Workshopreihe

Nutzung regenerativer Energiequellen
für die Wärmewende



Teilprojekt 3:

Qualitätsanforderungen an
Erdwärmesonden-Verfüllbaustoffe

















ZAE BAYERN

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages



TP 3: Qualitätsanforderungen an Erdwärmesonden-Verfüllbaustoffe



Teilprojekt 3 Qualitätsanforderungen an Erdwärmesonden-Verfüllbaustoffe

TP 3.1:

Filtrationsverhalten von EWS-Verfüllbaustoffen

TP 3.2:

Ermittlung der hydraulischen Durchlässigkeit von Systemproben

TP 3.3:

Realitätsnahe Kombination von Untersuchungsaspekten von Filtrationseffekten

TP 3.4:

Analyse der Verfüllqualität von EWS in einem realen Untergrund

TP 3.5:

Neues Verfüllmesskonzept für EWS

© Hochschule Biberach

19.06.2024



TP 3.1 – Filtrationsverhalten von Erdwärmesonden-Verfüllbaustoffen





Messung des Druckverlaufs in der Verfüllung realer EWS-Bohrungen

- Sandstein
- Tonstein
- Granit

Nachbildung eines Bohrlochs im Versuchsstand

- Wasserabgabe aus dem Baustoff möglich
- Druckbeaufschlagung der Suspension
- Druckverlauf im Baustoff
- Rückbau und Analyse der Verfüllung

Vergleich und Erklärung der gemessenen Druckkurven



Rückschluss auf die Vorgänge im Untergrund

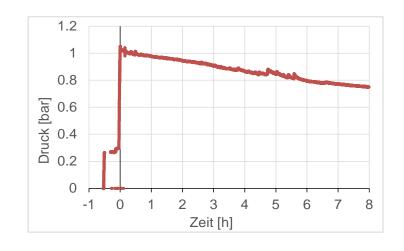


Druckverlauf in Bohrungen in Abhängigkeit vom Untergrund

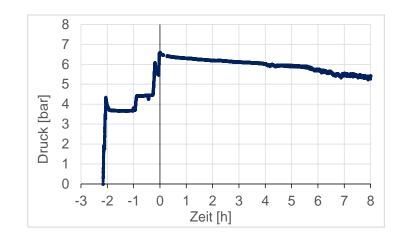




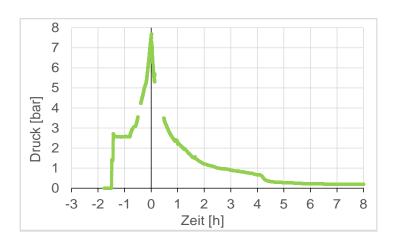
Verfüllung im PVC-Rohr



im Tonstein / Mergel



im Sandstein



Sensortiefe: 5,50 m uGOK

Suspensionsdichte: 1,94 g/cm³

Sensortiefe: 47 m uGOK Suspensionsdichte: 1,57 g/cm³ Sensortiefe: 44 m uGOK

Suspensionsdichte: 1,94 g/cm³

Verpressende bei t = 0 h

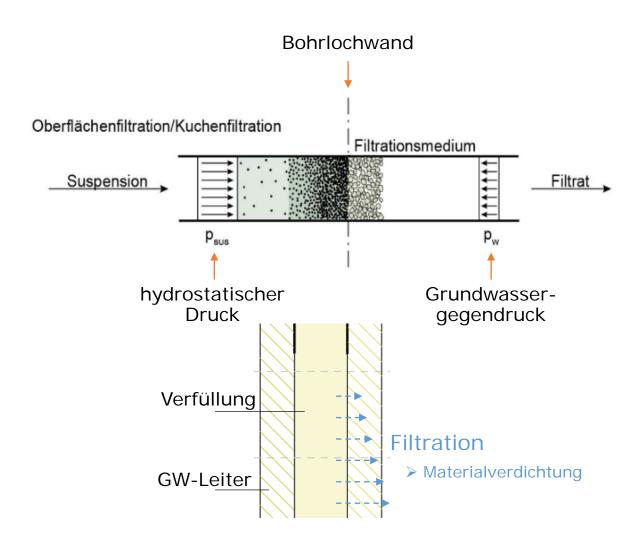
Relativdruckmessungen: 0 bar = Atmosphärendruck



Filtrationsprozesse bei der Verfüllung von Erdwärmesonden







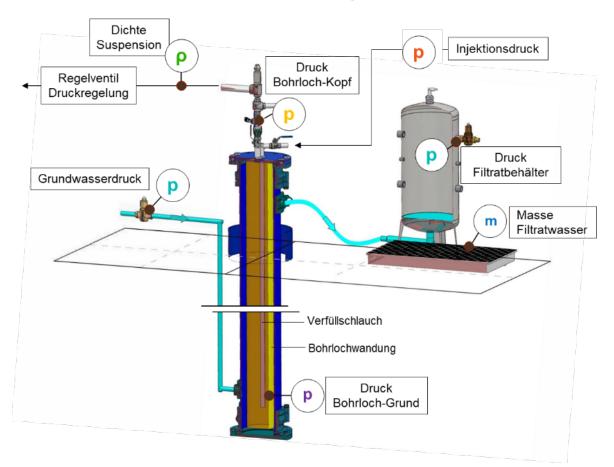
- Filtration ist die Separation von Feststoffpartikeln und Filtrat
- Treibende Kraft dieser Vorgänge ist der in der Verfüllsuspensionssäule vorliegende Druck



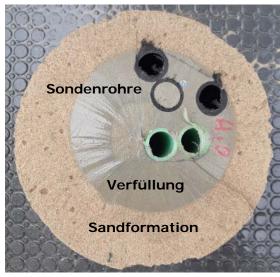
Filtrationsversuchsstand – Nachbildung der Druckverhältnisse in tiefen Bohrlochabschnitten



Schematische Darstellung des Versuchsstands











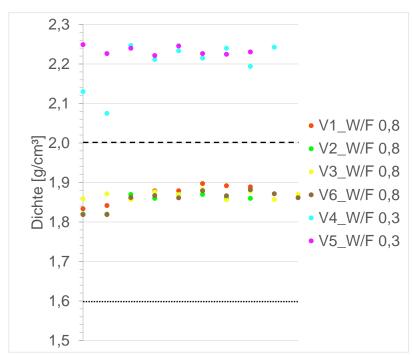


Ergebnisse der Laboruntersuchungen von filtrierten Bohrlochabschnitten

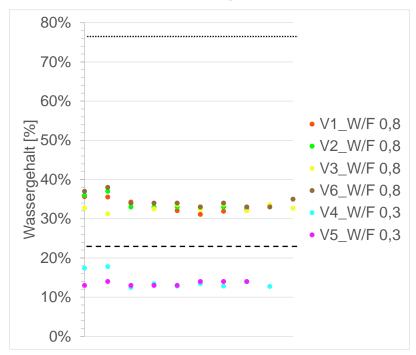




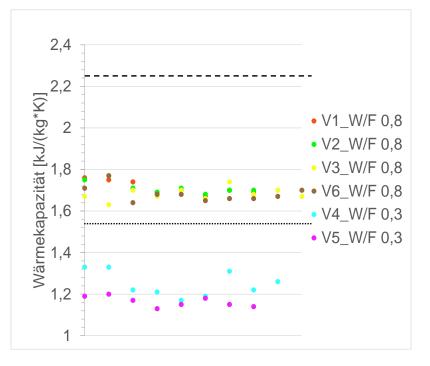
Dichte



Wassergehalt*



Wärmekapazität



Referenzproben unfiltriert W/F 0,8 (Baustoff A)

----- W/F 0,3 (Baustoff B)

W/F = Wasser-Feststoffverhältnis

*Bestimmung nach DIN EN ISO 17892-1 $(m_w / m_d) \times 100 [\%]$



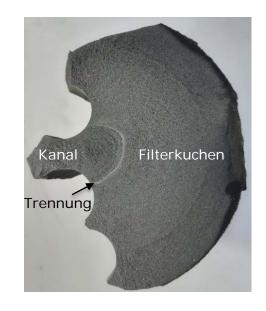
Zusammenfassung der Erkenntnisse aus den Filtrationsversuchen





Auswirkungen der Filtrationsvorgänge auf den Verfüllbaustoff

- Trennung des Verfüllmaterials in Strömungskanal und Filterkuchenbereich
- Veränderung der Baustoffeigenschaften gegenüber nicht verfülltem Baustoff
- Ausbleiben von Lunkern und Entmischungen gegenüber bisherigen Untersuchungen in Versuchsaufbauten mit wasserundurchlässiger Bohrlochwandung





TP 3.4 – Analyse der Verfüllqualität von Erdwärmesonden im realen Untergrund







Erstellung von EWS-Bauwerken im Steinbruch 06/2021 & 06/2022 Ca. 14 m mächtige Deckschicht aus Löss, darunter Kalkstein



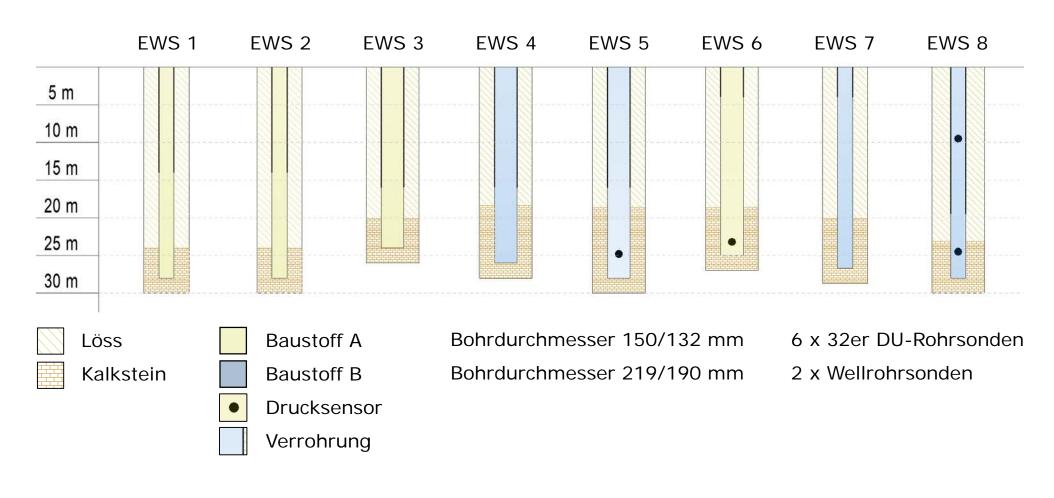
Geophysikalische Bohrlochvermessung



Übersicht der EWS-Ausführungen









Freilegung und Bergung der EWS-Bauwerke



solites



lagenweise Freilegung von EWS-Bauwerken, 06/2023

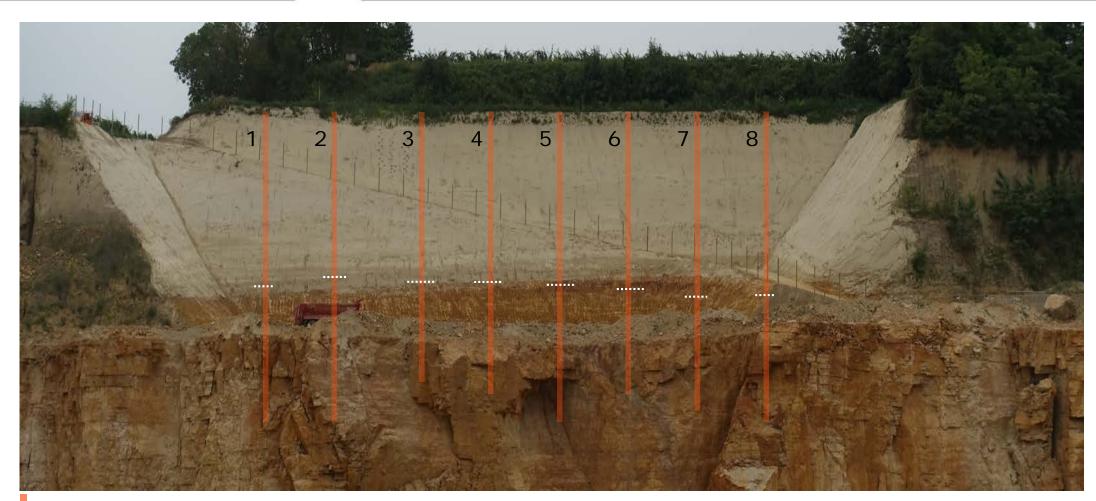
Bergung der EWS-Bauwerke



Steinbruch im Endausbauzustand







Positionen der rückgebauten Erdwärmesonden Nr. 1 bis 8



Optische Analyse und Auffälligkeiten



Vergleich der Querschnitte in 2 bis 2,5 m Tiefe uGOK:

solites

EWS 1

EWS 2

EWS 3

EWS 4

EWS 5

EWS 6

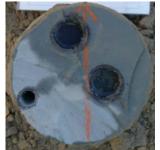
EWS 7

EWS 8

















weitere Merkmale:



Position Sondenrohre



Bohrlochdurchmesser
© Solites / QEWS+ Projektpartner



Auffälligkeiten



Untersuchung der Bohrlochgeometrie I

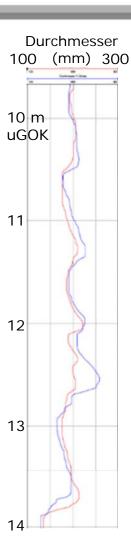


solites





Sonde 7: deutliche Zunahme des Bohrlochdurchmessers nach Übergang in den nicht verrohrten Bereich





Untersuchung der Bohrlochgeometrie II





Sonde 7: Freilegung im Übergang von Löss zu Kalkstein



Bohrlochdurchmesser entspricht Bohrdurchmesser



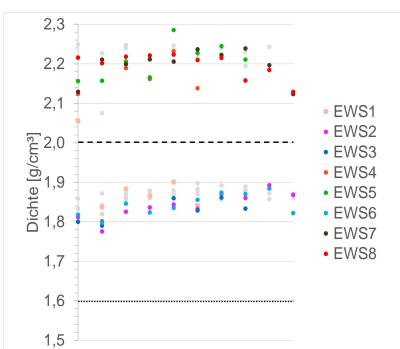


Vergleich von Filtrationsversuchen mit realen EWS aus Merdingen

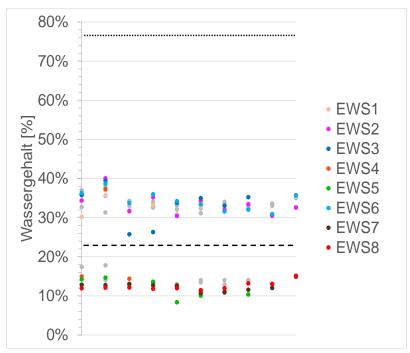


solites

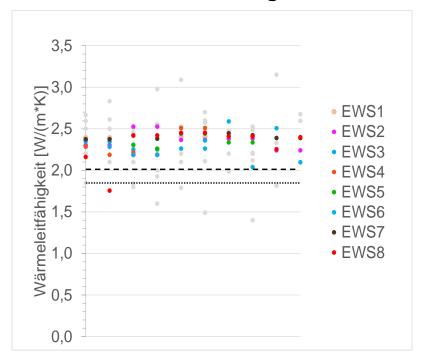
Dichte



Wassergehalt*



Wärmeleitfähigkeit



Referenzproben unfiltriert W/F 0,8 (Baustoff A)

--- W/F 0,3 (Baustoff B)

(W/F = Wasser-Feststoffverhältnis)

grau: Filtrationsversuche

bunt: Reale EWS

*Bestimmung nach DIN EN ISO 17892-1 (m_w / m_d) x 100 [%]





Zusammenfassung der Erkenntnisse zur Verfüllqualität aus Feldversuchen





- Es sind keine Unterschiede der Bohrlochintegrität in Abhängigkeit vom Bohrlochdurchmesser oder der Sondenausführung zu Beobachten.
- Alle freigelegten EWS zeigen ein gute Verfüllqualität. Diese Qualität ist unbedenklich hinsichtlich in BW genehmigter EWS.
- Im Übergangsbereich von verschiedenen Geologien traten Lunker auf.
 Solche Übergangsbereiche sollten in weiteren Untersuchungen genauer untersucht werden.

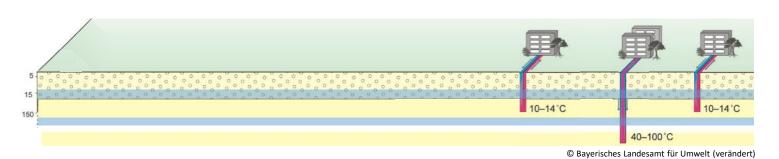


TP 3.2 & 3.3 - Vertikale hydraulische Abdichtung von EWS-Bauwerken



Teilprojekt 3.2 Ermittlung der hydraulischen Durchlässigkeit von Systemproben

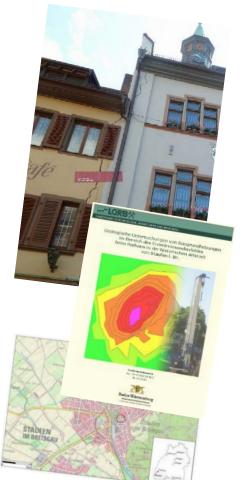
Teilprojekt 3.3 Realitätsnahe Kombination von Untersuchungsaspekten von Filtrationseffekten



Motivation

Schutz des Grundwassers und Vermeidung des Wasseraustausches zwischen Grundwasserstockwerken Ziel

EWS-Bauwerke mit geringer vertikaler hydraulischer Durchlässigkeit^{a)}



a) Staatliche Geologische Dienste der Deutschen Bundesländer: "Ad-hoc-Arbeitsgemeinschaft Hydrogeologie – Empfehlungen zur Durchlässigkeit", 2015

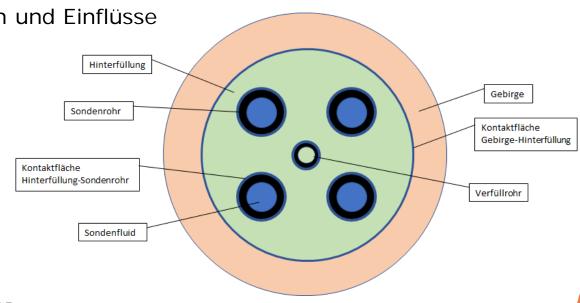
19.06.2024 © ZAE Bayern



Ziel: EWS-Bauwerke mit geringer vertikaler hydraulischer Durchlässigkeit

Weg zum Ziel

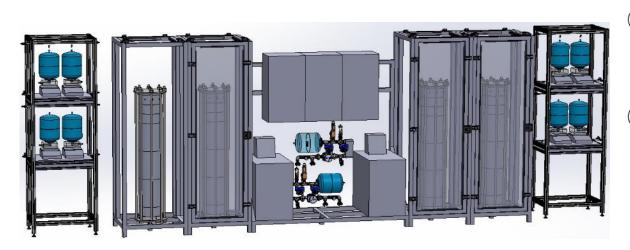
- Fortgeschrittene Analysen zur hydraulischen Durchlässigkeit von Systemproben
- Standardisierte Methodik
- Komponenten- und Materialabhängigkeit Rohre, Filtration der Verfüllsuspension
- Alterungseinflüsse Druck-, Temperatur- und Frost-Tau-Wechsel
- Kombination der unterschiedlichen Abhängigkeiten und Einflüsse
- Längerfristige Untersuchungen
- Tieferes Verständnis über Systemdichtheit in einem EWS-Bauwerk
- Beitrag zur VDI 4640 Blatt 2 –
 Erdgekoppelte Wärmepumpenanlagen



19.06.2024 © ZAE Bayern 20 | 34



TP3.2 Ermittlung der hydraulischen Durchlässigkeit von Systemproben



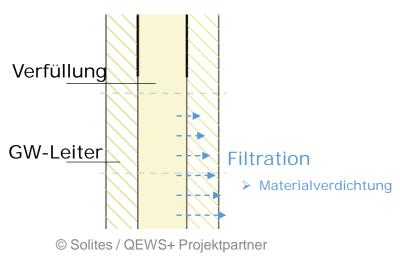




19.06.2024 © ZAE Bayern



TP3.3 Realitätsnahe Kombination von Untersuchungsaspekten von Filtrationseffekten



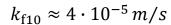




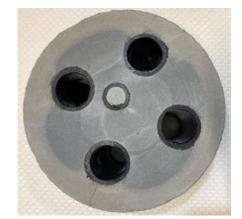
Querschnitt der Referenzprobe Baustoffdichte: 1,76 kg/l











Querschnitt der filtrierten Probe Baustoffdichte: 2,20 kg/l

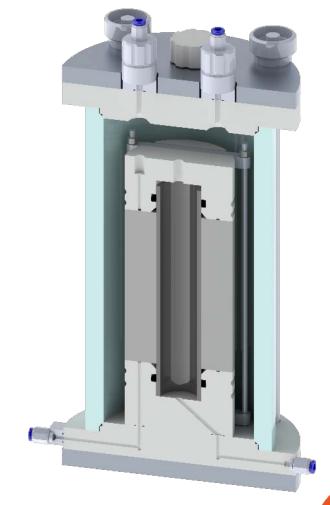
19.06.2024 © ZAE Bayern 22 | 3



Zusätzliche Untersuchungen an modifizierten Triaxialzellen (MT) und Vollproben







19.06.2024 © ZAE Bayern 23 | 34



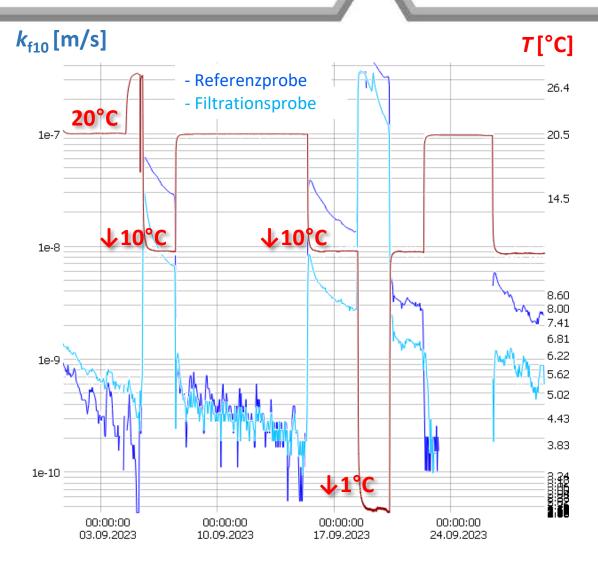
Versuchsübersicht zur Systemdurchlässigkeitsmessung

Verfüllbaustoff	TP3.2 Systemproben		TP3.3 Filtrationsproben		
	Probe 1	Probe 2	Probe 3 Referenz	Probe 4 filtriert	Modifizierte Triaxialzellen
1. Ringversuch quarzbasiert					
2. Ringversuch phonolithbasiert					
3. Ringversuch graphitbasiert					3 Proben tonbasiert, mit PE-Rohr 3 Proben Tonpellets mit PE-Rohr

19.06.2024 © ZAE Bayern 24 | 34



Typischer Messverlauf an Systemtriaxialzellen



Temperaturabhängigkeit

- Systemdurchlässigkeit ist temperaturabhängig
- $k_{\rm f}$ -Veränderungen sind qualitativ reproduzierbar
- T<10 °C führt zu deutlich höheren k_f -Werten

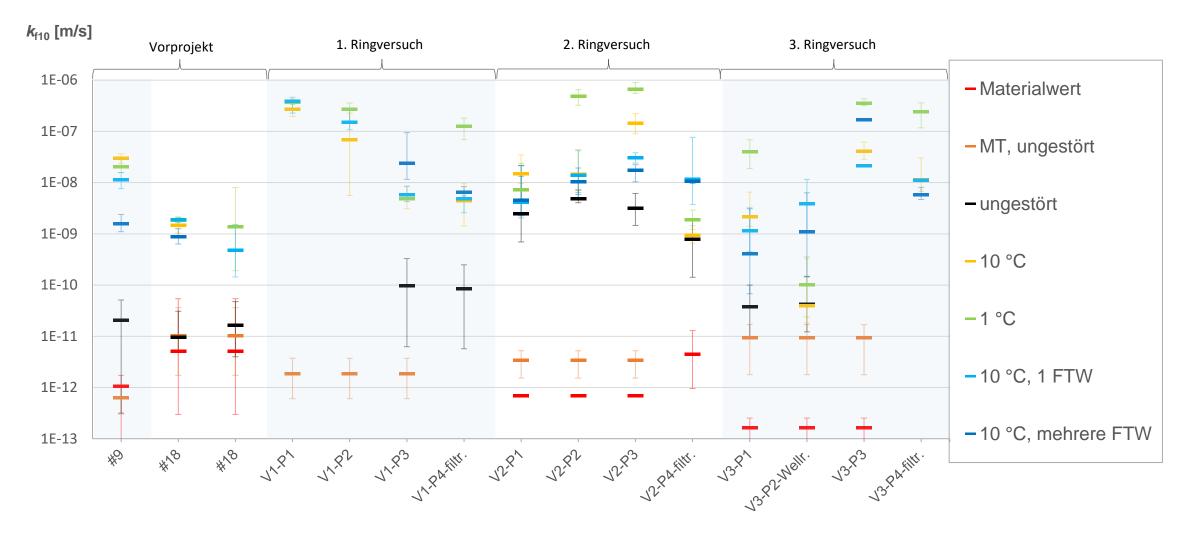
Zeitabhängigkeit

- k_f fällt stetig aufgrund des Rohrkriechens durch erhöhten Sondenrohrdruck
- T-Absenkungen haben meist einen kurzfristigen Peak zur Folge

19.06.2024 © ZAE Bayern 25 | 34

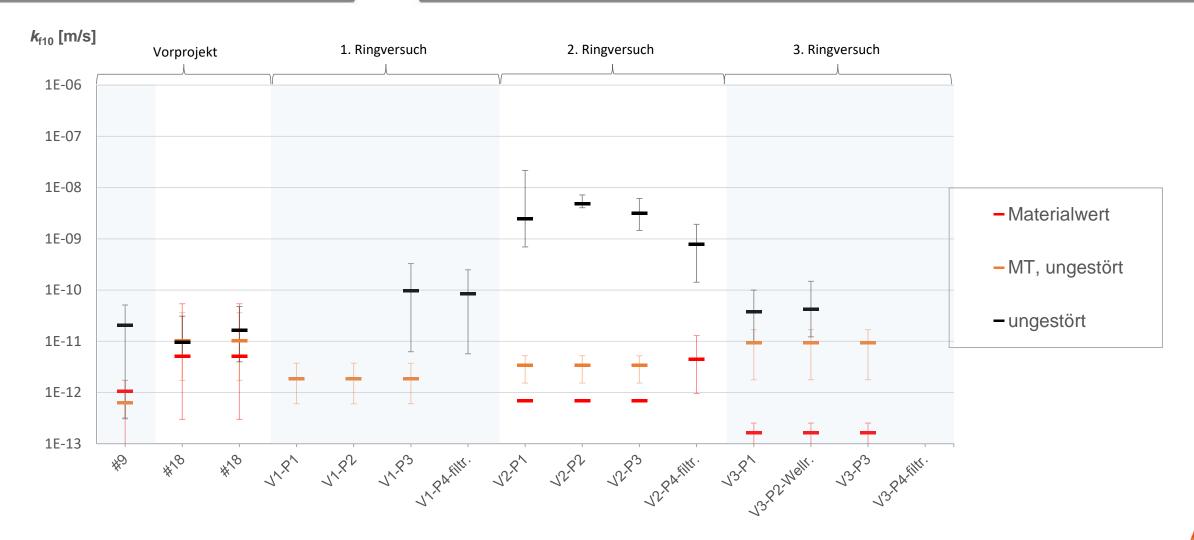


Ergebnisse aller vermessenen Proben





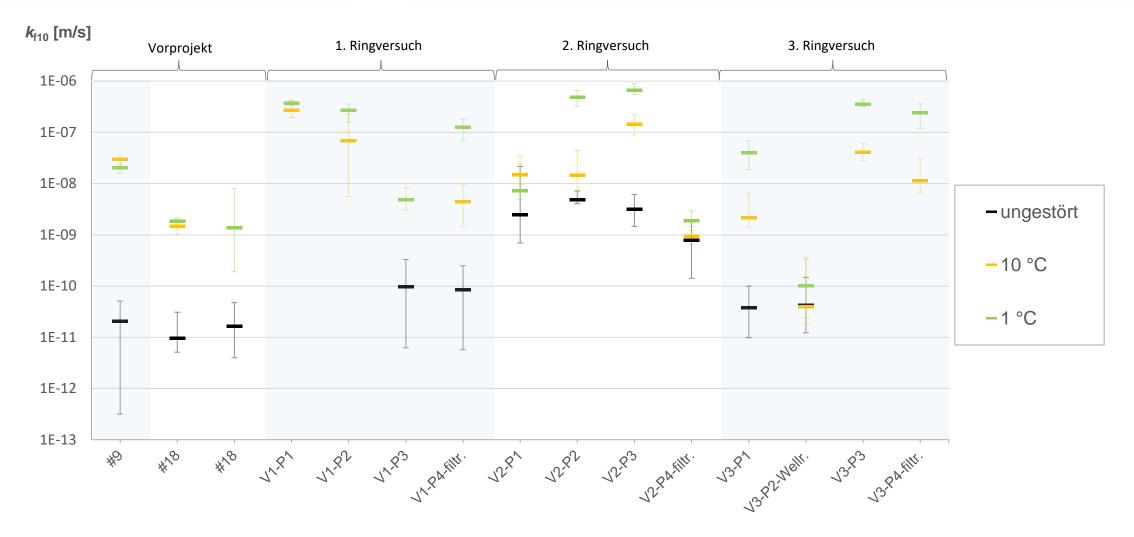
Vergleich zwischen Vollproben, MTs und STs



19.06.2024 © ZAE Bayern 27 | 3



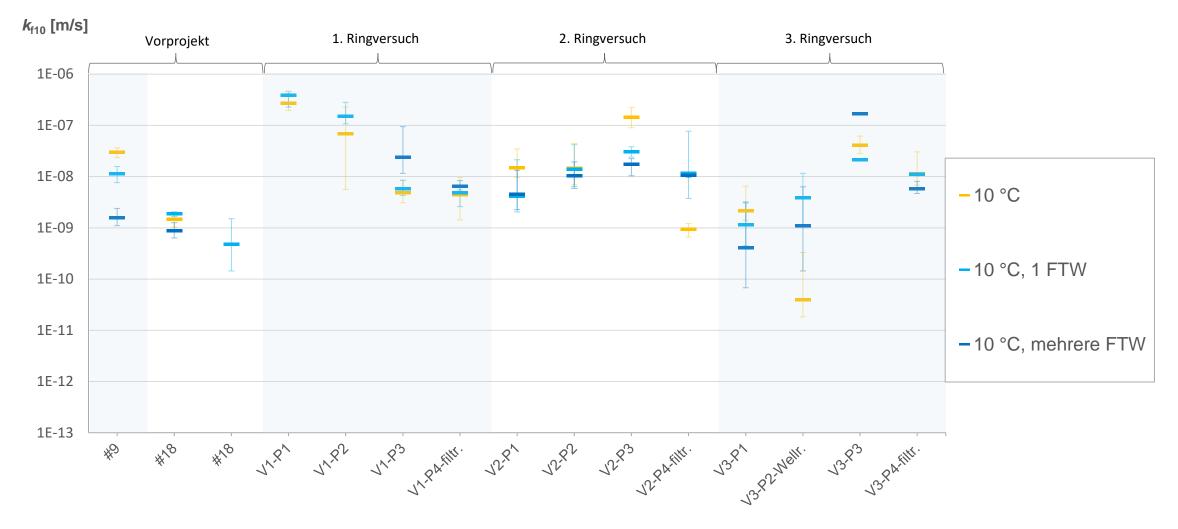
Anfängliche Temperierung



19.06.2024 © ZAE Bayern 28 | 34



Frost-Tau-Wechsel haben einen sekundären Effekt auf Systemdichtheit





Modifizierte Triax vs. Systemtriax (2. Ringversuch)

*k*_{f10} [m/s] 1E-05 - modifizierte Triax Systemtriax 1E-06 1E-07 1E-08 1E-09 1E-10 1E-11 1E-12 NO TELLY 0 0 0 0

© ZAE Bayern

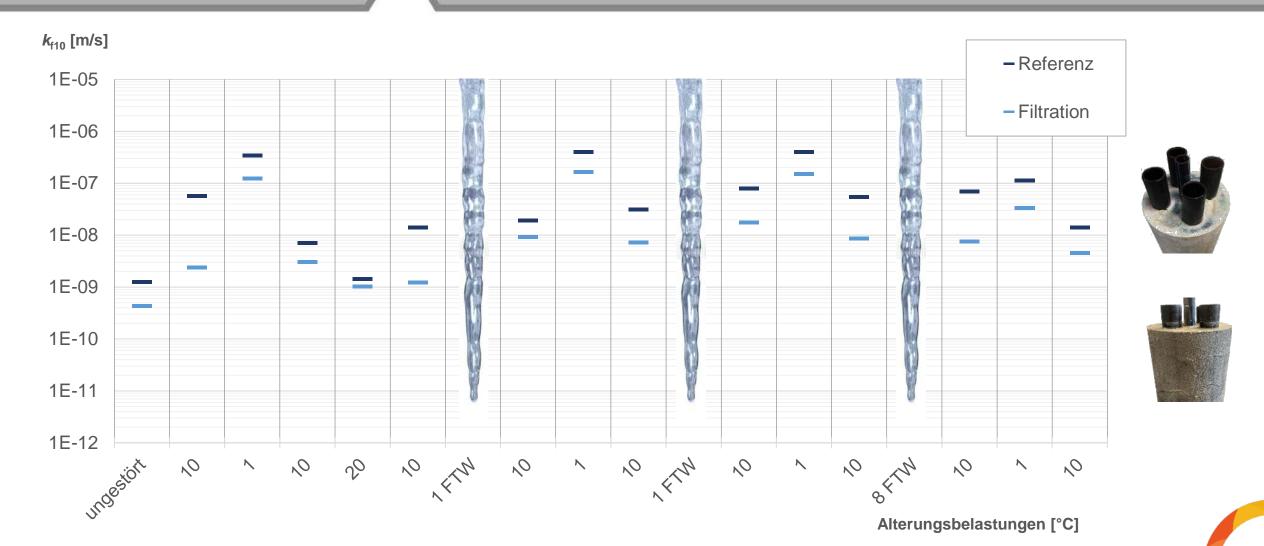




Alterungsbelastungen [°C]

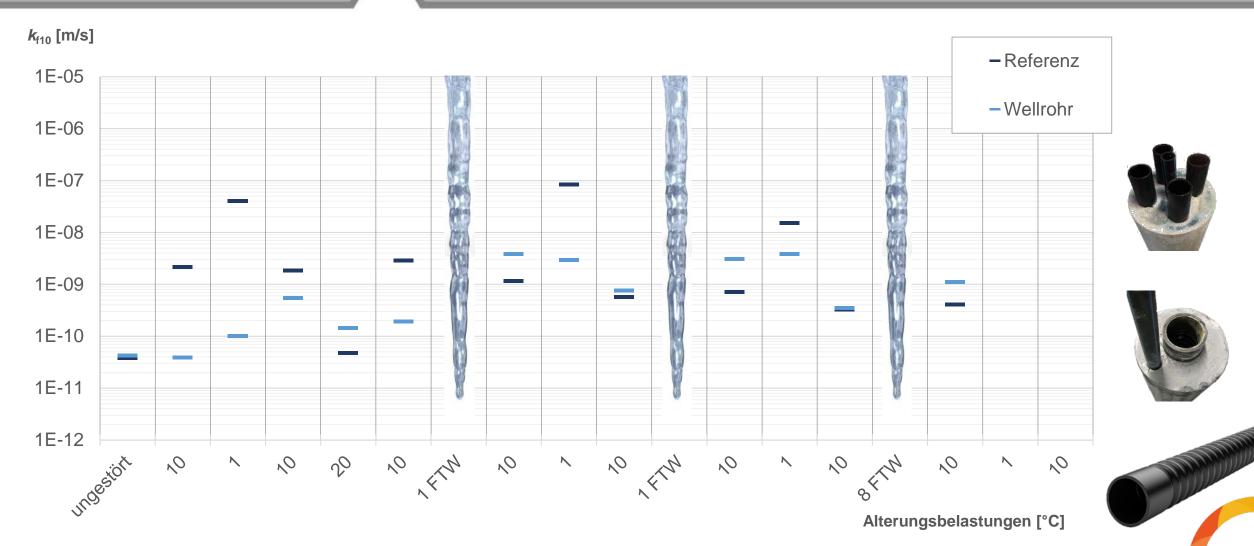


Auswirkungen der Filtration





Einmaliger Versuch mit Wellrohrprobe im Vergleich mit Standard-ST-Probe

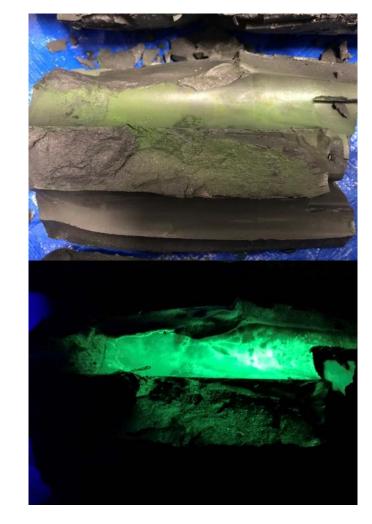




Ringspaltbildung an den Sondenrohren







19.06.2024 © ZAE Bayern



Wichtigste Ergebnisse zur vertikalen hydraulischen Durchlässigkeit

- 1) Ungestörte k_{f10} -Werte liegen im sehr schwach durchlässigen Bereich. Dabei ist die Probenherstellung sehr sensibel.
- 2) Sondenfluiddruck- und Temperaturvariationen haben gravierenden Einfluss auf Systemdurchlässigkeit (Randumläufigkeiten am Sondenrohr aufgrund von Ringspaltbildung).
 - Ab erster Absenkung auf 10 °C: Erhöhung um mehrere Zehnerpotenzen
 - Kompensation teilweise durch Sondenrohrinnendruck und Zeitfaktor möglich
- 3) Frost-Tau-Wechsel haben einen eher geringen *zusätzlichen* Einfluss auf Systemdurchlässigkeit (im Vergleich zu Einflüssen durch Temperaturabsenkungen).
- 4) Filtrierte und nicht filtrierte Systemproben weisen ein ähnliches hydraulisches Verhalten auf.
- 5) Alternative Ansätze sollten weiter untersucht werden.

19.06.2024 © ZAE Bayern 34 | 3

Gibt es Fragen?



aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

FKZ: 03EE4020A-H



Hochschule Biberach

Institut für Gebäude- und Energiesysteme (IGE)

Prof. Dr.-Ing. Roland Koenigsdorff | qewsplus@hochschule-bc.de | www.hochschule-biberach.de



Burkhardt GmbH Neuweiler

Frank Burkhardt | frank@burkhardt-bohrungen.de | www.burkhardt-bohrungen.de



EIFER Karlsruhe

European Institute for Energy Research

Dr. Roman Zorn | roman.zorn@eifer.org | www.eifer.kit.edu



Björn Nienborg| bjoern.nienborg@ise.fraunhofer.de | www.ise.fraunhofer.de



Hans G. Hauri KG Bötzingen

Frank Hauri | f.hauri@hauri.de | www.hauri.de



H.S.W. Ingenieurbüro Rostock

Jens-Uwe Kühl| info@hsw-rostock.de | www.hsw-rostock.de



Karlsruhe Institut für Technologie

Institut für Angewandte Geowissenschaften (AGW)

Dr. Hagen Steger | hagen.steger@kit.edu | www.kit.edu



Solites Stuttgart

Steinbeis Forschungsinstitut für solare und zukunftsfähige thermische Energiesysteme

Yannick Reduth | reduth@solites.de | www.solites.de



ZAE Bayern Garching

Bayrisches Zentrum für Angewandte Energieforschung e.V.

Peter Osqyan | peter.osqyan@zae-bayern.de | www.zae-bayern.de



Yannick Reduth Solites – Steinbeis Forschungsinstitut reduth@solites.de

Lukas Pendzich ZAE Bayern e. V. lukas.pendzich@zae-bayern.de