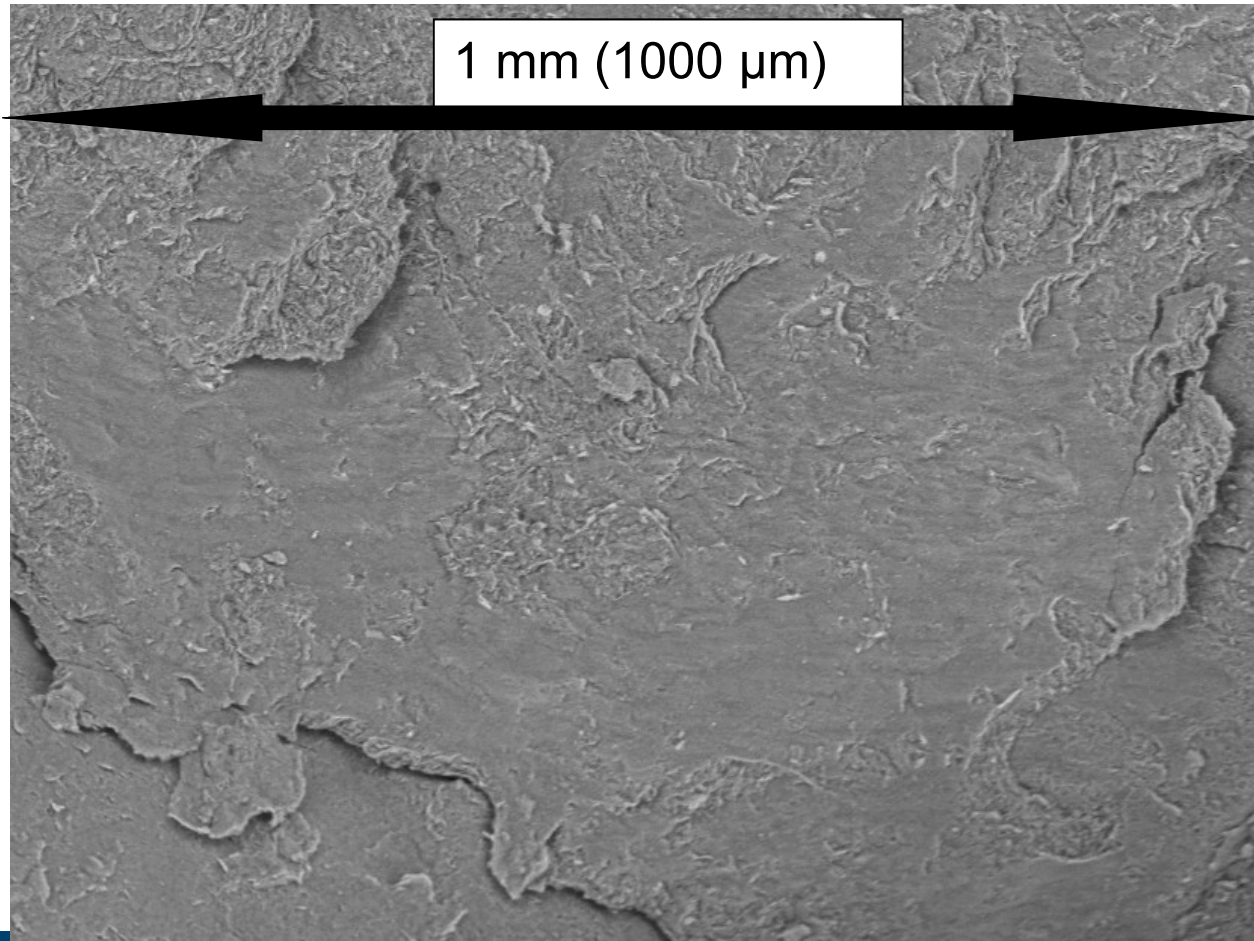
Tonsteine als Wirtsgesteine



Tonsteine als Wirtsgesteine



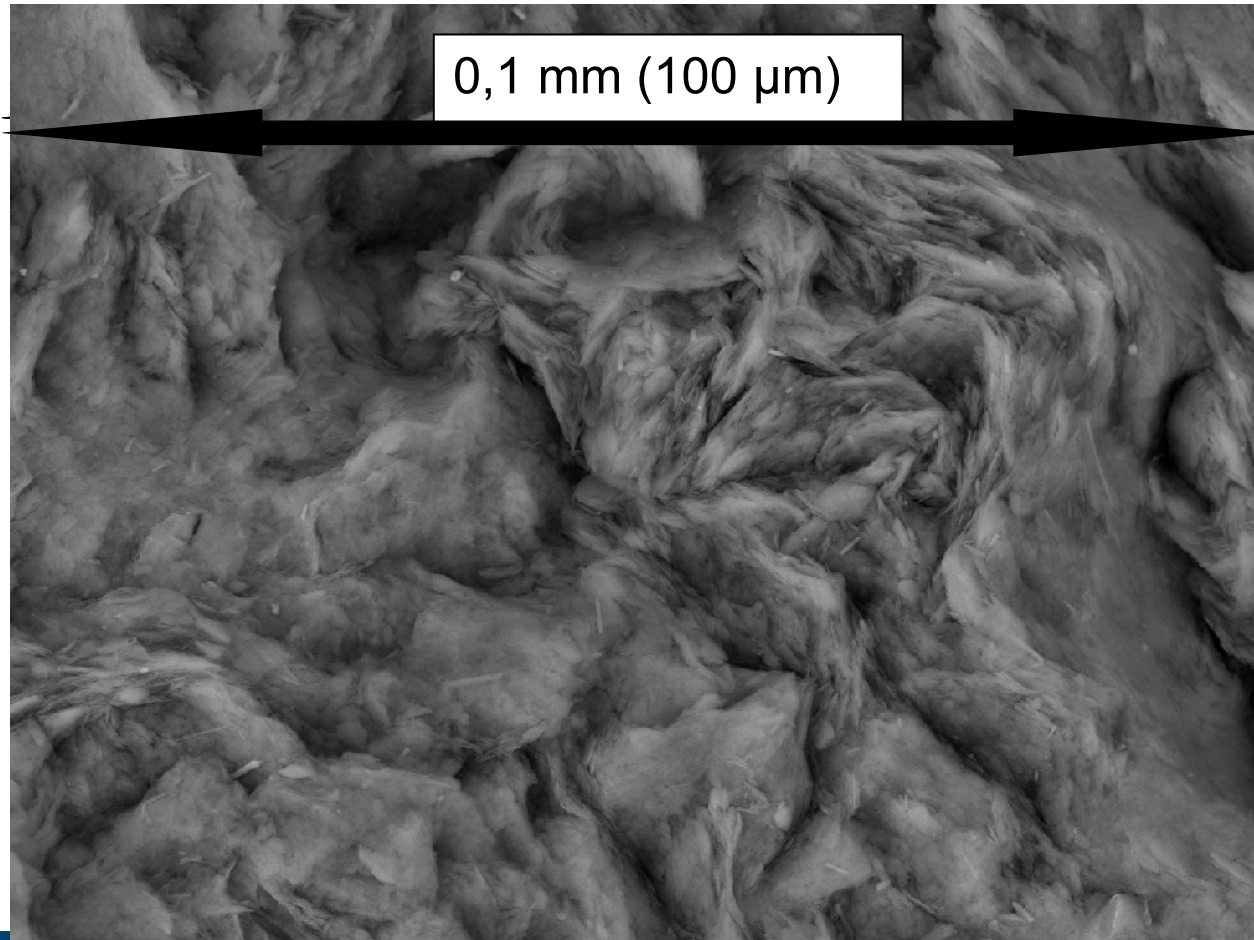
Elektronenmikroskop



Tonsteine als Wirtsgesteine



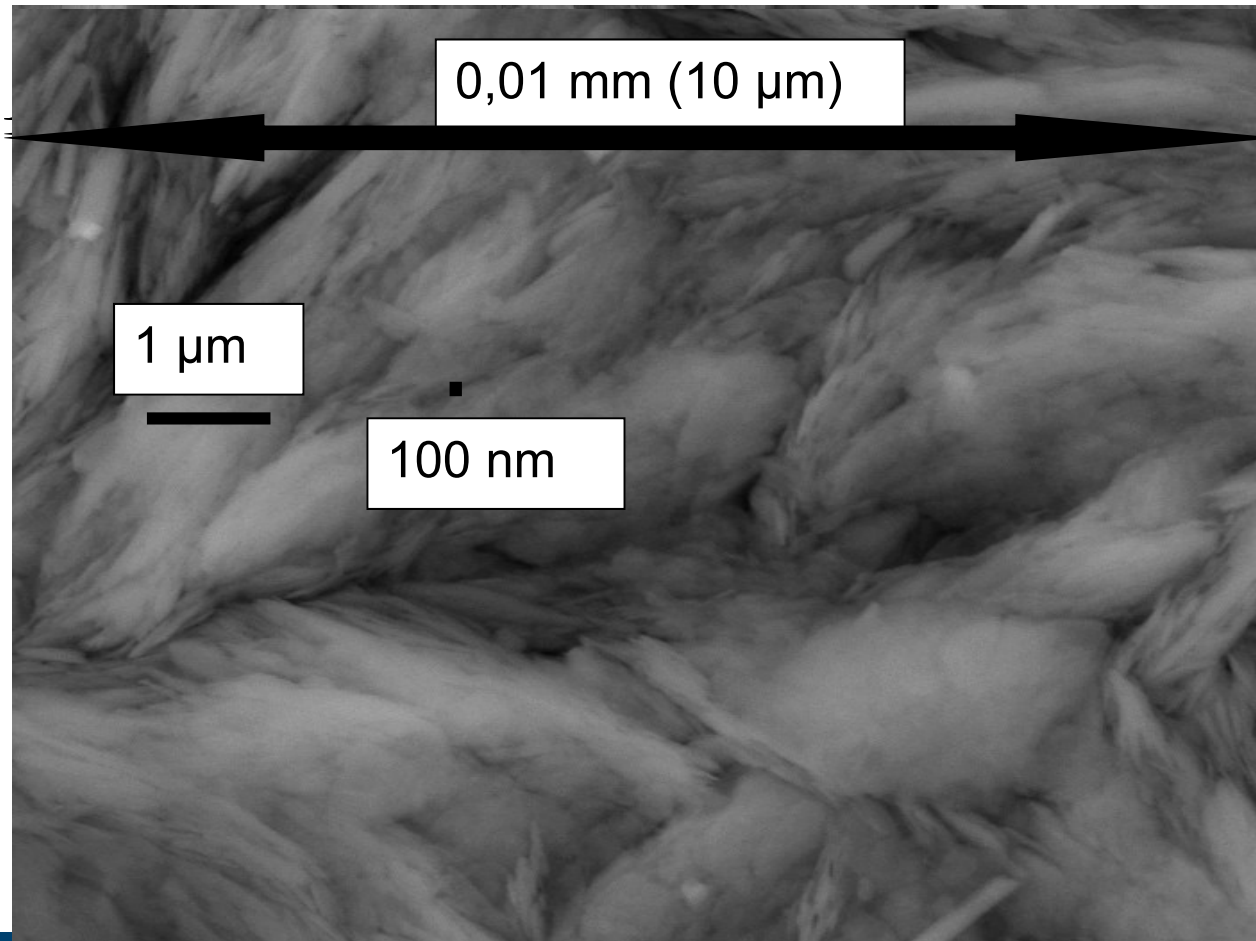
Elektronenmikroskop



Tonsteine als Wirtsgesteine

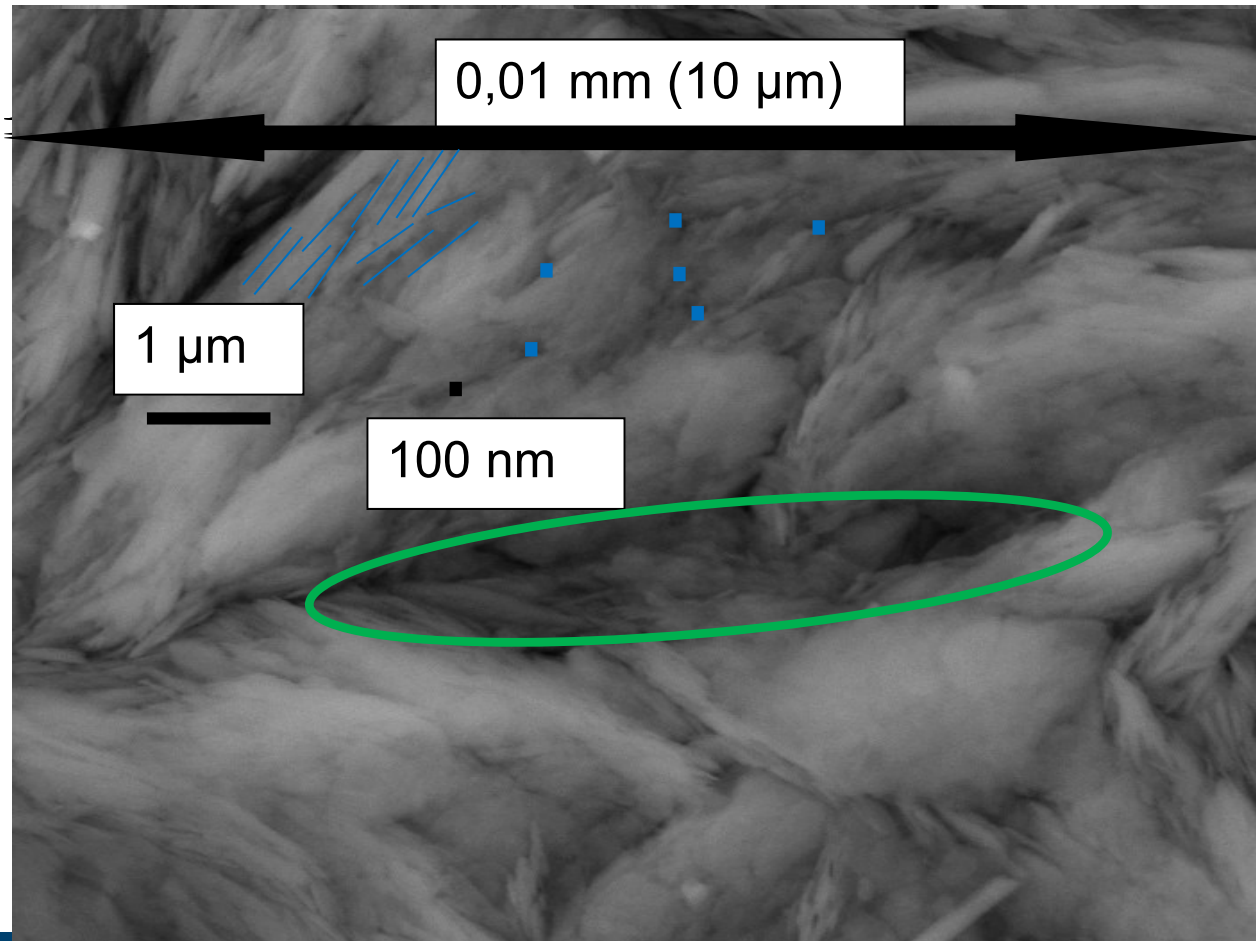


Elektronenmikroskop



Tonsteine als Wirtsgesteine

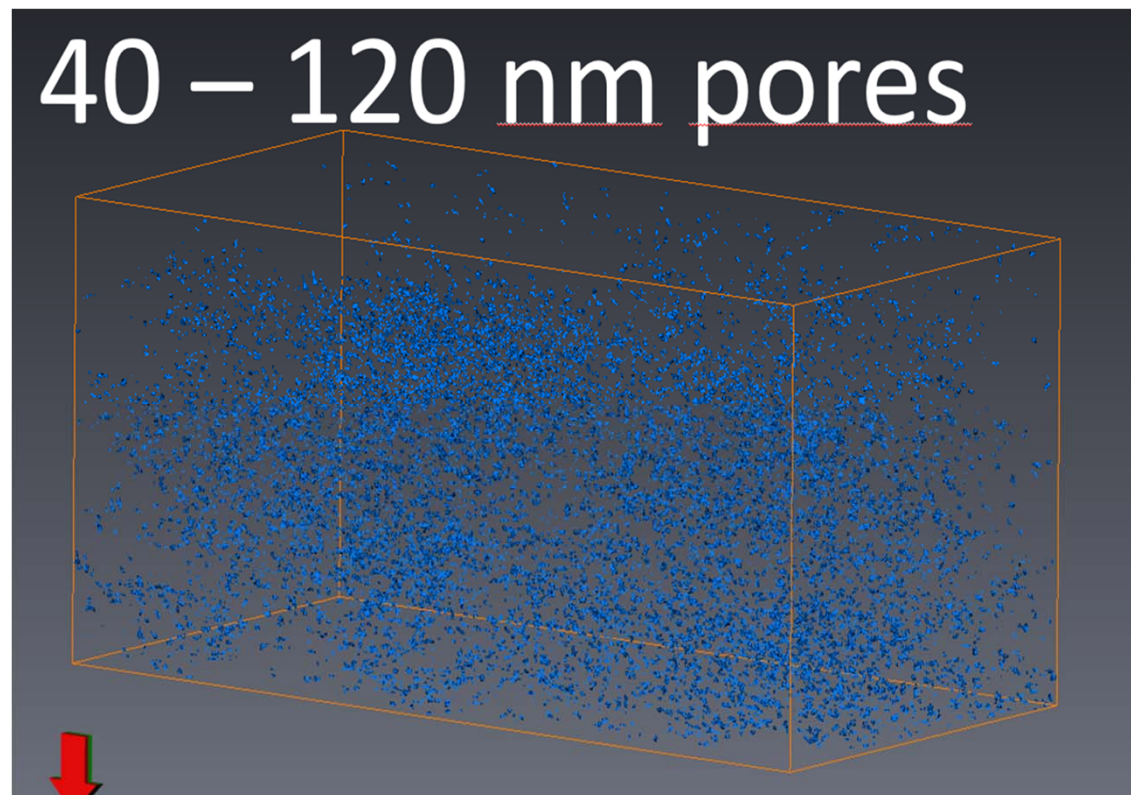
Elektronenmikroskop



Tonsteine als Wirtsgesteine

Nur die kleinsten Poren sind verbunden

**Elektronenmikroskop
(focused ion beam)**



Tonsteine als Wirtsgesteine



Transport in Tonstein hängt nicht (wie beim Sandstein) nur von Porosität ab

4.3.10 Movement of water and ions in shale Horseman et al. (1996)

The difficulties in developing sound, physically-based models of diffusion in compact clay media are most acute in shales, where the interparticle pore spaces are so small that surface charge interactions and viscosity effects are likely to have a dominant effect on mass transport. The effect of electrical potential gradients on ion transport is central to this problem. Assuming that the pore spaces in a shale are sufficiently large for diffuse ion-swarms to form, the question arises as to whether it is possible to develop a model that combines the mathematics of the electrical double-layer (EDL) (see Section 3.8.2) with transport theory.

- 1. Migration von Ionen entlang der Oberflächen
- 2. Migration von Ionen in freier Lösung

Desto geringer die Porosität und der Porendurchmesser, desto weniger wichtig ist 2.
(Projekt „gekoppelte Transportprozesse“, BGR)

Tonsteine als Wirtsgesteine



Kolloidabspaltung (Radionuklidtransport + Bildung sekundärer Porosität)

Die Partikel, die zur Abspaltung von Kolloiden führen können, sind meist freie Smektite

Mit zunehmender Versenkungstiefe nimmt der Anteil von freien Smektiten ab und es bildet sich mehr Illit/Smektit. Zusätzlich wird das Gefüge dichter.

Mit zunehmender Versenkungstiefe daher weniger wahrscheinliche Kolloidabspaltung

Tonsteine als Wirtsgesteine



Mikrobiologie (Gasgenerierung, sekundäre Porosität)

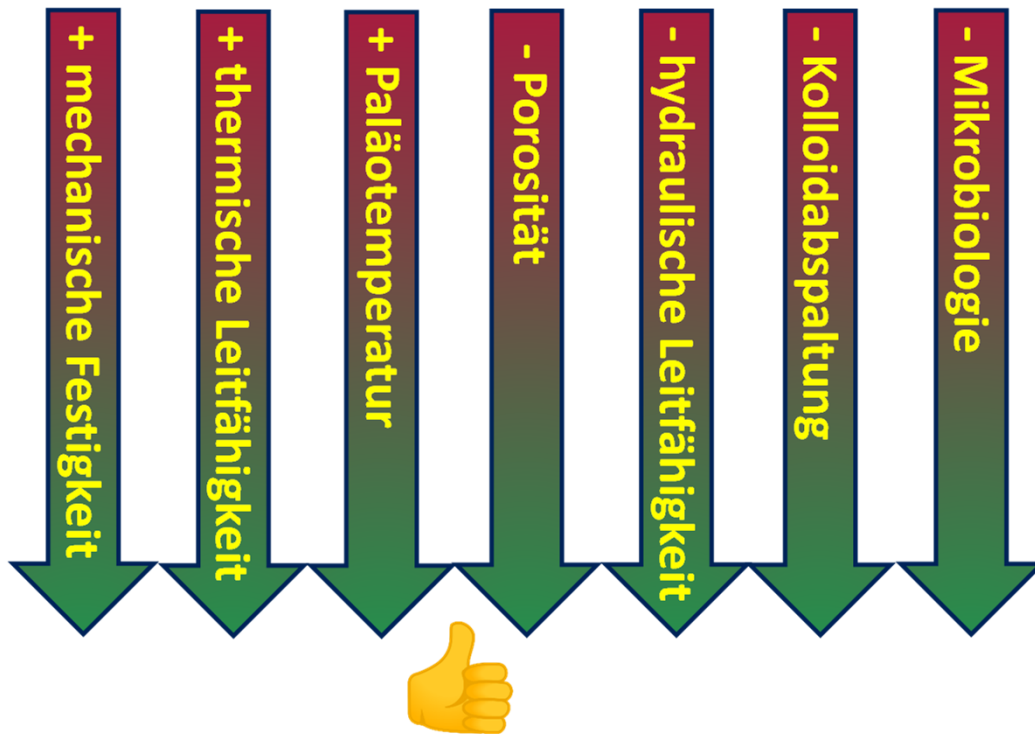
Desto geringer und enger der Porenraum, desto geringer die Wahrscheinlichkeit für das Überleben von Mikroorganismen

Desto höher der Inkohlungsgrad des organischen Materials im Tonstein, desto schwieriger ist es für die Mikroorganismen, dieses zu nutzen (verstoffwechseln)

Tonsteine als Wirtsgesteine



Bisher nur positivere Eigenschaften bei hoher Versenkung



Sind alte Tonsteine immer besser?

Tonsteine als Wirtsgesteine



Bei drei Parametern umgekehrt !!



Quellfähigkeit („Sealing“)

Smektite (Illit/Smt) können mit Wasser quellen und so zB Risse schließen

Verformbarkeit/Duktilität (Rissvermeidung)

Eine gewisse Verformbarkeit ist gegenüber sprödem Verhalten vorteilhaft (Vermeidung von Rissbildung bei mechanischer Beanspruchung)

Sorptionsfähigkeit (Radionuklidrückhaltung)

Smektite besitzen die höchste Ladung und Oberfläche in Tonsteinen und sind daher besonders gute Adsorbenten

Alle drei hängen +/- vom Smektitgehalt ab

Dies kann man für einen „Qualitätsvergleich“ nutzen

Tonsteine als Wirtsgesteine



„Qualitätsvergleich“?

Differenzierung von geeigneten und weniger geeigneten Wirtsgesteinen?

Es wird kaum möglich sein, alle Parameter von allen möglichen Wirtsgesteinen zusammenzutragen

Daher: Verwendung von einfachen aber aussagekräftigen Parametern zur Abschätzung der Versenkungstiefe, thermischen Geschichte und des Smektitgehaltes

Versenkungstiefe/T-Geschichte: Vitritreflexion, Porendurchmesser, Illitkristallinität (Kübler Index)

Smektitgehalt: Kationenaustauschkapazität (KAK)

!! Viele Parameter verhalten sich nicht linear mit zunehmender Versenkungstiefe.

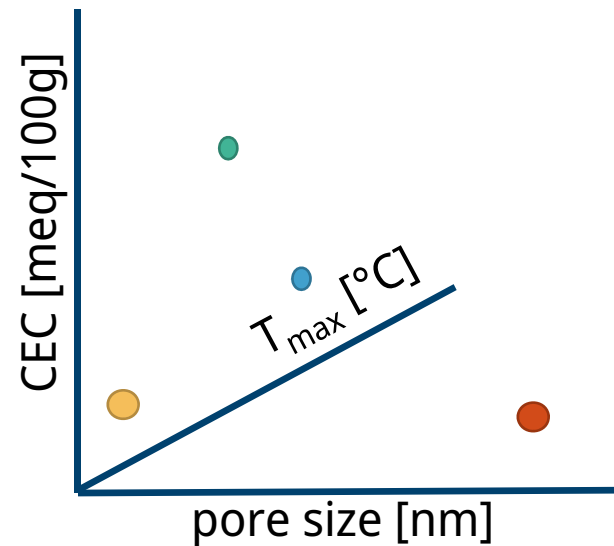
Ab 4 – 6 km wird es ungleich schwieriger, den Porenraum noch signifikant zu verkleinern und das Gefüge zu ändern (siehe Abb Porosität vorher)

Tonsteine als Wirtsgesteine



Möglichkeit zur Differenzierung von geeigneten und weniger geeigneten Ton-Wirtsgesteinen

1. Organik-reiche Tonsteinen sollten ausgeschlossen werden (Reaktivität des OM)
2. Porendurchmesser geeigneter Parameter zur Abschätzung der Versenkungstiefe (von OM armen TS)
3. VR% geeigneter Parameter zur Abschätzung der thermischen Geschichte des Tonsteins
4. Anhand der KAK kann man bei verschiedenen hochkompaktierten Tonsteinen weiter differenzieren



Tonsteine als Wirtsgesteine



Fazit

Tonwirtsgestein-Eigenschaften hängen von Versenkungstiefe ab

Es ist möglich, die relevanten Wirtsgesteinparameter abzuleiten

Eine ausführliche BGR-Publikation (Vergleich 18 verschiedene Tonsteine hinsichtlich Wirtsgestein-Eigenschaften) ist in Vorbereitung - ca. Ende/2024