#### Workshopreihe

Nutzung regenerativer Energiequellen

für die Wärmewende



Qualitätssteigerung oberflächennaher Geothermiesysteme

### Teilprojekt 3:

Qualitätsanforderungen an

Erdwärmesonden-Verfüllbaustoffe

Yannick Reduth, Lukas Pendzich, Micha Pinnekamp, Dr. Jens Kuckelkorn



QUALITÄTSSTEIGERUNG oberflächennaher Geothermiesysteme

TP 3: Qualitätsanforderungen an Erdwärmesonden-Verfüllbaustoffe



Teilprojekt 3 Qualitätsanforderungen an Erdwärmesonden-Verfüllbaustoffe



19.06.2024



TP 3.1 – Filtrationsverhalten von Erdwärmesonden-Verfüllbaustoffen



#### solites

### 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



solites

Verfüllung im PVC-Rohr



im Tonstein / Mergel



im Sandstein



Sensortiefe: 5,50 m uGOK Suspensionsdichte: 1,94 g/cm<sup>3</sup> Sensortiefe: 47 m uGOK Suspensionsdichte: 1,57 g/cm<sup>3</sup> Sensortiefe: 44 m uGOK Suspensionsdichte: 1,94 g/cm<sup>3</sup>

Verpressende bei t = 0 h Relativdruckmessungen: 0 bar = Atmosphärendruck

19.06.2024



# Filtrationsprozesse bei der Verfüllung von Erdwärmesonden



solites



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

6 | 34



Filtrationsversuchsstand – Nachbildung der Druckverhältnisse in tiefen Bohrlochabschnitten



Schematische Darstellung des Versuchsstands









# Ergebnisse der Laboruntersuchungen von filtrierten Bohrlochabschnitten



solites



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 (mw / md) x 100 [%]

© Solites / QEWS+ Projektpartner

8 | 34



Zusammenfassung der Erkenntnisse aus den Filtrationsversuchen



solites

Auswirkungen der Filtrationsvorgänge auf den Verfüllbaustoff

- Trennung des Verf
  üllmaterials in Str
  ömungskanal 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



solites

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



Geophysikalische Bohrlochvermessung

10 | 34



## Übersicht der EWS-Ausführungen



solites



11 | 34



Freilegung und Bergung der EWS-Bauwerke



solites



lagenweise Freilegung von EWS-Bauwerken, 06/2023



## Steinbruch im Endausbauzustand





Positionen der rückgebauten Erdwärmesonden Nr. 1 bis 8



## Optische Analyse und Auffälligkeiten



solites

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

EWS 1	EWS 2	EWS 3	EWS 4	EWS 5	EWS 6	EWS 7	EWS 8
	Den er	00					

weitere Merkmale:



Position Sondenrohre



© Solites / QEWS+ Projektpartner



Auffälligkeiten

14 | 34



verrohrten Bereich

19.06.2024



## Untersuchung der Bohrlochgeometrie II





Sonde 7: Freilegung im Übergang von Löss zu Kalkstein



Bohrlochdurchmesser entspricht Bohrdurchmesser solites



# Vergleich von Filtrationsversuchen mit realen EWS aus Merdingen



solites



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 [%]

© Solites / QEWS+ Projektpartner





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

į,

Teilprojekt 3.2 Ermittlung der hydraulischen Durchlässigkeit von Systemproben

Teilprojekt 3.3 Realitätsnahe Kombination von Untersuchungsaspekten von Filtrationseffekten



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





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





TP3.2 Ermittlung der hydraulischen Durchlässigkeit von Systemproben





TP3.3 Realitätsnahe Kombination von Untersuchungsaspekten von Filtrationseffekten



© Solites / QEWS+ Projektpartner





Querschnitt der Referenzprobe Baustoffdichte: 1,76 kg/l





 $k_{\rm f10}\approx 4\cdot 10^{-5}\,m/s$ 





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



Zusätzliche Untersuchungen an modifizierten Triaxialzellen (MT) und Vollproben







# 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					Image: Second system       Image: Second system       3 Proben tonbasiert, mit PE-Rohr         Image: Second system       Image: Second system       3 Proben Tonpellets mit PE-Rohr

© ZAE Bayern



# Typischer Messverlauf an Systemtriaxialzellen

*k*<sub>f10</sub> [m/s] *T*[°C] - Referenzprobe 26.4 - Filtrationsprobe **20°C** 1e-7 20.5 14.5 **↓10°C ↓10°C** 1e-8 8.60 8.00 7.41 6.81 6.22 1e-9 5.62 5.024.43 3.83 1e-10 00:00:00 00:00:00 00:00:00 00:00:00 03.09.2023 10.09.2023 17.09.2023 24.09.2023

Temperaturabhängigkeit

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

#### Zeitabhängigkeit

- k<sub>f</sub> fällt stetig aufgrund des Rohrkriechens durch erhöhten Sondenrohrdruck
- T-Absenkungen haben meist einen kurzfristigen Peak zur Folge





## Ergebnisse aller vermessenen Proben





# Vergleich zwischen Vollproben, MTs und STs





### Anfängliche Temperierung





## Frost-Tau-Wechsel haben einen sekundären Effekt auf Systemdichtheit





# Modifizierte Triax vs. Systemtriax (2. Ringversuch)

#### *k*<sub>f10</sub> [m/s]







## Auswirkungen der Filtration



19.06.2024



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



32 | 34



## 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.

Gefördert durch:

# Gibt es Fragen?

Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

FKZ: 03EE4020A-H

**Hochschule Biberach** Institut für Gebäude- und Energiesysteme (IGE)

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

#### BURKHARDT

HBC.

HOCHSCHULE BIBERACH

UNIVERSITY

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

**Fraunhofer** Freiburg Institut für Solare Energiesysteme (ISE) 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

#### Qualitätssteigerung oberflächennaher Geothermiesysteme

**QEWS**(plus)

Yannick Reduth Solites – Steinbeis Forschungsinstitut reduth@solites.de

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

#### © QEWSplus-Projektpartner



#### 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 Osgyan | peter.osgyan@zae-bayern.de | www.zae-bayern.de

ZAE BAYERN