

# Mikroorganismen und deren Relevanz in einem Endlager für hoch-radioaktiven Abfall

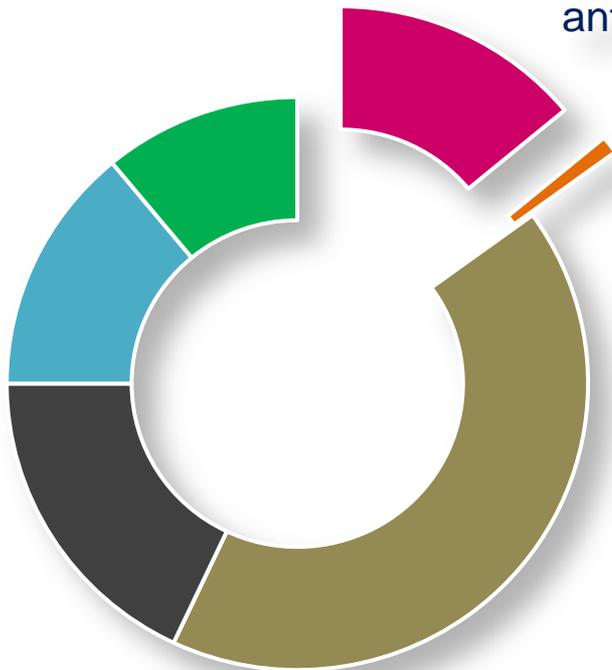


Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Energie

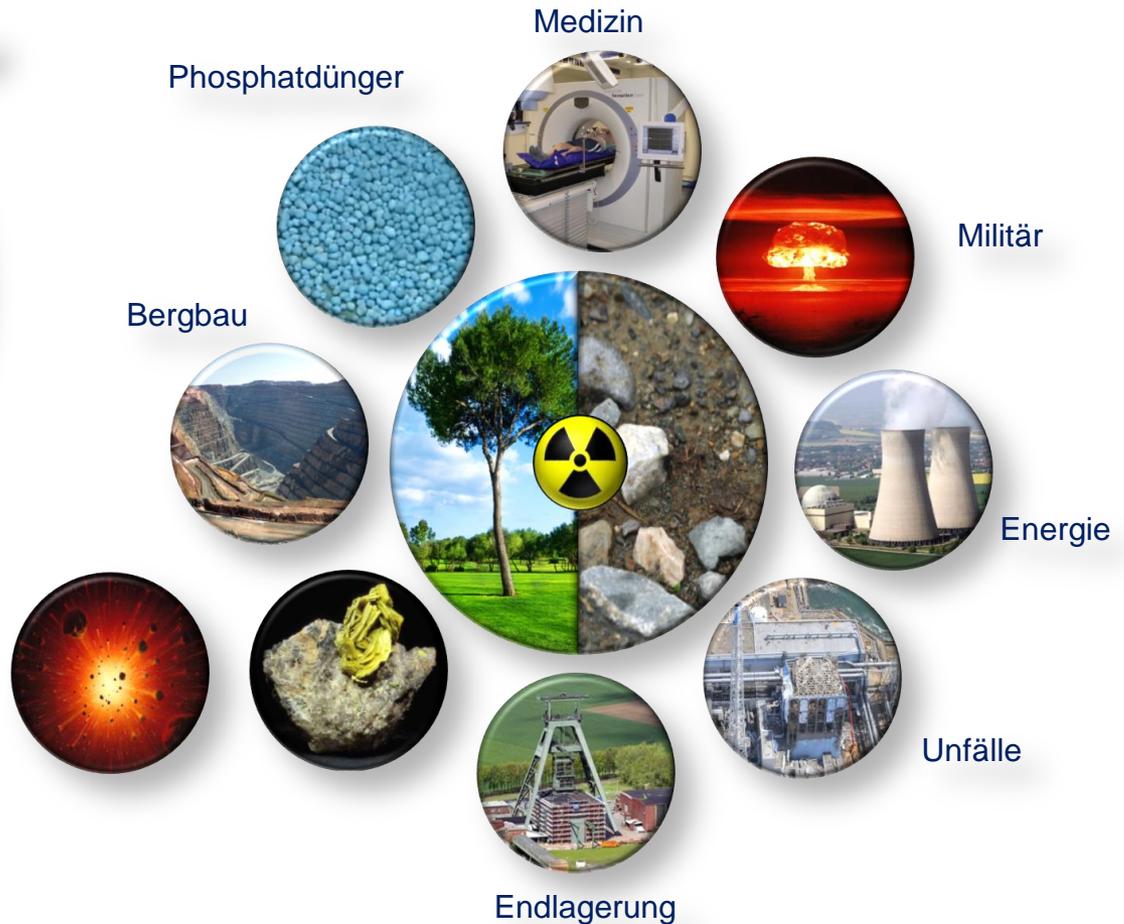


# Radioaktivität – ein Teil unseres Alltags

anthropogen



- Medizin
- Nuklear-Industrie
- Radon
- Gebäude/Boden
- kosmische Strahlung
- Nahrung/Trinkwasser



[1] <http://www.world-nuclear.org/gallery/charts/sources-of-radiation.aspx>

[2] Abbildung mit Genehmigung von Johannes Raff (FWOB, HZDR), verändert

# Was tun mit all dem Müll?

**300.000.000 Tonnen toxischen Abfall, jährlich!!! (weltweit)**

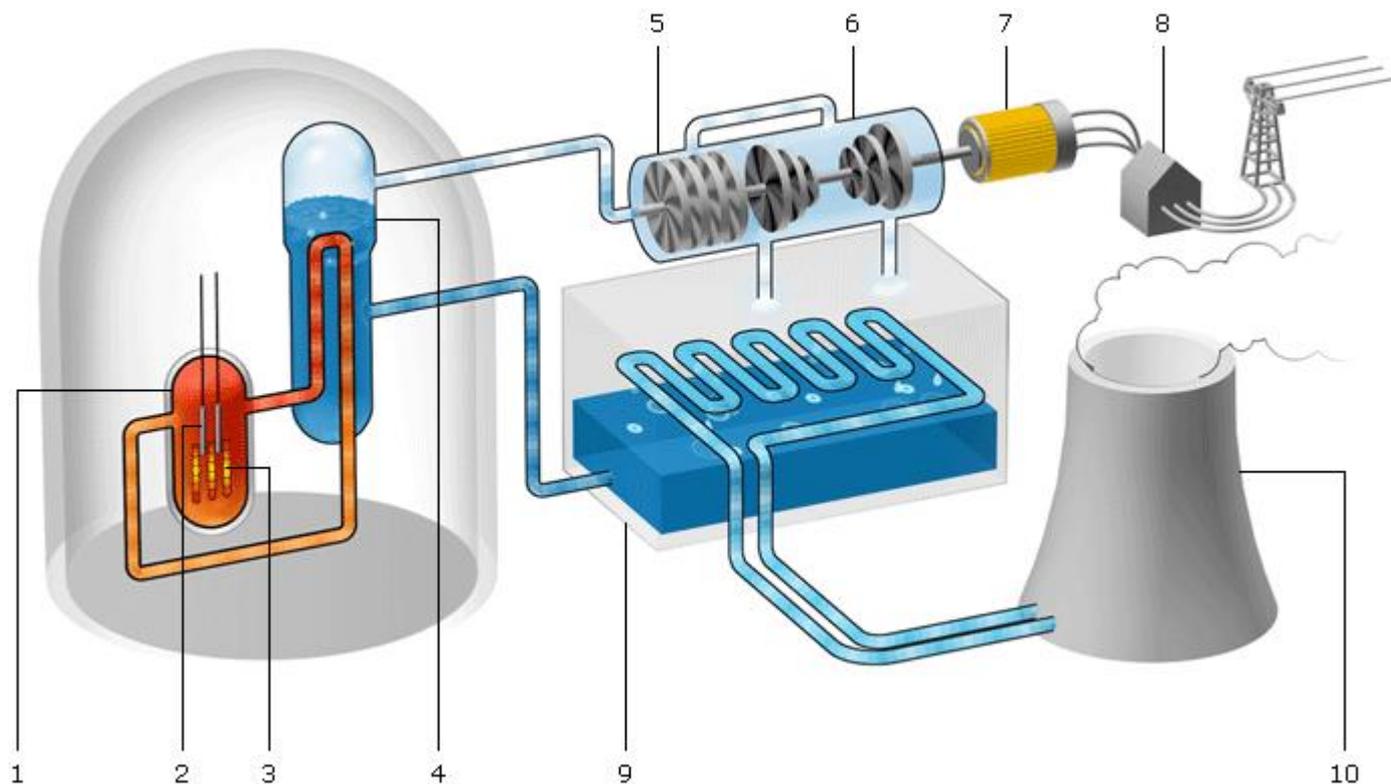
(giftige Chemikalien, medizinische Entsorgung, Kohlenstaub)

- **97.000 Tonnen nuklearer Abfall** (0,03 % des gesamten toxischen Abfalls)
  - LAW (schwachradioaktive Abfälle)
  - MAW (mittelradioaktive Abfälle)
  - HAW (hochradioaktive Abfälle) → **12.000 Tonnen HAW (sehr radio-toxisch)**



[3] <http://sitn.hms.harvard.edu/flash/2018/looking-trash-can-nuclear-waste-management-united-states/>

# Wie entsteht der Müll?



- 1) Reaktordruckbehälter
- 2) Steuerstäbe
- 3) Brennelemente**
- 4) Dampferzeuger
- 5) Hochdruckturbine

- 6) Niederdruckturbine
- 7) Generator
- 8) Transformator
- 9) Kondensator
- 10) Kühlvorrichtung (Kühlturm oder Flusswasser)

[4] <https://www.ensi.ch/de/2013/05/17/druckwasserreaktor/>

# Der Transport des Atommülls



Ein blauer CASTOR-Behälter  
wird aus einem AKW\*  
heraus transportiert...

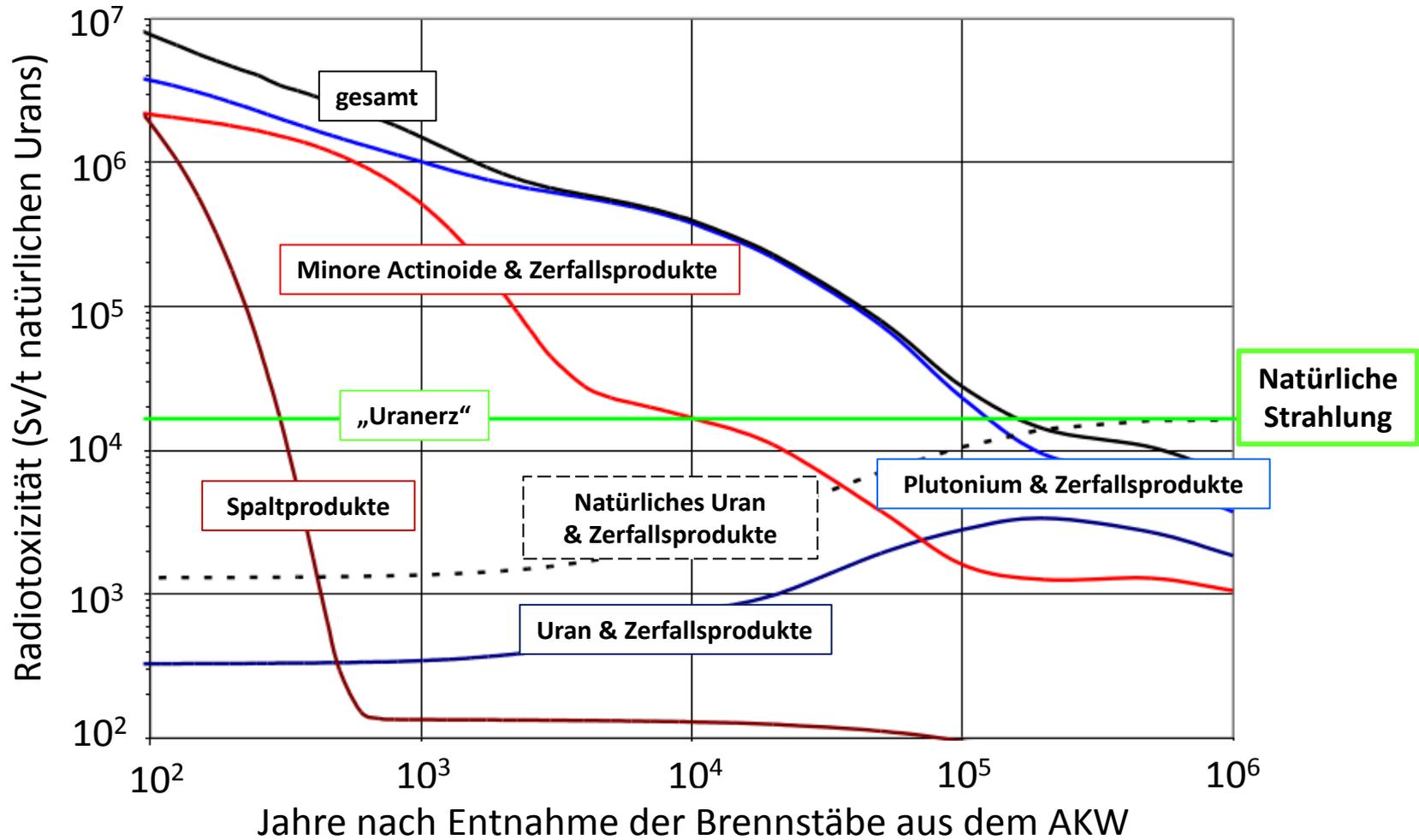


...und in ein Zwischenlager  
überführt.

\*AKW: Atomkraftwerk

[5] <https://www.planet-wissen.de/technik/atomkraft/atommuell/pwiecastoreinumstrittenerbehaelter100.html>

# Radiotoxizität



[6] Abbildung verändert nach: Salvatores 2006, NEA report 6090

# „Gib mir eine Rakete, lass uns den Müll in die Sonne schießen“

*Die Sonne als unsere „kosmische Müllhalde“*

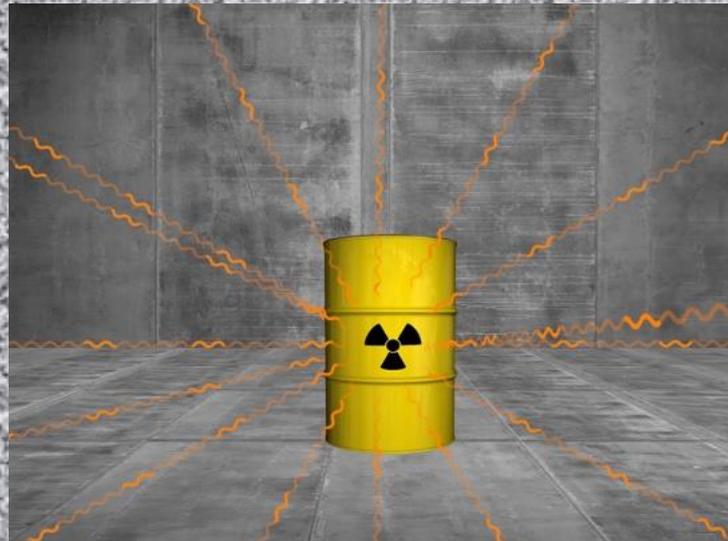
240 Starts pro Jahr wären notwendig!

- 30 Mrd. US\$ (HLW zur niedrigen Erdumlaufbahn)
- 60 Mrd. US\$ (HLW zur geostationären Satelliten-Umlaufbahn)
- ...bis zur Sonne: 1.2 Billionen US\$

**Raketen verunglücken auch mal.... (Explosion beim Start, in der Atmosphäre ...)**

Wir brauchen eine sichere, langfristige Lösung!

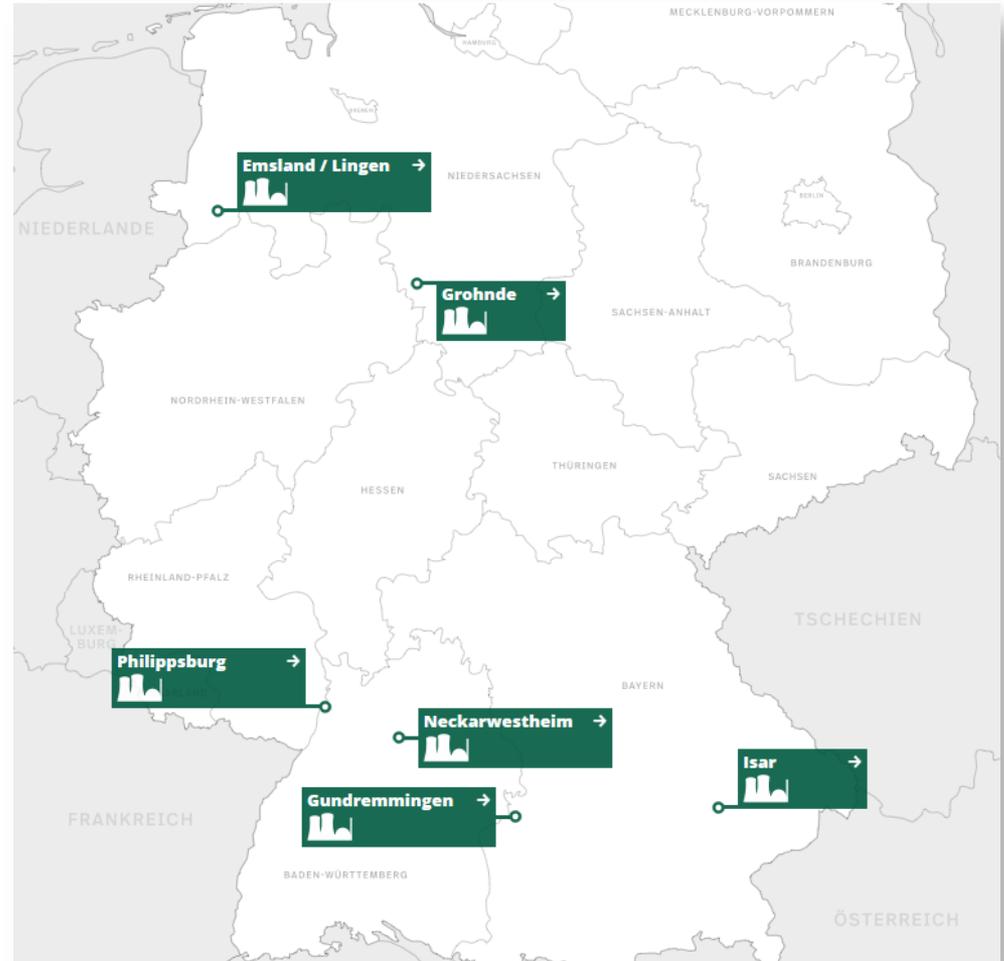
# Endlagerung in tiefen Gesteinsschichten



# Die Deutsche Energiewende

- 6 Kraftwerke in Betrieb (August 2019)
- Energiegewinnung aus Kernkraft:  
30.6 % (2000) → 11.6 % (2017) ↓
- HLW (nur abgebrannte Brennelemente):  
13,5 t (2010) → 15,3 t (2015) ↑  
Erwartet bis 2050: 27.500 m<sup>3</sup>
- Einstellung der Kernkraft: 2022

**Die Suche nach dem  
Endlager gliedert sich in  
drei Phasen.**



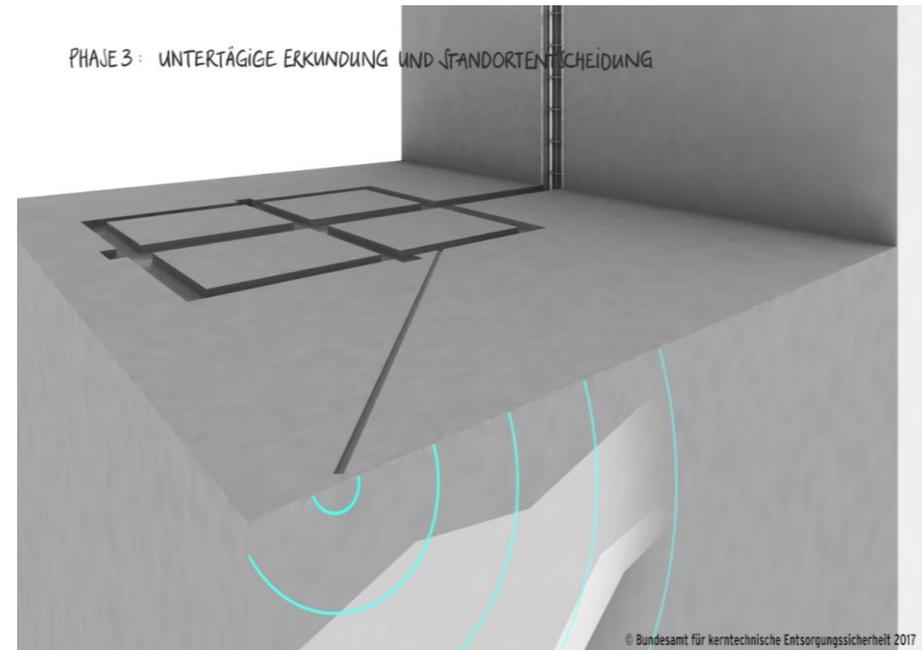
[9] [https://www.bfe.bund.de/DE/ne/nes\\_node.html](https://www.bfe.bund.de/DE/ne/nes_node.html)

# Phase 1: Mindestanforderungen



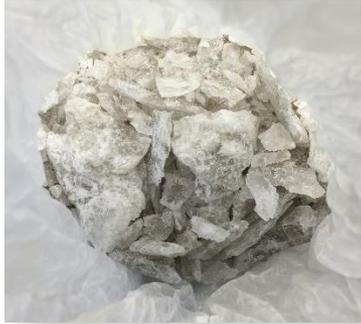
[10] <https://www.bfe.bund.de/SharedDocs/Videos/BfE/DE/soa-standortsuche.html>

# Phase 2 und Phase 3: Erkundungen



## Bis 2031!

# Wirtsgesteine in Deutschland



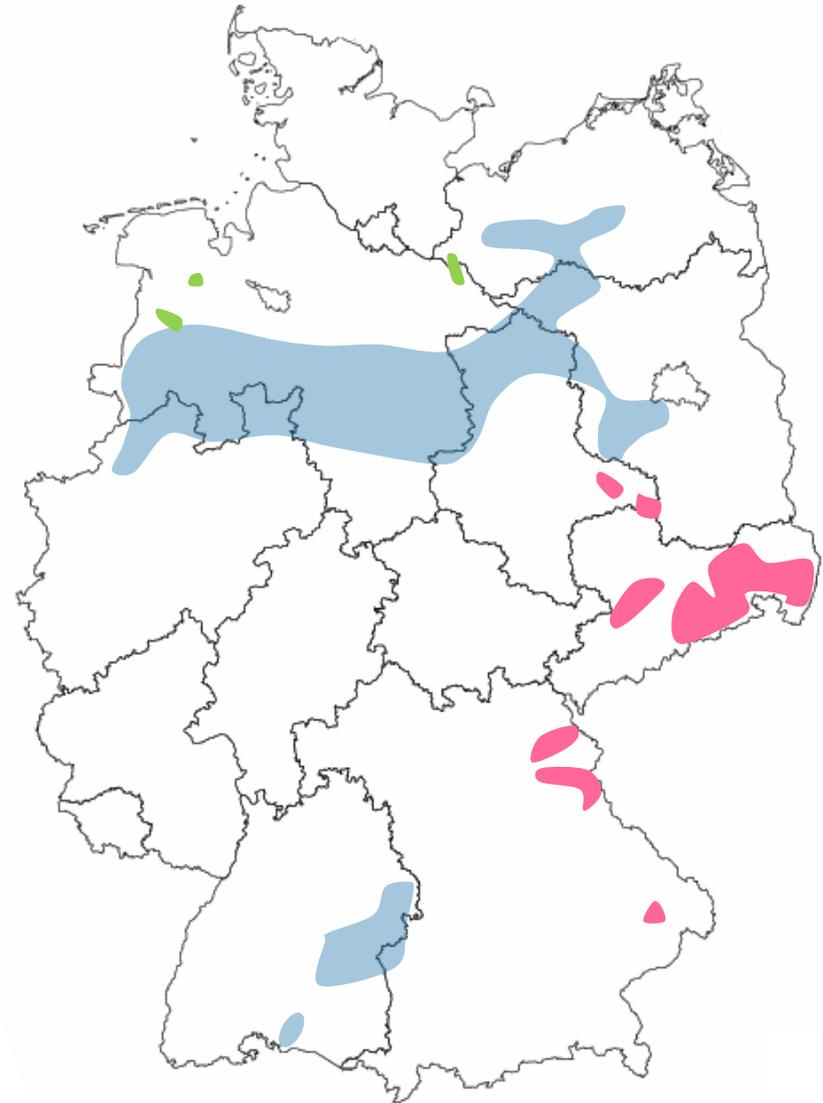
**Salz**



**Granit**



**Ton**



# Das Multi-Barrieren Konzept



**1) Technische Barriere**

**2) Geo-technische Barriere**

**3) Geologische Barriere**

**3) Wirtsgestein**

**2) Abdichtung**

**1) Behälter mit HAW**

“[...] forscht zum Schutz von Mensch und Umwelt vor  
Gefährdungen durch Schadstoffe [...].”

Rosendorf



Leipzig



Grenoble



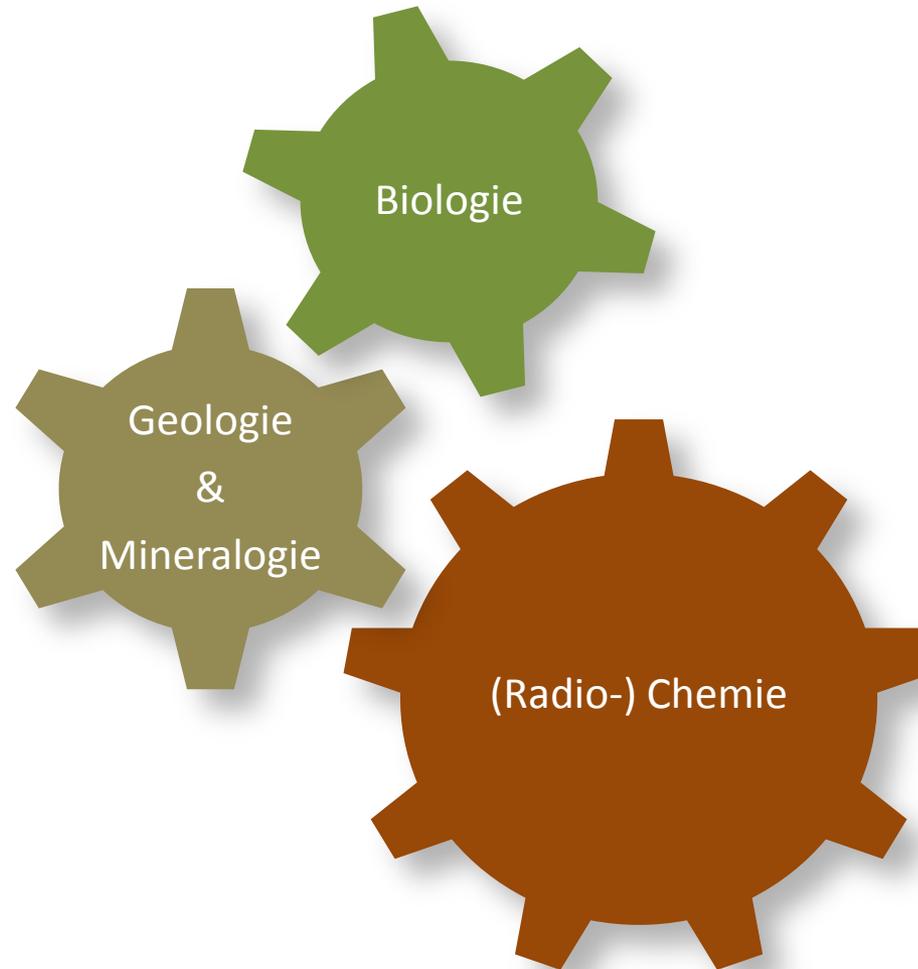
“[...] untersucht die ökologischen Risiken radioaktiver und nichtradioaktiver Metalle im  
Zusammenhang mit der Entsorgung von Atommüll, der Energieerzeugung in Kernkraftwerken [...]”

Institut für Ressourcentechnologie in Freiberg

**HZDR**

 **HELMHOLTZ**  
ZENTRUM DRESDEN  
ROSSENDORF

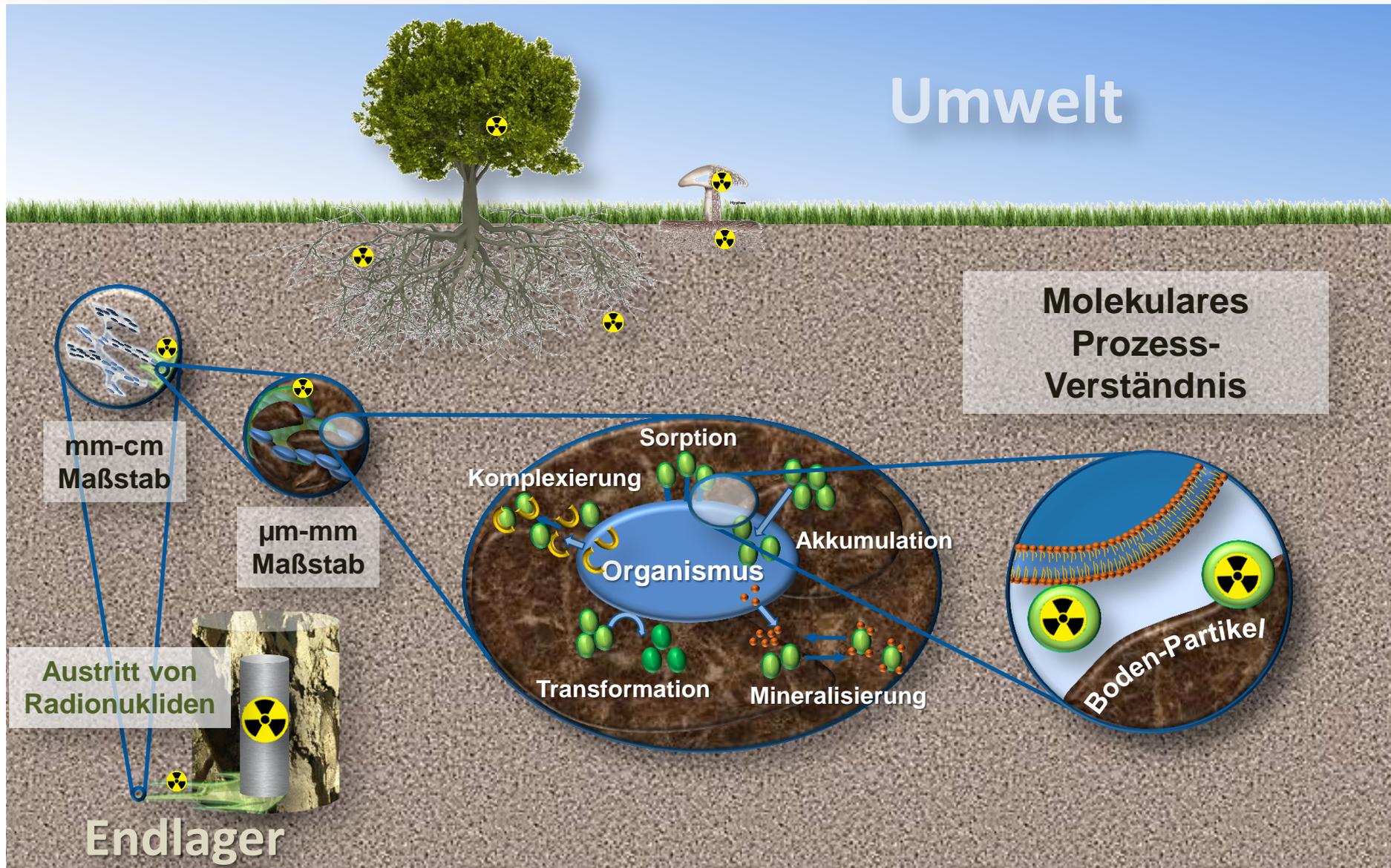






**Arbeiten mit der belebten Natur...**

# Wir koppeln nukleare Entsorgung mit Radio-Ökologie



# Was kümmern uns Mikroorganismen in einem Endlager?

*Desulfovibrio ferrophilus*

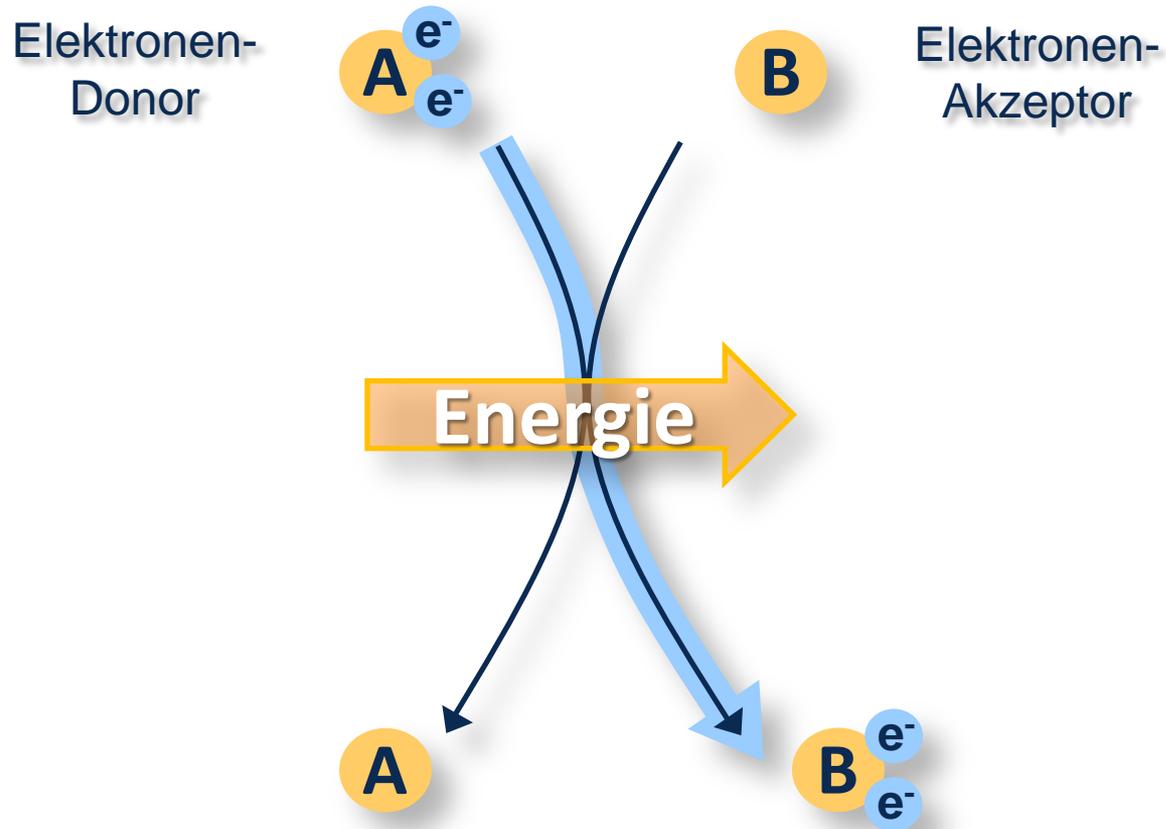
steril



nach 9  
Monaten

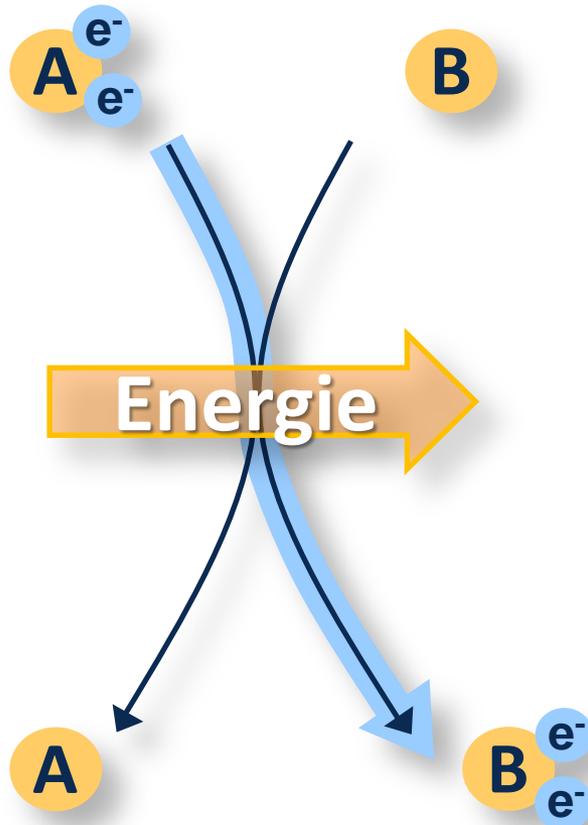
80 % Masseverlust  
durch korrodierende  
Aktivität

# Die Suche nach Leben...





# Die Suche nach Leben...



Redoxpotentiale von Elektronen-Donatoren und -Akzeptoren<sup>[13]</sup>

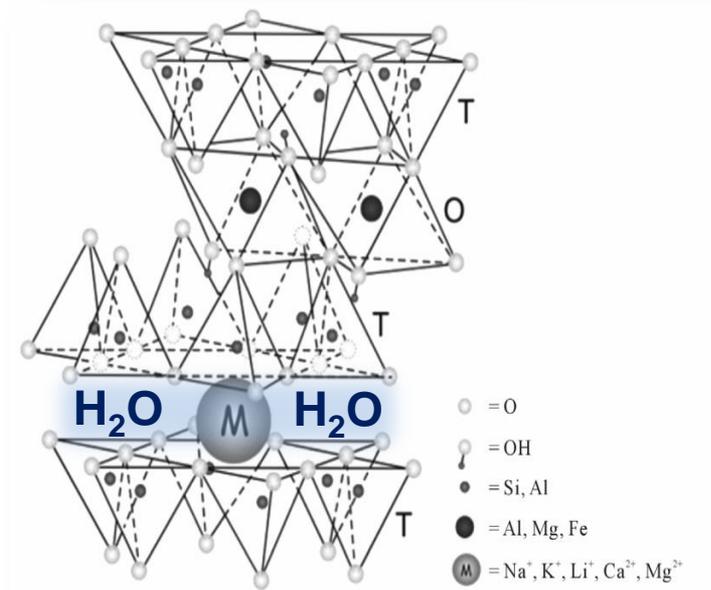
Redox compound	$E_o'$ (mV)
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> /HSO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	-516
CO <sub>2</sub> /formate <sup>a</sup>	-432
H <sup>+</sup> /H <sub>2</sub>	-414
S <sub>2</sub> O <sub>3</sub> <sup>2-</sup> /HS <sup>-</sup> + HSO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	-402
Flavodoxin ox/red ( $E'_{01}$ )	-371 <sup>d</sup>
Ferredoxin ox/red ( $E'_{01}$ )	-398 <sup>e</sup>
NAD/NADH	-320
Cytochrome c <sub>3</sub> ox/red	-290
CO <sub>2</sub> /acetate <sup>-</sup>	-290
S <sup>0</sup> /HS <sup>-</sup>	-270
CO <sub>2</sub> /CH <sub>4</sub>	-244
FAD/FADH <sub>2</sub>	-220
Acetaldehyde/ethanol	-197
Pyruvate <sup>-</sup> /lactate <sup>-</sup>	-190
FMN/FMNH <sub>2</sub>	-190
Dihydroxyacetone phosphate/glycerol-phosphate	-190
HSO <sub>3</sub> <sup>-</sup> /S <sub>2</sub> O <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	-173
Oxaloacetate <sup>2-</sup> /malate <sup>2-</sup>	-172
Flavodoxin ox/red ( $E'_{02}$ )	-115 <sup>d</sup>
HSO <sub>3</sub> <sup>-</sup> /HS <sup>-</sup>	-116
Menaquinone ox/red (MK)	-74
APS/AMP + HSO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	-60
Rubredoxin ox/red	-57
Acrylyl CoA/propionyl CoA	-15
Glycine/acetate <sup>-</sup> + NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	-10
2-Demethylvitamin K <sub>2</sub> ox/red	+25
S <sub>4</sub> O <sub>6</sub> <sup>2-</sup> /S <sub>2</sub> O <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	+24
Fumarate/succinate	+33
Ubiquinone ox/red	+113
S <sub>3</sub> O <sub>6</sub> <sup>2-</sup> /S <sub>2</sub> O <sub>3</sub> <sup>2-</sup> + HSO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	+225
NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> /NO	+350
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> /NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	+433
Fe <sup>3+</sup> /Fe <sup>2+</sup>	+772
O <sub>2</sub> /H <sub>2</sub> O	+818
NO/N <sub>2</sub> O	+1175
N <sub>2</sub> O/N <sub>2</sub>	+1355

e<sup>-</sup> - Donatoren

e<sup>-</sup> - Akzeptoren

[13] Thauer *et al.* 1977, *Bacteriol Rev.* 1: 100-80; Die angegebenen Werte beziehen sich auf die Standard-Wasserstoff-Elektrode (pH 7,0; 1 bar).

# Bentonit – eine geo-technische Barriere



Struktur von Montmorillonite<sup>[14]</sup>

hoher Quelldruck  
geringe hydraulische Leitfähigkeit



**Geeignetes Barriere-Material  
für die Endlagerung von HAW**

[14] Abbildung verändert nach: Pusch *et al.* 2012, *NATSCI* 4: 906-918

# Thermodynamik

$E_h$

e<sup>-</sup>-Donor

e<sup>-</sup>-Akzeptor

org. C   H<sub>2</sub>   H<sub>2</sub>S   NH<sub>4</sub><sup>+</sup>  
Fe<sup>2+</sup>   Mn<sup>2+</sup>   CH<sub>4</sub>   CO

O<sub>2</sub>   Mn<sup>4+</sup>   Fe<sup>3+</sup>  
NO<sub>3</sub><sup>-</sup>   SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>   S<sup>0</sup>   CO<sub>2</sub>

CH<sub>4</sub>   H<sub>2</sub>S  
H<sub>2</sub>   CO<sub>2</sub>

Fe<sup>2+</sup>

org.  
Säuren

Eigenschaften des  
Materials?

Effizienz?

# Eine kleine Welt – Mikrokosmen



industrieller Bentonit<sup>[15]</sup>



+



## Lösung

- Zusammensetzung ähnelt Porenwasser
- synthetisch
- Sauerstofffrei (anaerob)

Zugabe von Energie-Quellen (Nährstoffen)  
(Laktat, Azetat, Metalle und/oder H<sub>2</sub>)



Inkubation bei unterschiedlichen Temperaturen

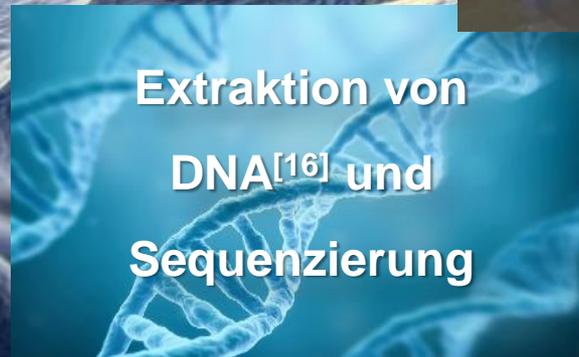
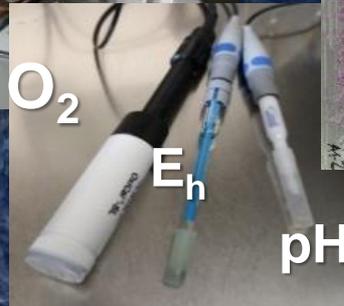
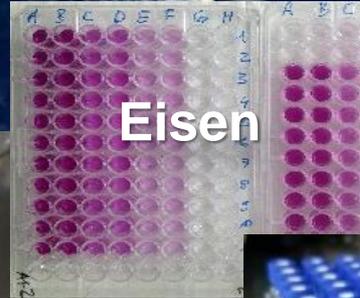


Tage/Monate/Jahre



[15] Bentonit B25 wurde bereitgestellt von Stephan Kaufhold (BGR, Hannover)

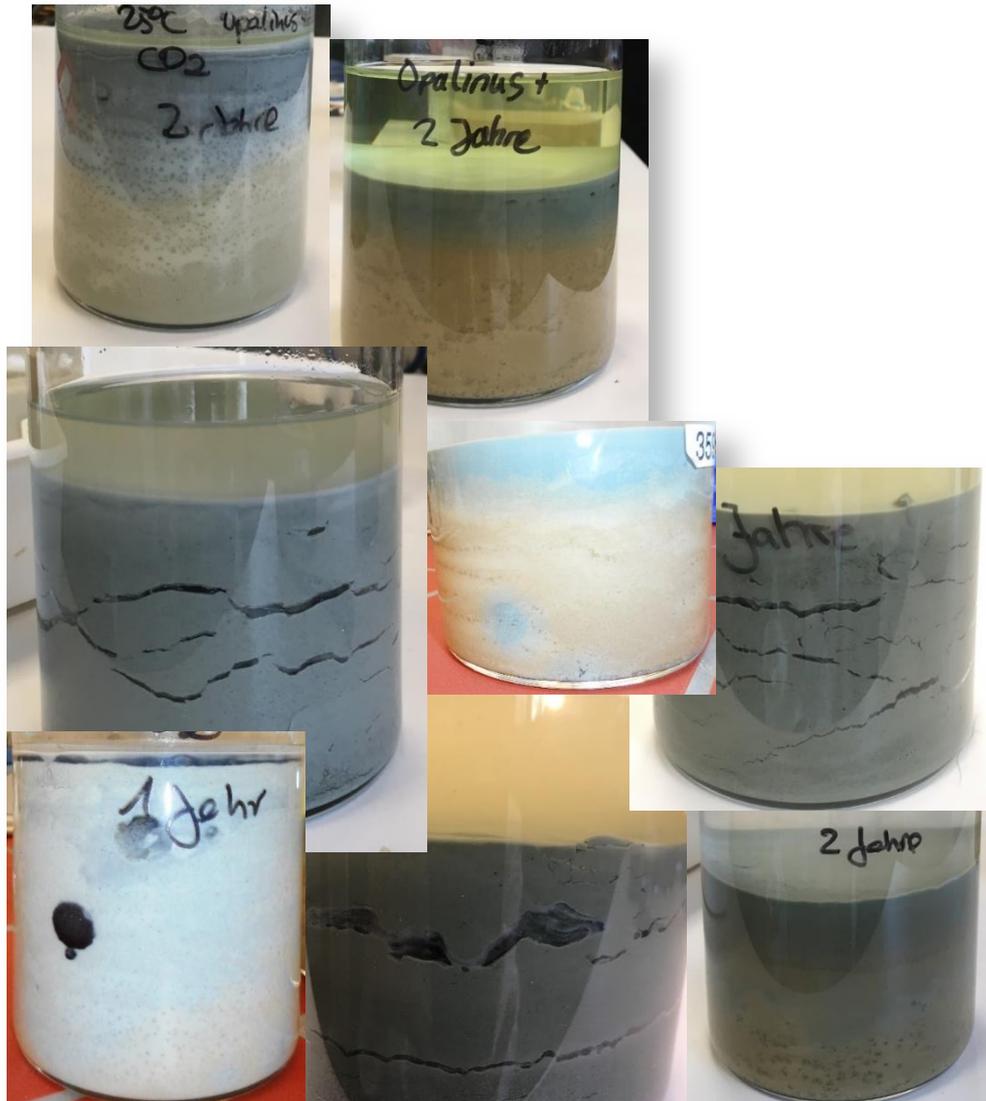
# Mikrokosmen ermöglichen die Analyse diverser Parameter...



[16] Selenita-Pobell 1995, *Molecular Microbial Ecology Manual* 1.5.1, 1-17

[17] Hintergrund: <https://www.parent24.com/Family/Health/what-parents-and-pregnant-women-must-know-about-listeria-20180305>

# „Irgendetwas“ passiert...

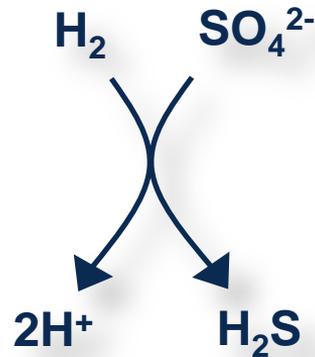
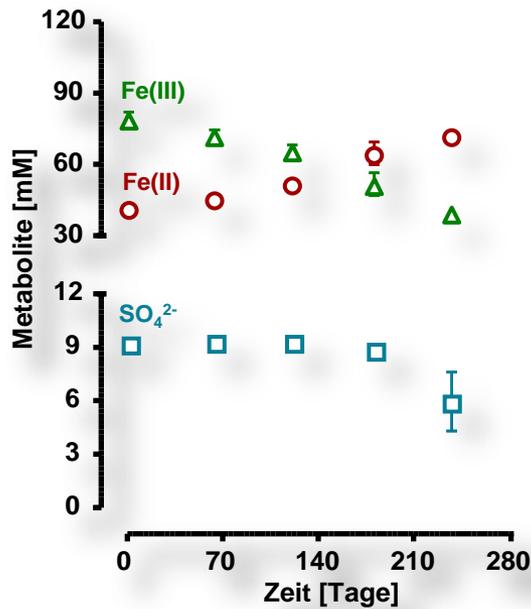


Visuelle Effekte sind abhängig von Mikroben und Umweltbedingungen

# Analyse von geochemischen Parametern bei 30 °C

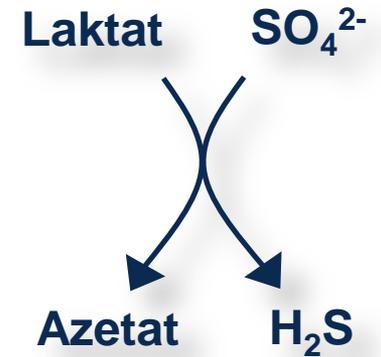
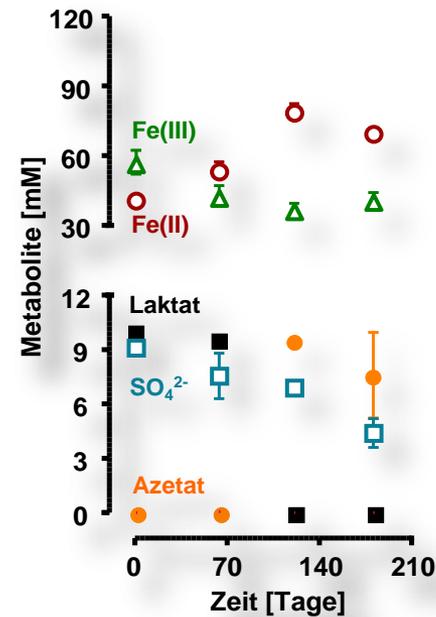
## H<sub>2</sub>

nach 238 Tagen

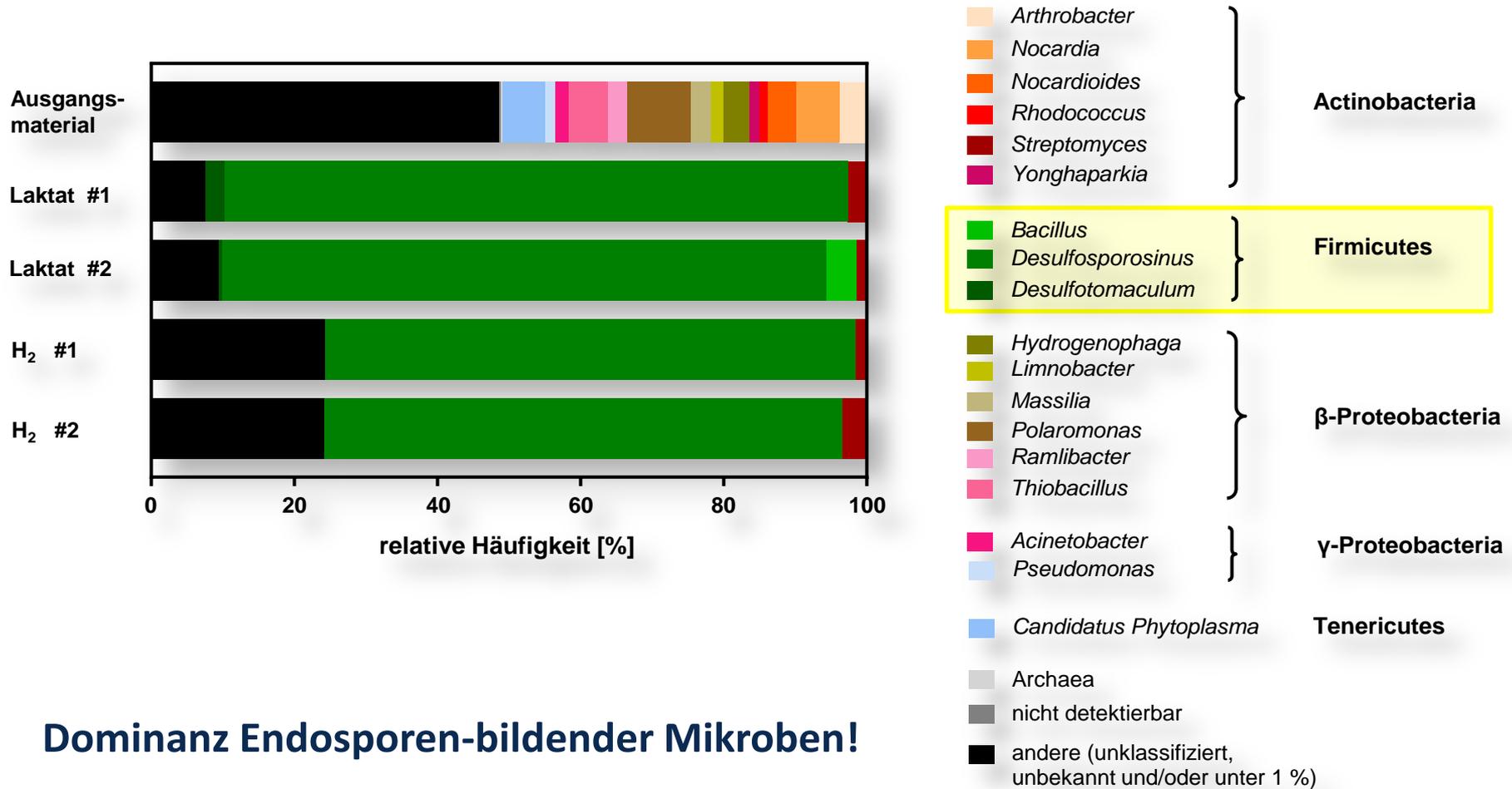


## Laktat

nach 181 Tagen

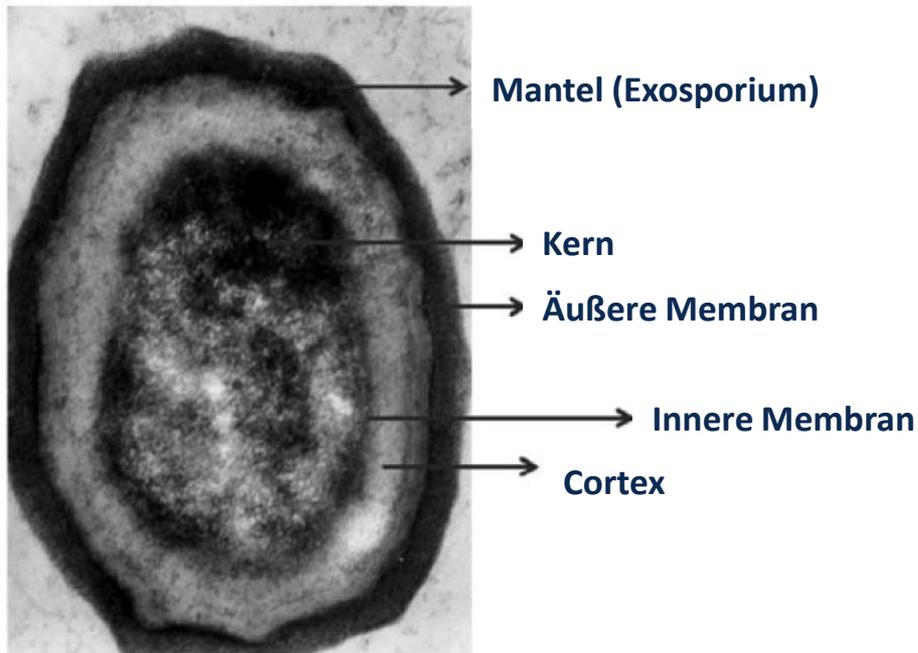


# Analyse der mikrobiellen Diversität (30 °C)



**Dominanz Endosporen-bildender Mikroben!**

# Die Relevanz von Endosporen



Querschnitt einer Endospore von *Bacillus atrophaeus*.<sup>[19]</sup>

Resistenz gegenüber:

- Hitze
- UV- und  $\gamma$ -Strahlung
- Austrocknung
- Nährstoffmangel
- Salz-Stress
- Wasserstoff-Peroxiden, Formaldehyd und weiteren Bioziden
- ....

**Endosporen sind Überdauerungsformen**

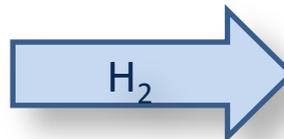
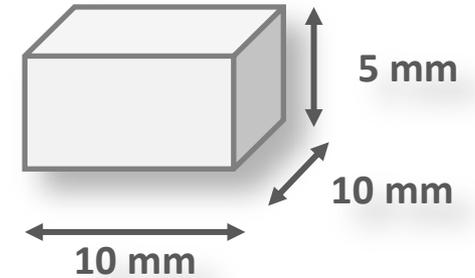
**...über einen sehr langen Zeitraum...**

[19] Sella *et al.* 2015, *Crit. Rev. Biotechnol.* 35: 533-545; die Grafik wurde nachträglich bearbeitet

# Die Bedeutung von Metallen im Endlager

Gusseisen

Kupfer

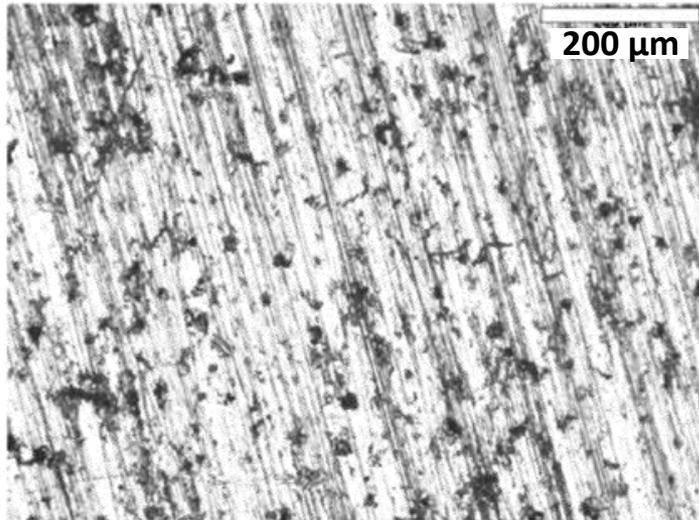


Beeinflussung der Korrosion?

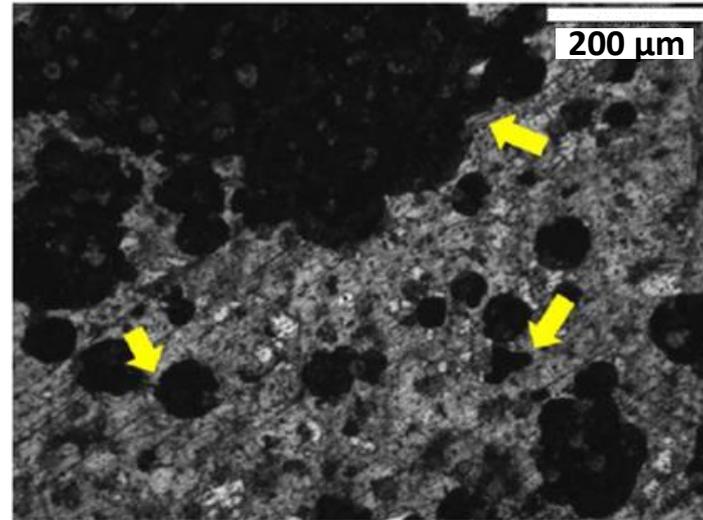
# Mikroskopische Analyse von Gusseisen-Plättchen

Der Einfluss von Bentonit, Porenlösung und Mikroorganismen

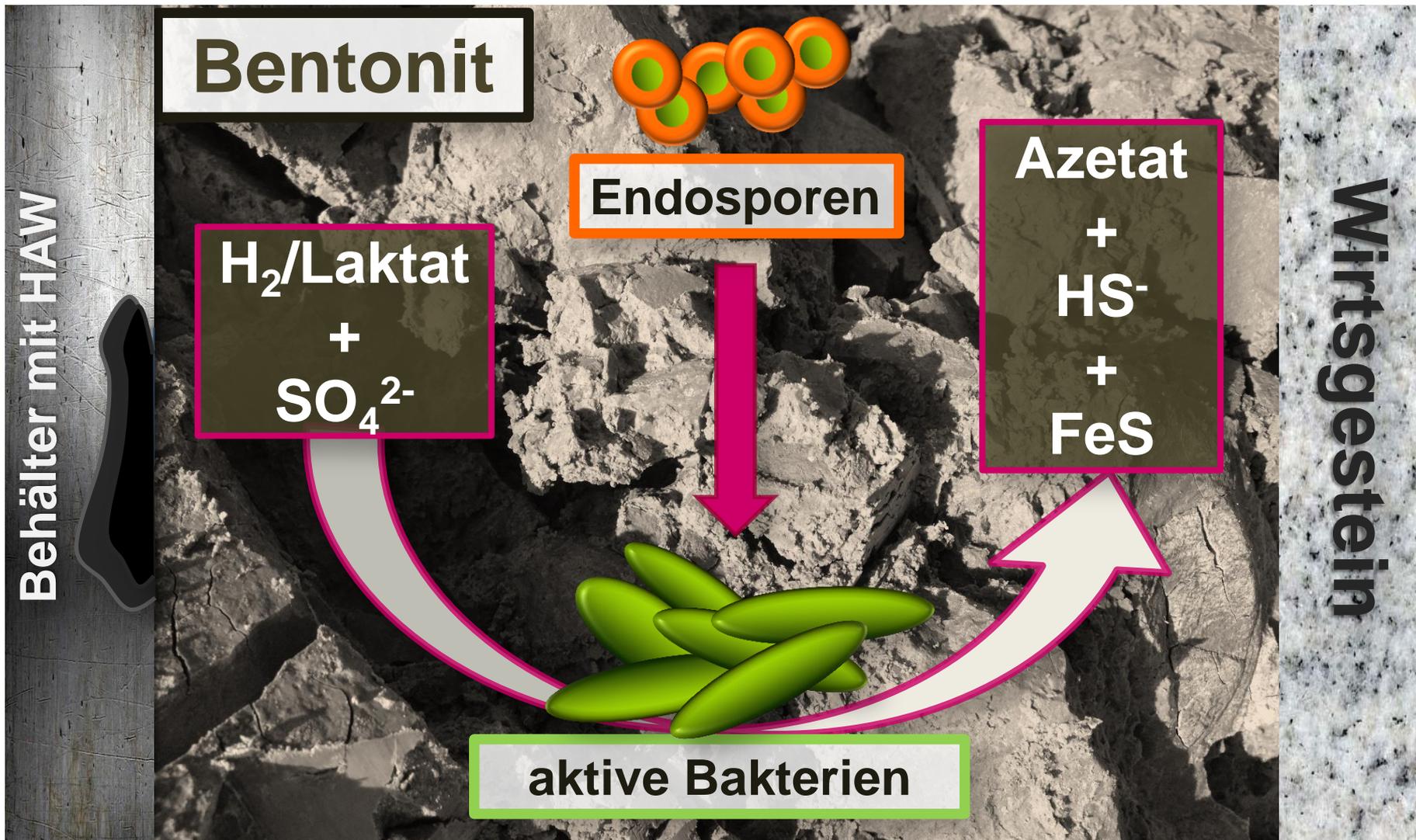
vor Inkubation



Nach 4 Monaten Inkubation in  
Mikrokosmen mit H<sub>2</sub>



# Zusammenfassung



# Vielen Dank!

- Andrea Cherkouk
  - Sindy Kluge
  - Magdalena Dressler
  - Tom Neubert
  - Falk Lehmann
  - Carola Eckardt
  - Sabrina Beutner
- 
- Ariette Schierz, Thuro Arnold (HZDR)
- 
- Stephan Kaufhold (BGR, Hannover)
  - Armin Ziegenaus (IMERYS, Landshut)
- 
- Daniel Standhaft, Carolin Podlech, Laurence Warr, Georg Grathoff (University of Greifswald)
- 
- Karsten Pedersen (MICANS, Sweden)



Euratom research and training  
programme 2014-2018 (No. 661880)



BMWi Projekt-Nummer:  
02E11344B



- Fragen ?
- Vorschläge ?
- Kommentare?
- Bedenken ?

**“Wie jetzt ‘extrem’? Wir fühlen uns hier sehr wohl!”**