

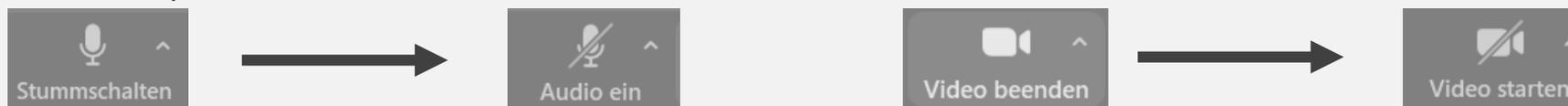
# Herzlich Willkommen zur Online-Workshopreihe „Nachhaltige Wärmeversorgung mittels Wärmepumpe: Anwendung – Qualitätssicherung - Quartiersversorgung“

heutiges Forschungsprojekt:  
„QEWSplus –



## Qualitätssteigerung oberflächennaher Geothermiesysteme“

- Wer nicht präsentiert oder an der Diskussion teilnimmt, schaltet bitte sein Mikrofon und die Kamera aus.



- Fragen bitte in den Chat schreiben oder die Hand haben.



- Die Präsentationen werden im Anschluss der Workshopreihe an alle Teilnehmer versendet oder per Downloadlink zur Verfügung gestellt.

Workshopreihe:

Nachhaltige Wärmeversorgung mittels Wärmepumpe:

Anwendung – Qualitätssicherung – Quartiersversorgung



Qualitätssteigerung  
oberflächennaher Geothermiesysteme

Einführung & Übersicht über das Vorhaben

Roland Koenigsdorff

**HBC.**  
HOCHSCHULE  
BIBERACH  
UNIVERSITY  
OF APPLIED SCIENCES

**BURKHARDT**  
Geologische und  
hydrologische  
Bohrungen

**eifer**

**HAURI**

**HSW** Ingenieurbüro  
Gesellschaft für Energie und Umwelt mbH

**KIT**  
Karlsruher Institut für Technologie

**solites**

Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Klimaschutz

**Fraunhofer**  
ISE

In Zusammenarbeit mit:



aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

Diese Unterlagen sind ausschließlich für den persönlichen Gebrauch durch die Teilnehmerinnen und Teilnehmer des Workshops „Nachhaltige Wärmeversorgung mittels Wärmepumpe: Anwendung – Qualitätssicherung – Quartiersversorgung“ vom 10.05.2023 bestimmt.

In diesen Unterlagen ist z. T. geistiges Eigentum Dritter in zitierender Weise wiedergegeben, weshalb eine unrechtmäßige Weiterverbreitung dieser Unterlagen neben ideellen auch finanzielle Schäden nach sich ziehen kann, für die der Verursacher haftbar gemacht wird.

Eine Weitergabe an außenstehende Dritte in irgendeiner Form ist deshalb grundsätzlich nicht gestattet. Für die Teile dieses Dokuments, an denen die Verfasser selbst die Urheberrechte halten, werden auf Anfrage gerne weitergehende Nutzungsrechte (für Zwecke der Lehre und Forschung kostenlos) gewährt.

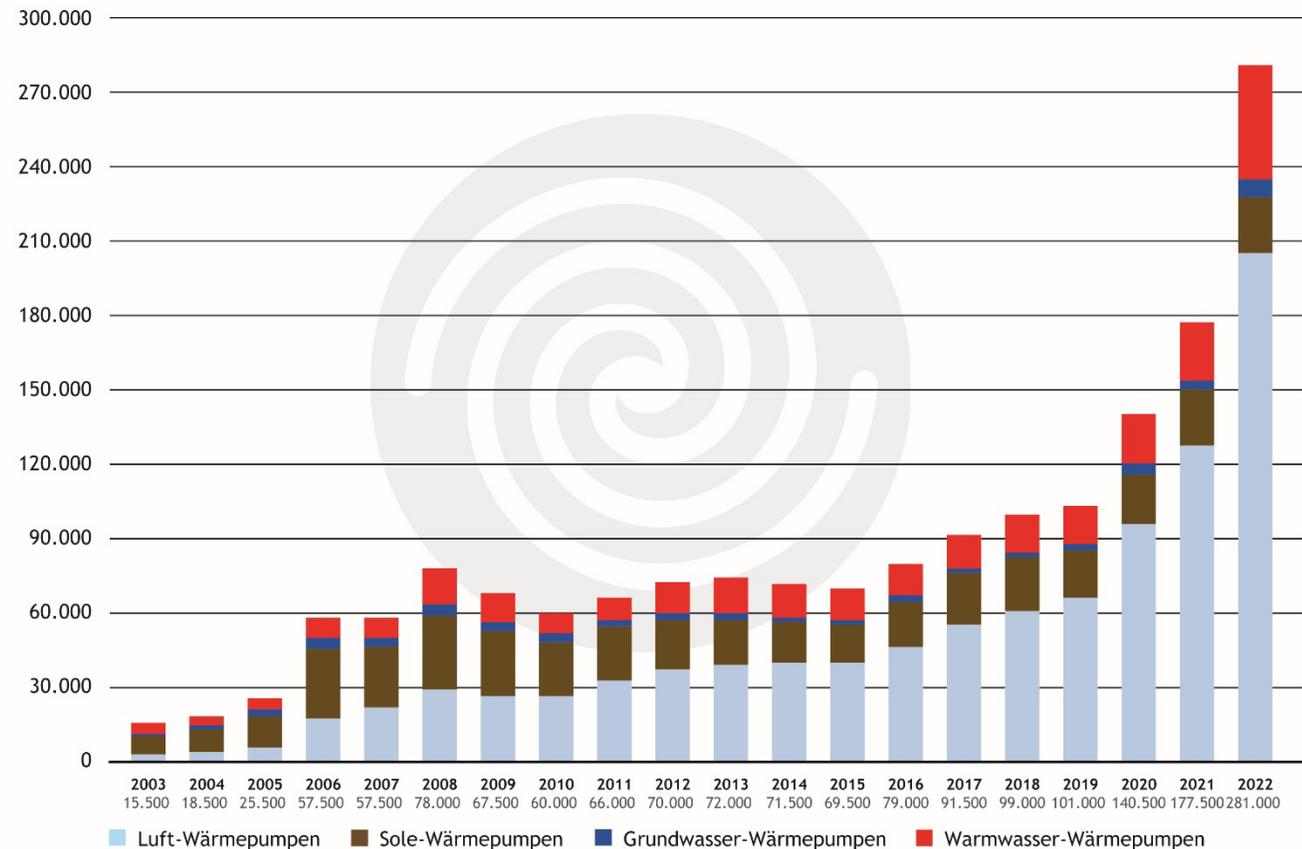
## Marktentwicklung Wärmepumpen & ONG

↑↑ **Wärmepumpen boomen**

	2021	2022
Heizungs-WP:	+28 %	<b>+53 %</b>
Geothermie-WP:	+10 %	<b>+14 %</b>

**Ziel: + 500.000 WP/a**

Absatzentwicklung Wärmepumpen in Deutschland 2003-2022  
 Nach Wärmepumpentypen

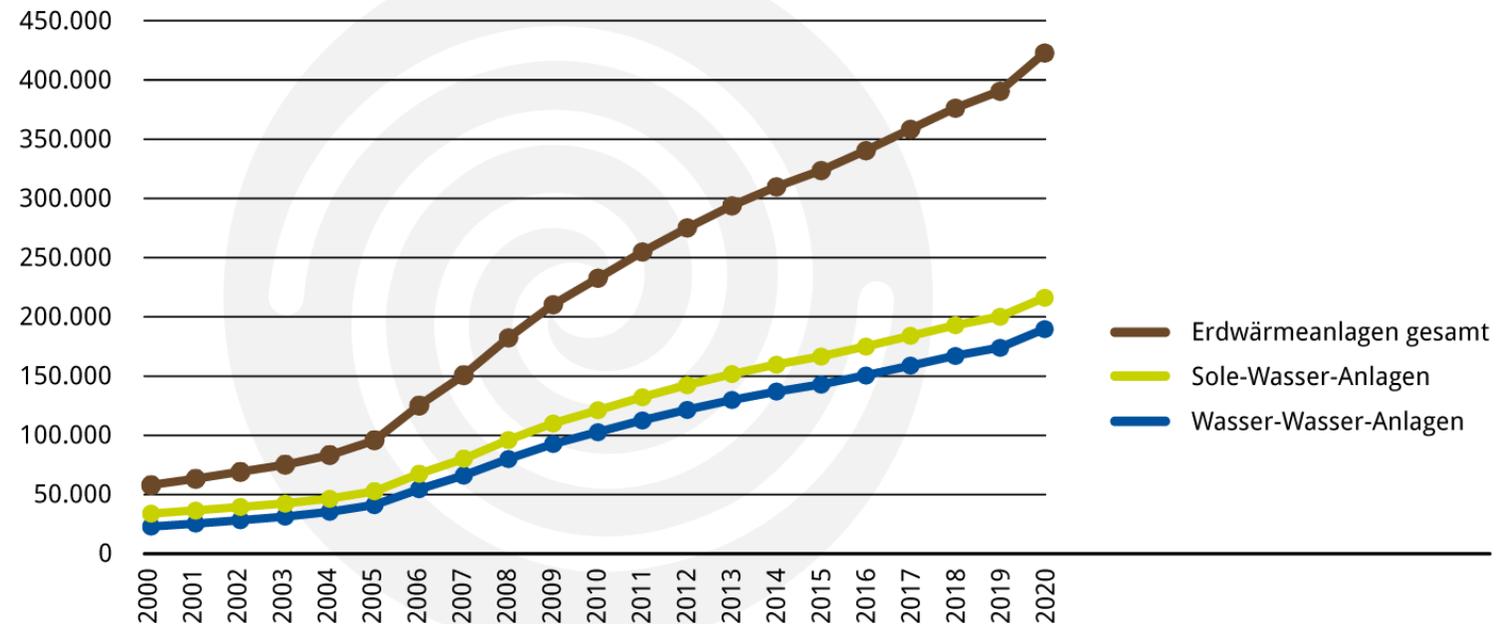


Quelle: BWP/BDH-Absatzstatistik

## Bestandsentwicklung Wärmepumpen & ONG

Gebäudebestand in D:  
ca. 21 Mio. Gebäude

Oberflächennahe Geothermieprojekte  
in Deutschland (Anzahl Wärmepumpen 2000-2020)



Quelle: BWP-Branchenstudie 2021

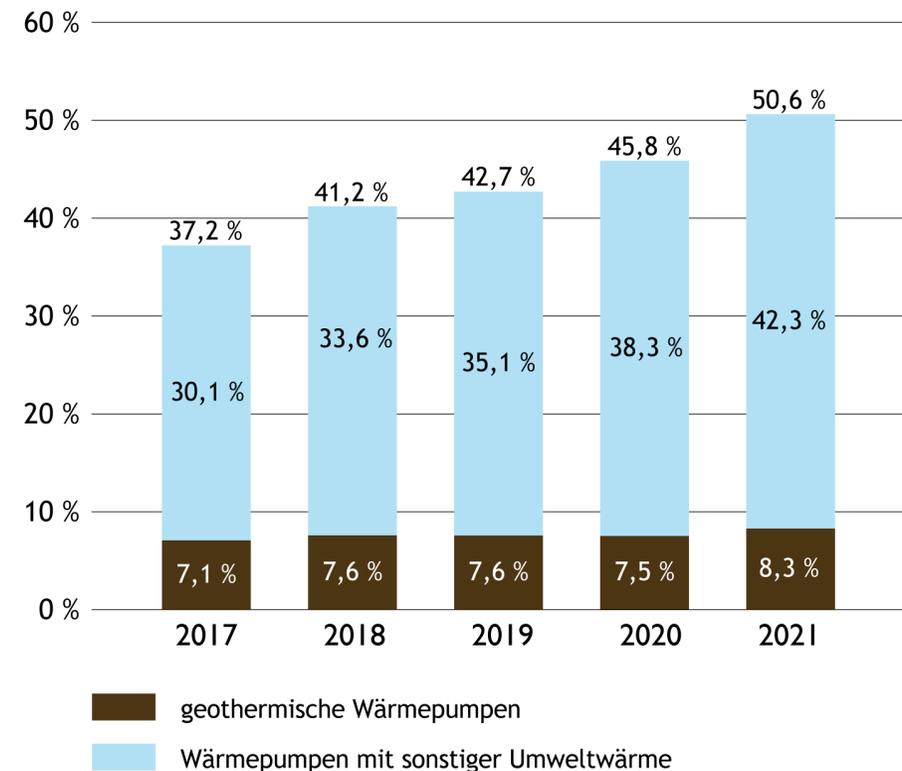


## Marktentwicklung Wärmepumpen & ONG

↑ **Wärmepumpen dominieren**

↓ **Geothermie-WP verlieren in Relation Marktanteile!**

Wärmepumpen-Marktanteile in Deutschland  
 Baufertigstellungen neuer Wohngebäude 2017 - 2021



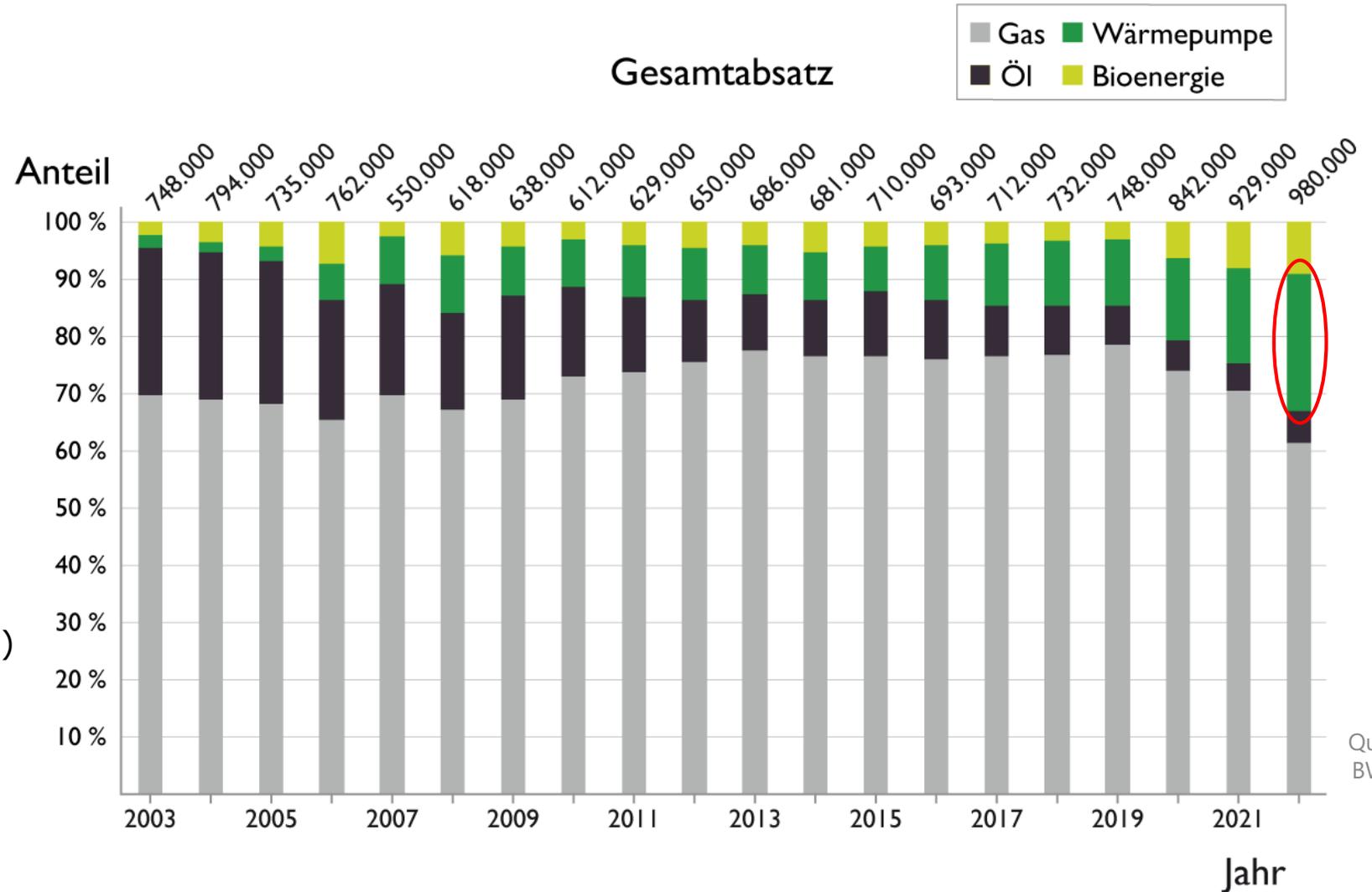
Quelle: Statistisches Bundesamt. Baufertigstellungen bei Wohngebäuden nach vorwiegend verwendeter primärer Heizenergie

## Marktentwicklung Wärmepumpen

Gesamtmarkt  
 (Bestand + Neubau):

↓↓ **Geothermie-WP zu schwach im Markt**  
 ≈ 3 % v. Gesamtmarkt  
 (2021 → 2022: ≈ 2,9 → 3,2 %)

**Ziel: Vervielfachung!**



Quelle & ©:  
 BWP / BDH

## **Verbesserung der Marktdurchdringung der oberflächennahen Geothermie durch:**

- Wirtschaftlichkeit verbessern:
  - Investitionskosten begrenzen/senken
  - Planungs- und Genehmigungsaufwand reduzieren
  - Betriebskostenvorteil sichern und ausbauen
- Sicherheit & Akzeptanz erhöhen:
  - Schäden durch Bohrungen sicher vermeiden
  - Qualität besser nachweisen
  - Betrieb sicherer machen & Performance sichern

## **Motivation**

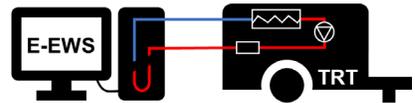
- Steigerung der Verbreitung von oberflächennahen Geothermiesystemen
- Steigerung der Bekanntheit, Attraktivität und Akzeptanz der oberflächennahen Geothermie

## **Ziele**

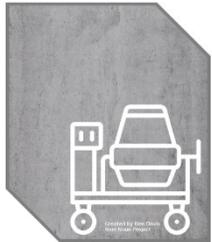
- Qualitätssteigerung durch eine gesamtheitliche Betrachtung von der Planungsphase, über die Ausführung bis hin zur Inbetriebnahme
- Vermeiden von Rechtstreitigkeiten und Schadensfällen
- Ökonomische und ökologische Optimierung von oberflächennahen Geothermiesystemen



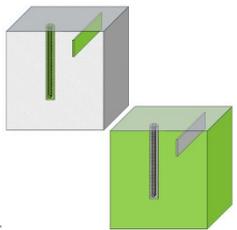
## TP 1: Erweiterte thermische Testmethoden



## TP 2: Weiterentwicklung des TRT-Prüfgerätes



## TP 3: Qualitätsanforderungen an Erdwärmesonden-Verfüllbaustoffe



## TP 4: Multifunktionale Modellierung von oberflächennahen Geothermiesystemen

Federführung

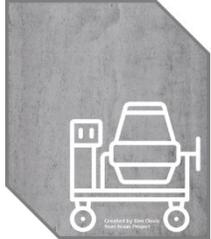




## TP 1: Erweiterte thermische Testmethoden

- Systemvielfalt: Erdwärmesonden, Erdwärmekollektoren
- Verfüllqualität: Messmethoden & Datenbasis beim TRT verbessern
- Qualitätssicherung, Qualitätsnachweis, Parameterermittlung:  
Erdwärmesonden-Bauwerke, andere geothermische Quellensysteme  
& gesamte erdgekoppelte Wärmepumpen-Anlage

→ Planung, Betrieb & Qualitätsnachweis unterschiedlicher Systeme erleichtern



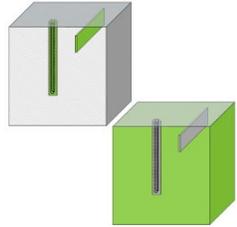
## **TP 3: Qualitätsanforderungen an Erdwärmesonden- Verfüllbaustoffe**

Qualität und Sicherheit der Bohrlochabdichtung erhöhen:

- Schäden durch Bohrungen sicherer vermeiden
- Einsatzbereich von Erdwärmesonden im Frostbetrieb erweitern

→ Erkenntnisse zur bestmöglichen Ausführung der Verfüllung/Abdichtung

→ Genehmigungsmöglichkeiten absichern und möglichst ausbauen



## **TP 4: Multifunktionale Modellierung von oberflächennahen Geothermiesystemen**

- Systemvielfalt: Erdwärmesonden, Erdwärmekollektoren, Bodenabsorber
- Konsistente Modellbasis für verschiedene geothermische Quellensysteme
- Bessere und einfachere Planungswerkzeuge für breite Anwendung
- Einzelanlagen, Kombinationen von Quellensystemen und Areale/Quartiere

→ Systemvielfalt, Anwendungsbreite & -größe unterstützen

→ Know-how-Transfer für Anwender und Fortbildung vereinfachen

# Vielen Dank für die Aufmerksamkeit!

Gefördert durch:



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](mailto:qewsplus@hochschule-bc.de) | [www.hochschule-biberach.de](http://www.hochschule-biberach.de)



## Burkhardt GmbH Neuweiler

Frank Burkhardt | [frank@burkhardt-bohrungen.de](mailto:frank@burkhardt-bohrungen.de) | [www.burkhardt-bohrungen.de](http://www.burkhardt-bohrungen.de)



## EIFER Karlsruhe

European Institute for Energy Research

Dr. Roman Zorn | [roman.zorn@eifer.org](mailto:roman.zorn@eifer.org) | [www.eifer.kit.edu](http://www.eifer.kit.edu)



## Fraunhofer Freiburg

Institut für Solare Energiesysteme (ISE)

Björn Nienborg | [bjoern.nienborg@ise.fraunhofer.de](mailto:bjoern.nienborg@ise.fraunhofer.de) | [www.ise.fraunhofer.de](http://www.ise.fraunhofer.de)



## Hans G. Hauri KG Bötzingen

Frank Hauri | [f.hauri@hauri.de](mailto:f.hauri@hauri.de) | [www.hauri.de](http://www.hauri.de)



## H.S.W. Ingenieurbüro Rostock

Institut für Angewandte Geowissenschaften (AGW)

Jens-Uwe Kühl | [info@hsw-rostock.de](mailto:info@hsw-rostock.de) | [www.hsw-rostock.de](http://www.hsw-rostock.de)



## Karlsruhe Institut für Technologie

Institut für Angewandte Geowissenschaften (AGW)

Dr. Hagen Steger | [hagen.steger@kit.edu](mailto:hagen.steger@kit.edu) | [www.kit.edu](http://www.kit.edu)



## Solites Stuttgart

Steinbeis Forschungsinstitut für solare und zukunftsfähige thermische Energiesysteme

Yannick Reduth | [reduth@solites.de](mailto:reduth@solites.de) | [www.solites.de](http://www.solites.de)



## ZAE Bayern Garching

Bayrisches Zentrum für Angewandte Energieforschung e.V.

Peter Osgyan | [peter.osgyan@zae-bayern.de](mailto:peter.osgyan@zae-bayern.de) | [www.zae-bayern.de](http://www.zae-bayern.de)



Qualitätssteigerung  
oberflächennaher Geothermiesysteme

[www.qewsplus.de](http://www.qewsplus.de)

Roland Koenigsdorff  
Hochschule Biberach  
Institut für Gebäude- und Energiesysteme  
Karlstraße 11  
88400 Biberach an der Riß  
Tel.: +49 7351 582 255  
[koenigsdorff@hochschule-bc.de](mailto:koenigsdorff@hochschule-bc.de)

Workshopreihe:

Nachhaltige Wärmeversorgung mittels Wärmepumpe:

Anwendung – Qualitätssicherung – Quartiersversorgung



Qualitätssteigerung  
oberflächennaher Geothermiesysteme

## Teilprojekt 1: Erweiterte thermische Testmethoden

Adinda Van de Ven, Roland Koenigsdorff, Fabian Neth,  
Hanne Karrer, Peter Osgyan, Martin Fuchs,

Petra Huttenloch, Anna Albers, Roman Zorn, Hagen Steger

**HBC.**  
HOCHSCHULE  
BIBERACH  
UNIVERSITY  
OF APPLIED SCIENCES

**BURKHARDT**  
Geologische und  
hydrologische  
Bohrungen

**eifer**

**HAURI**

**H.S.W.** Ingenieurbüro  
Gesellschaft für Energie und Umwelt mbH

**KIT**  
Karlsruher Institut für Technologie

**solites**

Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Klimaschutz

**Fraunhofer**  
ISE

In Zusammenarbeit mit:



ZAE BAYERN

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

Diese Unterlagen sind zunächst ausschließlich für den persönlichen Gebrauch durch die Teilnehmerinnen und Teilnehmer „Nachhaltige Wärmeversorgung mittels Wärmepumpe: Anwendung – Qualitätssicherung – Quartiersversorgung“ vom 10.05.2023 bestimmt.

In diesen Unterlagen ist z. T. geistiges Eigentum Dritter in zitierender Weise wiedergegeben, weshalb eine unrechtmäßige Weiterverbreitung dieser Unterlagen neben ideellen auch finanzielle Schäden nach sich ziehen kann, für die der Verursacher haftbar gemacht wird.

Eine Weitergabe an außenstehende Dritte in irgendeiner Form ist deshalb grundsätzlich nicht gestattet. Für die Teile dieses Dokuments, an denen die Verfasser selbst die Urheberrechte halten, werden auf Anfrage gerne weitergehende Nutzungsrechte (für Zwecke der Lehre und Forschung kostenlos) gewährt.



## Vorgehen

### Teilprojekt 1 Erweiterte thermische Testmethoden

#### TP 1.1: In-Situ-Anlagen-TRT

Modellgestützte  
Auswertung von  
Messdaten einer  
EWS-Anlage inkl.  
WP

#### TP 1.2: Charakterisierung von Grabenkollektoren

TRT-Verfahren für  
Kollektoren (mit  
Berücksichtigung  
der Eisbildung im  
Erdreich)

#### TP 1.3: Kurzzeit-Verfüll- Analyse-TRTs und weitere EWS- Messmethoden

3D-Kurzzeit-TRTs  
 $\lambda$ - und  $c_p$ -Messungen  
unterschiedlicher  
Materialien



TP 1.1:  
In-Situ-Anlagen-TRT

Modellgestützte  
Auswertung von  
Messdaten einer  
EWS-Anlage inkl.  
WP

Installation und Untersuchung einer Erdwärmesondenanlage in Neuweiler (Landkreis Calw, Schwarzwald)

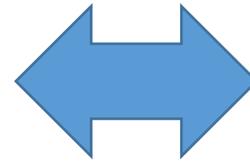
Flexible Betriebsmöglichkeiten mit drei Wärmepumpen und vier Sonden

Detailliertes Messkonzept → Ableitung der Anforderungen an eine **mobile Messbox**

Tool zur Datenauswertung erstellt: InnoDATA energy



Thermal Response Tests nach VDI 4640 Blatt 5 an einzelnen Erdwärmesonden



In-situ-Anlagen-TRT:  
Funktion und Leistungsfähigkeit der gesamten Geothermieanlage

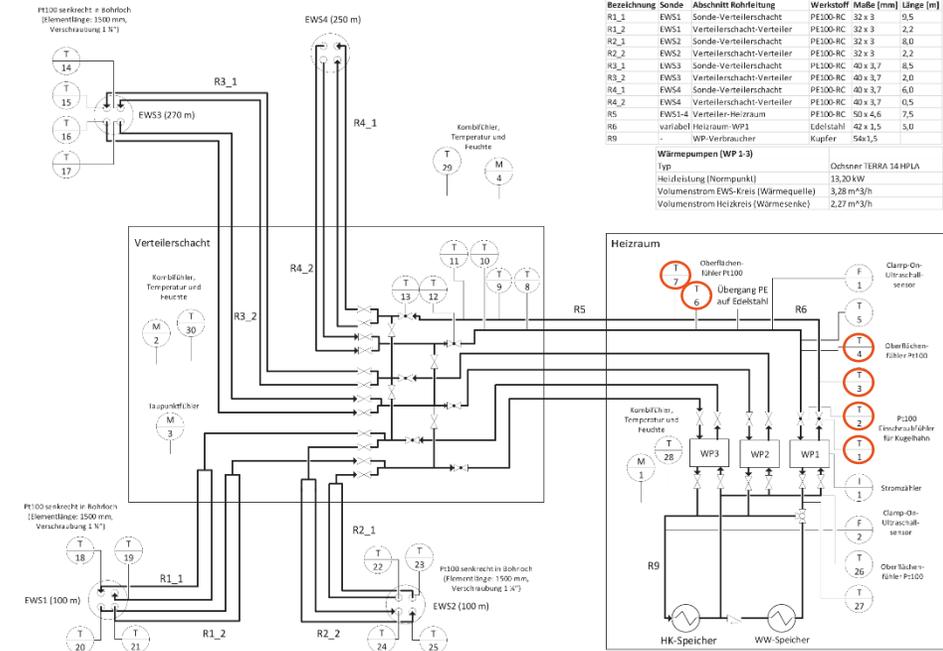
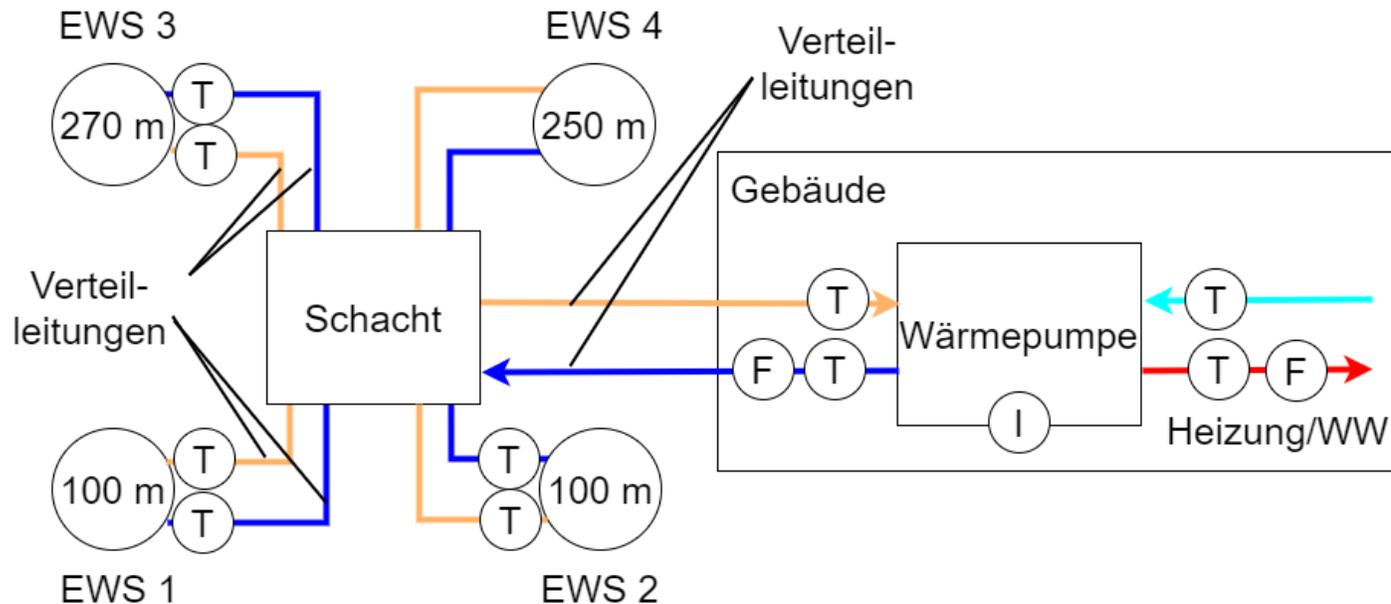
Betrachteter Anlagenumfang: Geothermie-Wärmeübertrager (Erdwärmesonden), Anbinde- und Verteilleitungen bis zur Quellwärmeabgabe an die Wärmepumpe und/oder Nutzwärmeabgabe durch die Wärmepumpe

- Qualitätskontrolle und Funktionsnachweis bei der Abnahme
- Qualitätsnachweis der gesamten Geothermieanlage für den Anlagenersteller und den Auftraggeber bzw. späteren Anlagenbetreiber

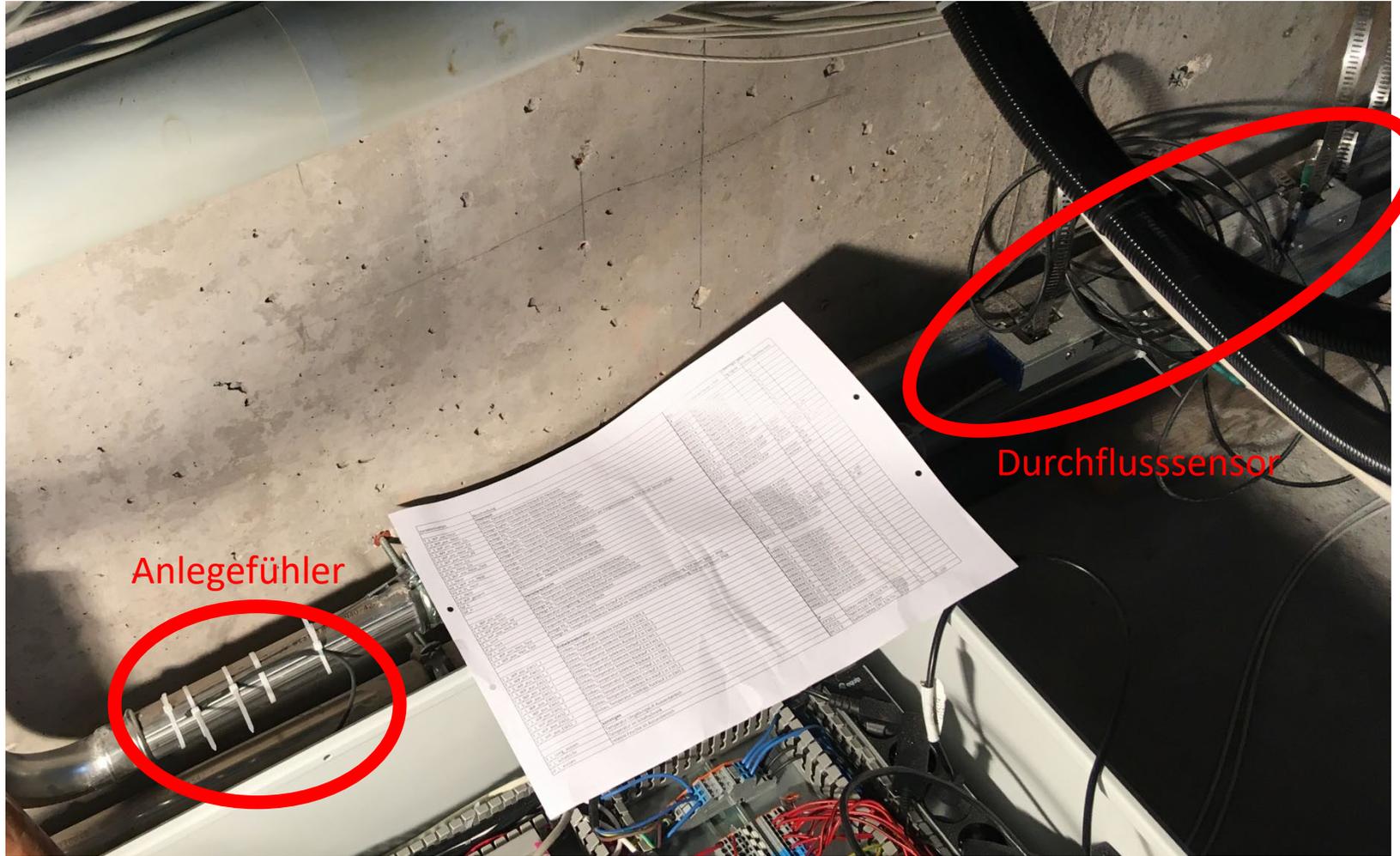


Aufbau der untersuchten Anlage in Neuweiler:

- 4 Erdwärmesonden (EWS) mit unterschiedlicher Tiefe
- 3 Wärmepumpen mit je 13,2 kW Heizleistung für Heizung und Trinkwasser
- Messeinrichtungen für Temperatur, Volumenstrom, Leistung, Luftfeuchtigkeit



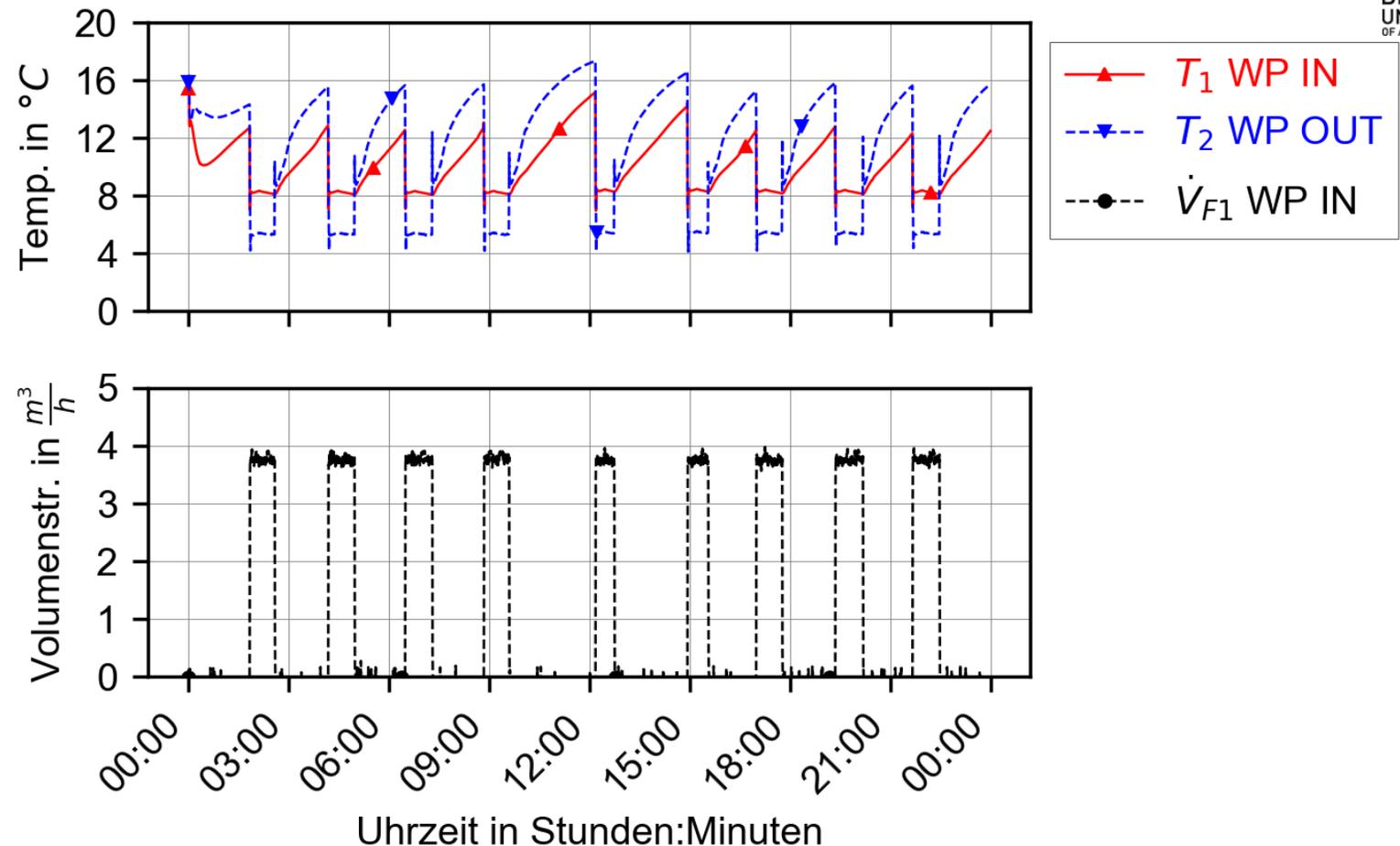






Betrachtung der Messdaten am 02.01.2023:

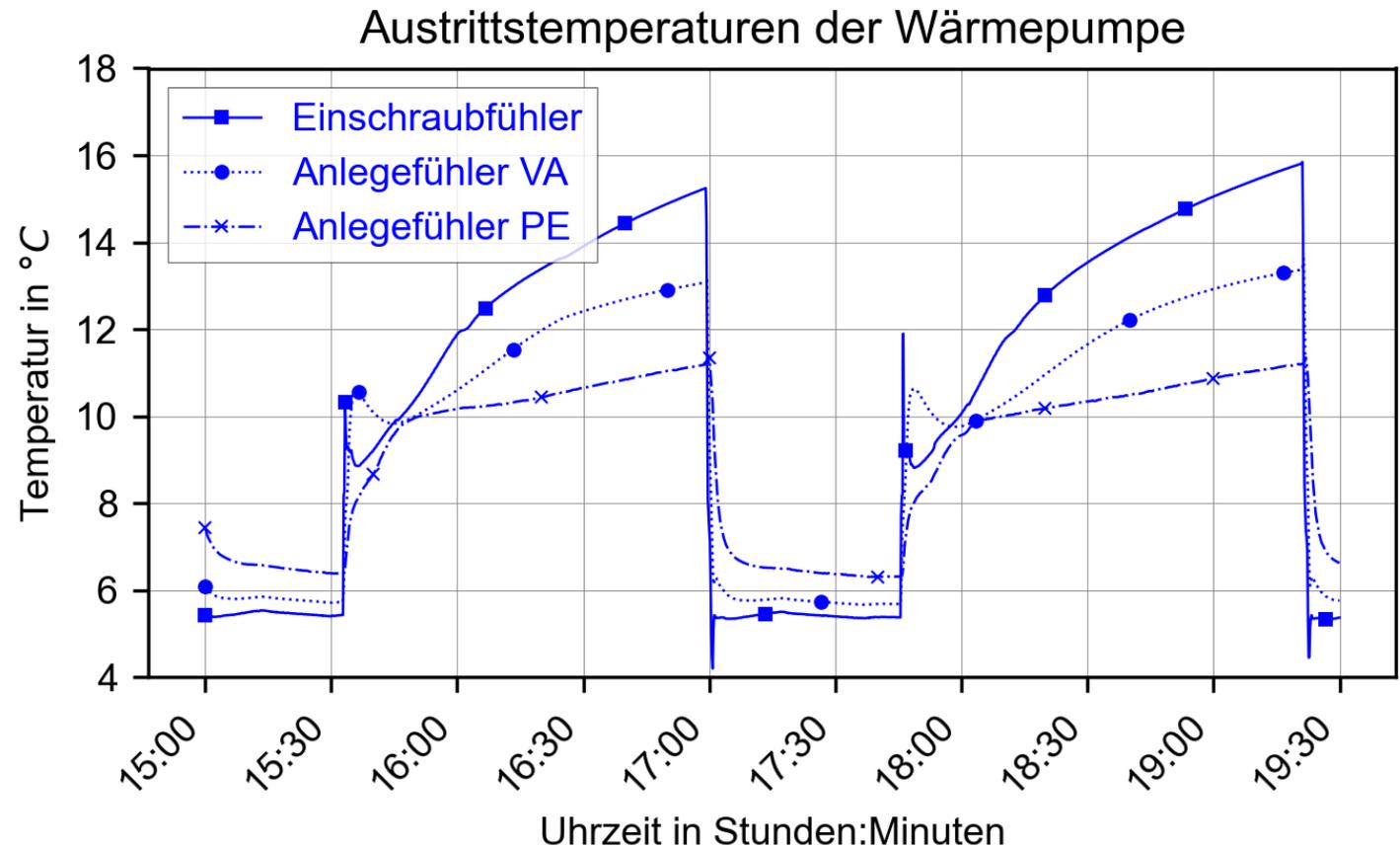
- WP startet mehrmals am Tag
- Volumenstrom im Betrieb der WP bei ca. 3,7 m<sup>3</sup>/h
- Spreizung liegt bei ca. 2,9 K
- ca. 12.6 kW geoth. Leistung
- Während die WP ausgeschaltet ist, gleicht sich die Fühlertemperatur wieder der Raumtemperatur an





Betrachtung der Messdaten am  
 02.01.2023 von 15:30 bis  
 19:30 Uhr:

- WP Betrieb bis ca. 15:30 Uhr  
 und von ca. 17:00 bis 17:45 Uhr
- Zu Beginn des WP-Betriebs  
 größere Abweichung  
 aufgrund der Trägheit,  
 danach nahezu konstante  
 Abweichung
- Vergleich um 17:40 Uhr:
  - Einschraubfühler 5,4 °C
  - Anlegefühler VA 5,7 °C
  - Anlegefühler PE 6,3 °C

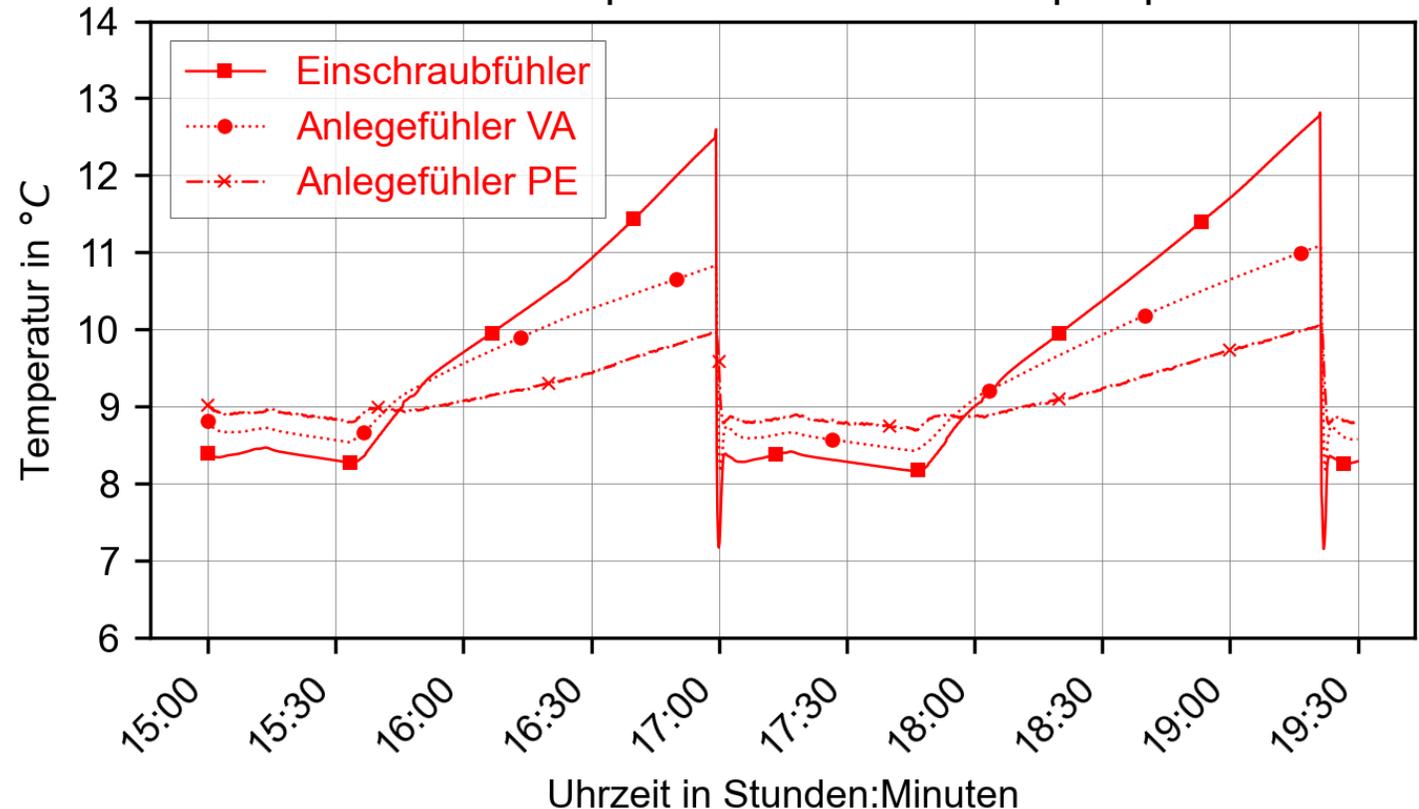




Betrachtung der Messdaten am  
 02.01.2023 von 15:30 bis  
 19:30 Uhr:

- WP Betrieb bis ca. 15:30 Uhr  
 und von ca. 17:00 bis 17:45 Uhr
- Zu Beginn des WP-Betriebs  
 hier nur geringere  
 Abweichung, die dann  
 nahezu konstant bleibt
- Vergleich um 17:40 Uhr:
  - Einschraubfühler 8,2 °C
  - Anlegefühler VA 8,4 °C
  - Anlegefühler PE 8,7 °C

Eintrittstemperaturen der Wärmepumpe





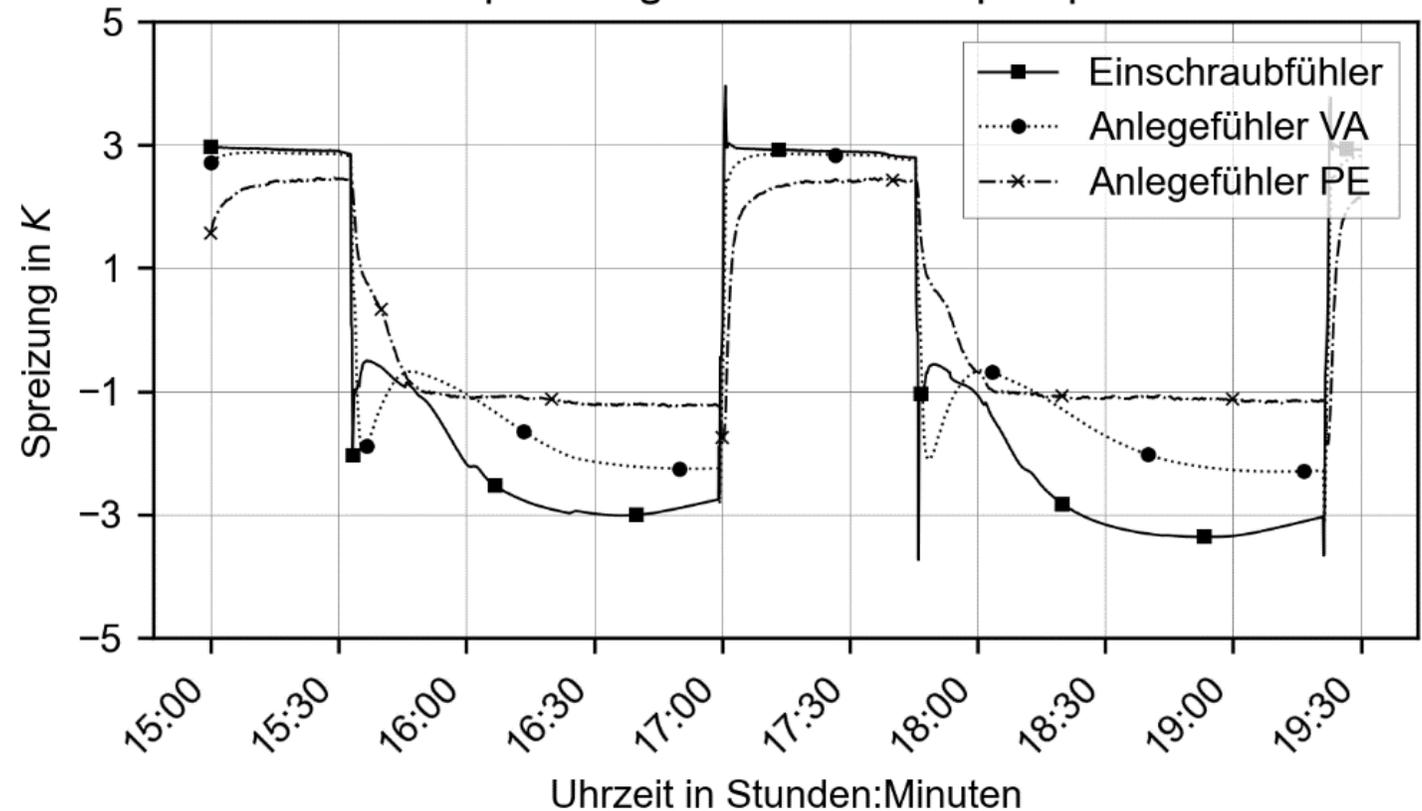
Betrachtung der Messdaten am  
 02.01.2023 von 15:30 bis  
 19:30 Uhr:

Spreizung zwischen WP-Eintritt  
 und Austritt durch die  
 Übergangswiderstände der  
 Materialien beeinflusst.

→Edelstahlrohr 42 x 1,5 mm

→PE100-RC-Rohr 50 x 4,6 mm

Spreizung an der Wärmepumpe



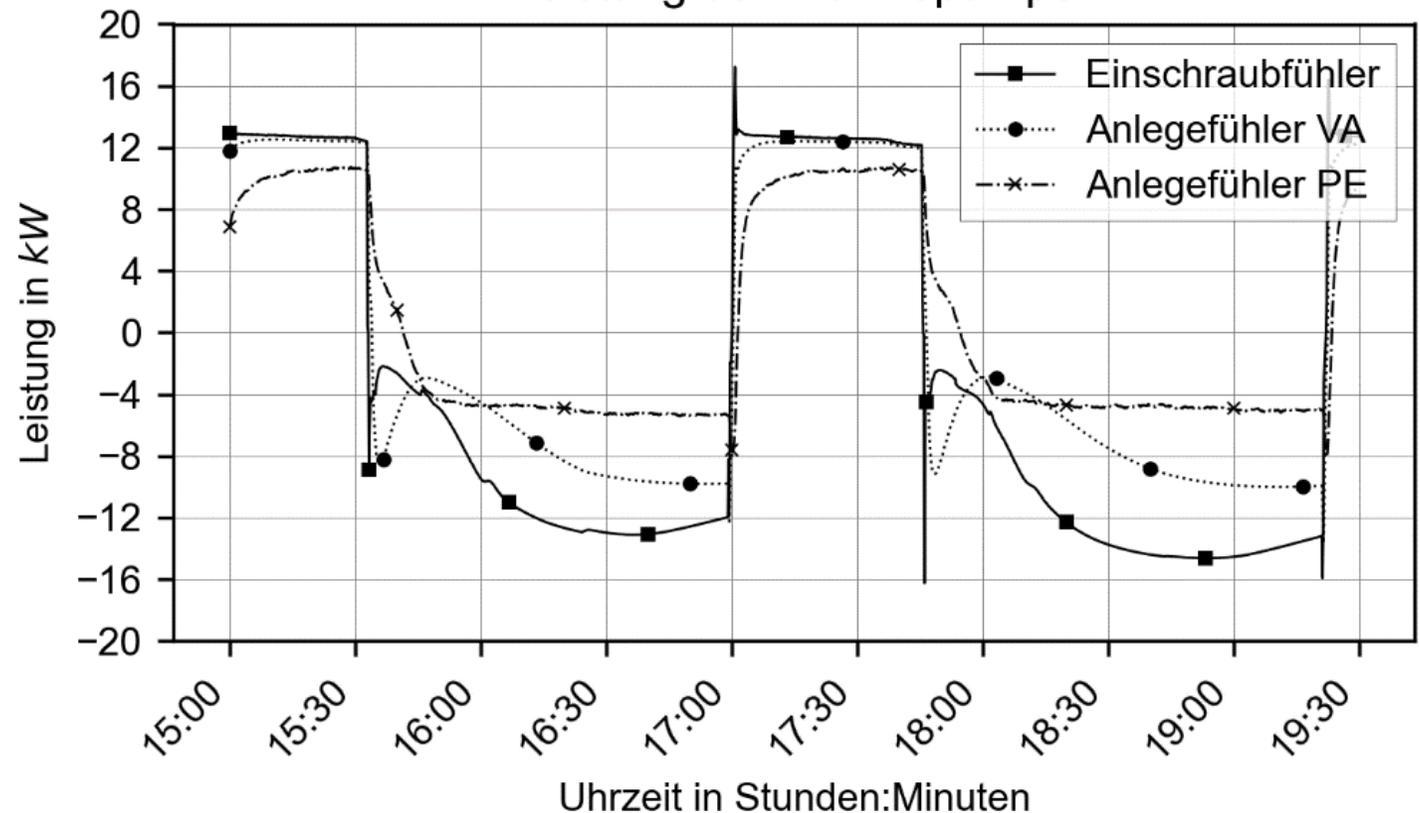


Betrachtung der Messdaten am  
 02.01.2023 von 15:30 bis  
 19:30 Uhr:

Direkte Auswirkung der  
 geringeren Spreizung auf die  
 daraus berechnete Leistung!

Die ermittelte Leistungen über  
 Einschraub- und Anlegefühler  
 am Edelstahlrohr gleichen sich  
 mit der Zeit an, die Leistung  
 anhand der Messung am PE-  
 Rohr weicht im Mittel um ca. 2  
 kW ab.

Leistung der Wärmepumpe

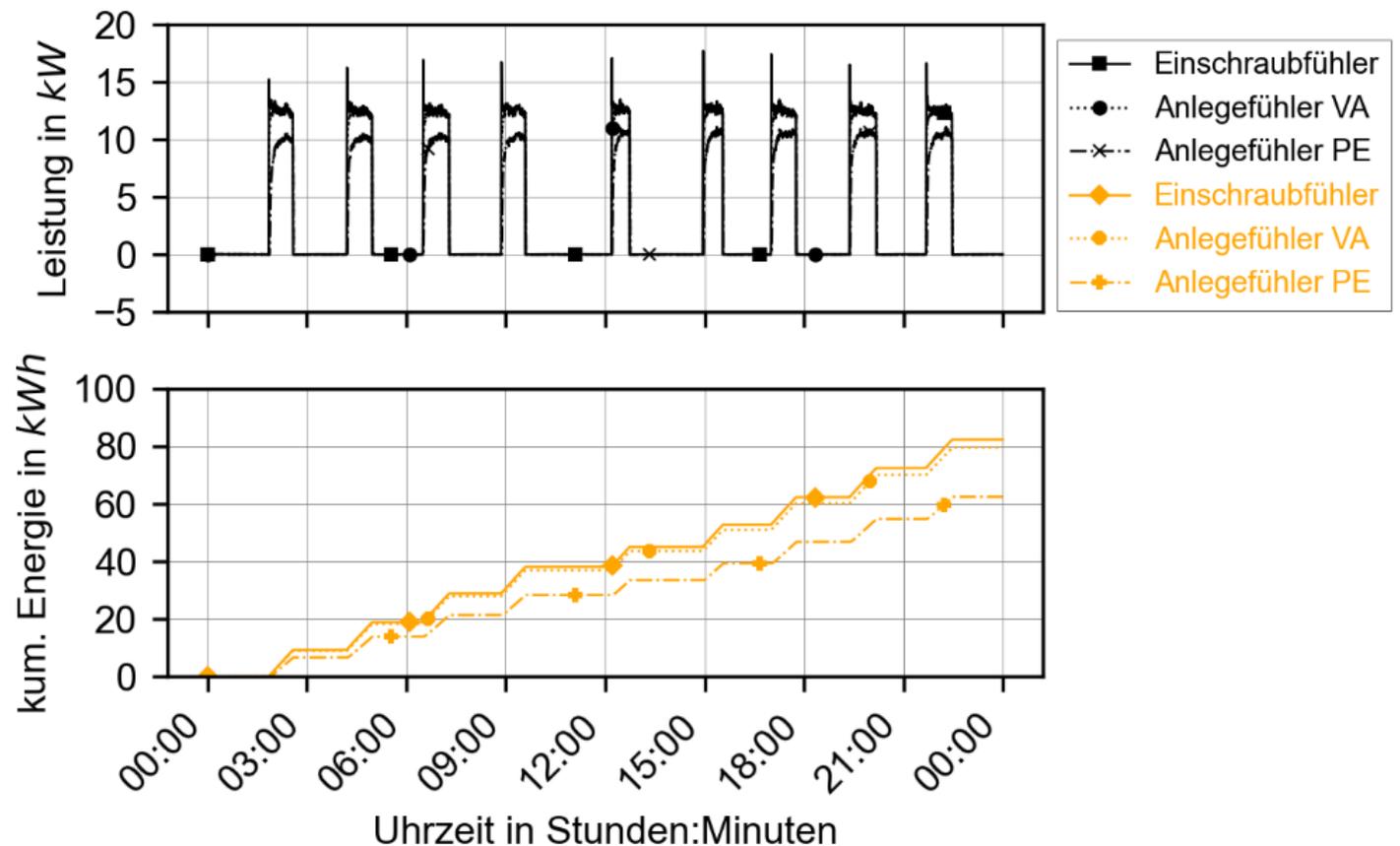




Betrachtung der geoth. Entzugsleistungen und kumulierten Energiemengen am 02.01.2023:

Wesentlicher Unterschied bei den Energiemengen **nach nur einem Tag!**

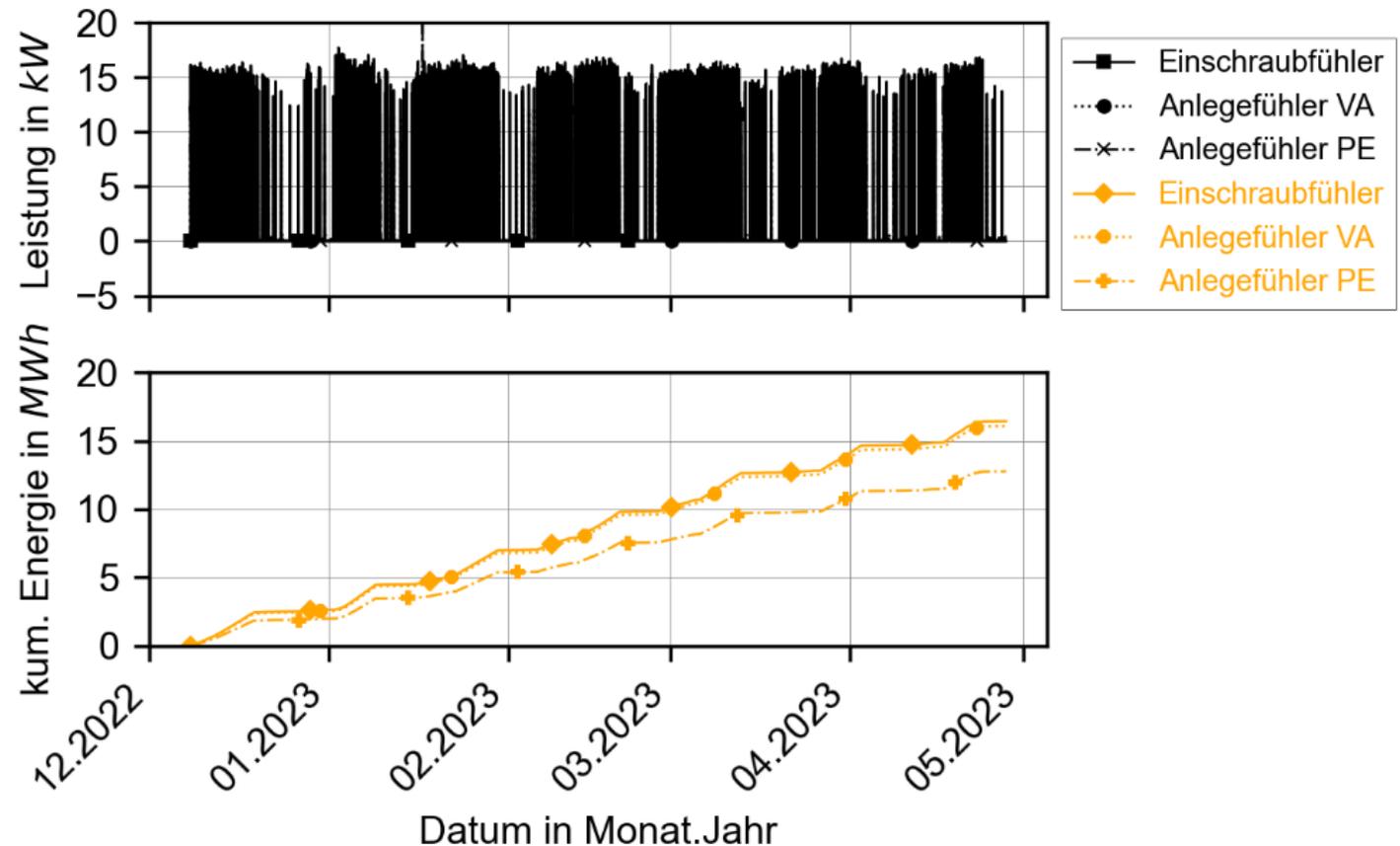
- Einschraubfühler 82,4 kWh
- Anlegefühler VA 79,6 kWh  
→ -3,4%
- Anlegefühler PE 62,4 kWh  
→ -24,3%





Betrachtung der geoth. Entzugsleistungen und kumulierten Energiemengen über die **Heizperiode 2022 / 2023** (12.2022 bis einschließlich 04.2023):

- Einschraubfühler 16,45 MWh
- Anlegefühler VA 16,07 MWh  
→ -2,4%
- Anlegefühler PE 12,76 MWh  
→ -22,5%





## Zusammengefasst:

- Die Qualität einer Temperaturmessung kann stark von der Fühlerplatzierung abhängen
- Eine ungenaue Messung hat direkten und starken Einfluss auf die Leistung, die errechneten Energiemengen und damit auch auf COP / JAZ
- Im gezeigten Beispiel hielt sich der Fehler zwischen Einschraubfühler und Anlegefühler am Edelstahlrohr in Grenzen, allerdings war die Abweichung bei der Messung am PE-Rohr gravierend
- Eine mobile Messbox könnte also ohne Eingriff in das System ausreichend genau mit Anlegefühlern (VA) und Clamb-on-Ultraschallsensor funktionieren
- Weitere Untersuchungen stehen an:
  - Z. B. Messung der Wärmegewinne/-verluste über die Anbindeleitungen zwischen Sonde(n)/Schacht/Heizraum



### TP 1.3:

Kurzzeit-Verfüll-  
Analyse-TRTs und  
weitere EWS-  
messmethoden

3D-Kurzzeit-TRTs  
 $\lambda$ - und  $c_p$ -Messungen  
unterschiedlicher  
Materialien

Entwicklung und Untersuchung eines Analysekonzepts zur  
Bewertung der Verfüllung bei Erdwärmesonden

Tests der Ultraschall-Bohrlochsonde

Tests der thermischen Bohrlochsonde und Vergleich von zwei  
Konzepten

Ergebnisse mit thermischer Bohrlochsonde anhand des ersten  
Konzepts



**Spezifische Wärmekapazität  $c_p$  [kJ kg<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup>]**  
**Volumetrische Wärmekapazität  $\rho c_p$  [MJ m<sup>-3</sup> K<sup>-1</sup>]**

- Maß für die Speicherung von Wärme

**Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$  [W m<sup>-1</sup>K<sup>-1</sup>]**

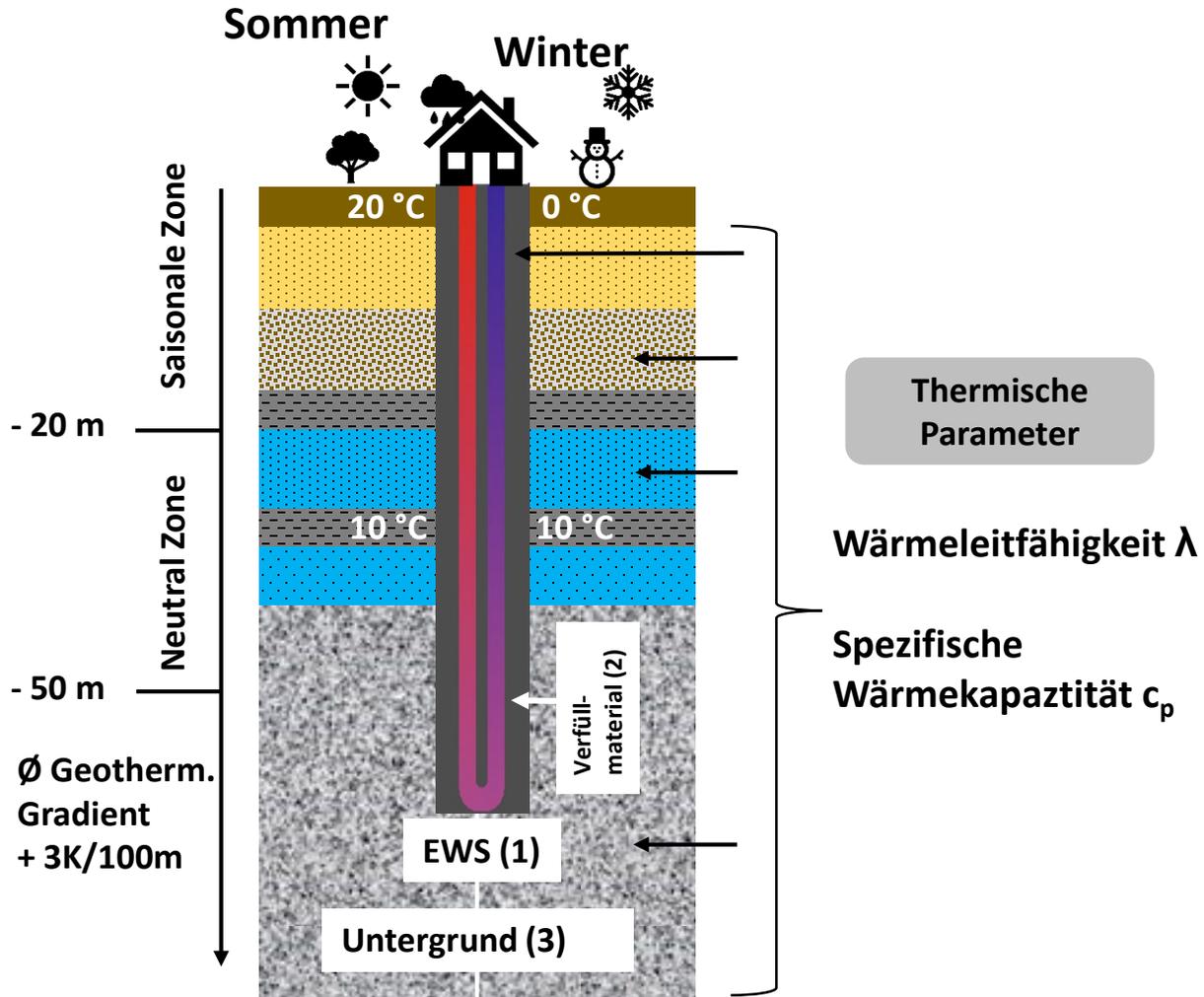
- Maß für die Ausbreitung eines Wärmestroms innerhalb eines Materials

- Bestimmung von thermischen Parametern für:
  - Untergrund (Boden/Gestein)
  - Verfüllbaustoffe
- Ermittlung von Einflussparametern
  - Untergrund (Boden/Gestein)
  - Verfüllbaustoffe

Methodik

Bestimmung im Labor

In-situ: TRT bzw. ETRT



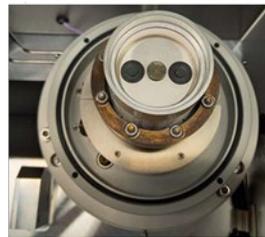


## Spezifische Wärmekapazität $c_p$ [kJ kg<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup>]

### Differenzstrom Kalorimeter



Probenkammer



Probentiegel  
mit Deckel



- DIN EN ISO 11357-4
- Saphir-Vergleichsmethode
- Temperaturabhängige  $c_p$ -Daten (-10 °C bis 40 °C)

## Wärmeleitfähigkeit $\lambda$ [W m<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup>]

### Hot Disk TPS1500



### Isomet 2104



Messsonden



Klimakammer

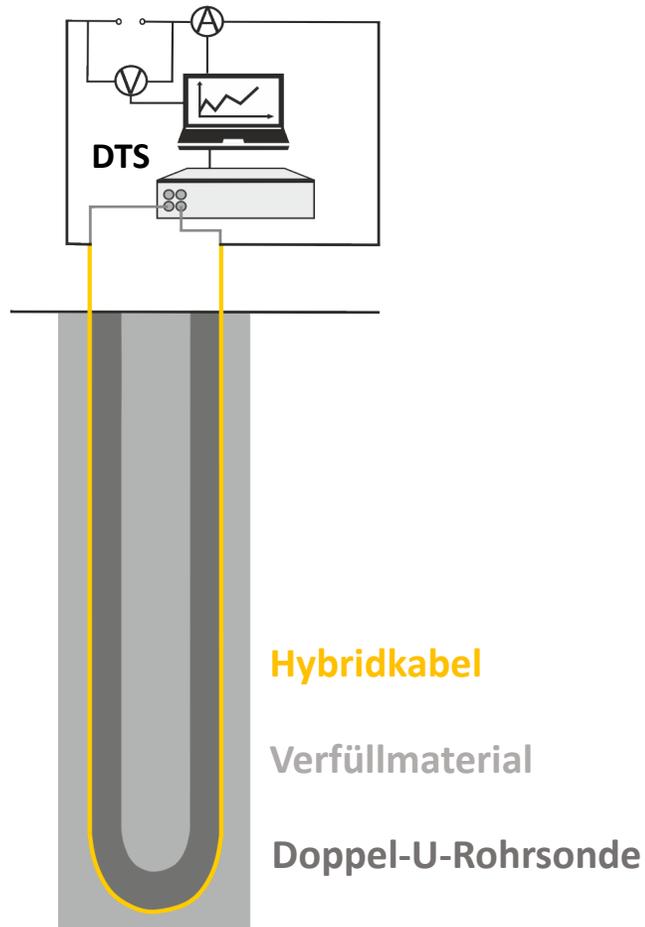


Messsonde

- Temperaturabhängig (5 °C und 20 °C)
- „Transient Plane Source“- Verfahren



## ETRT Aufbau

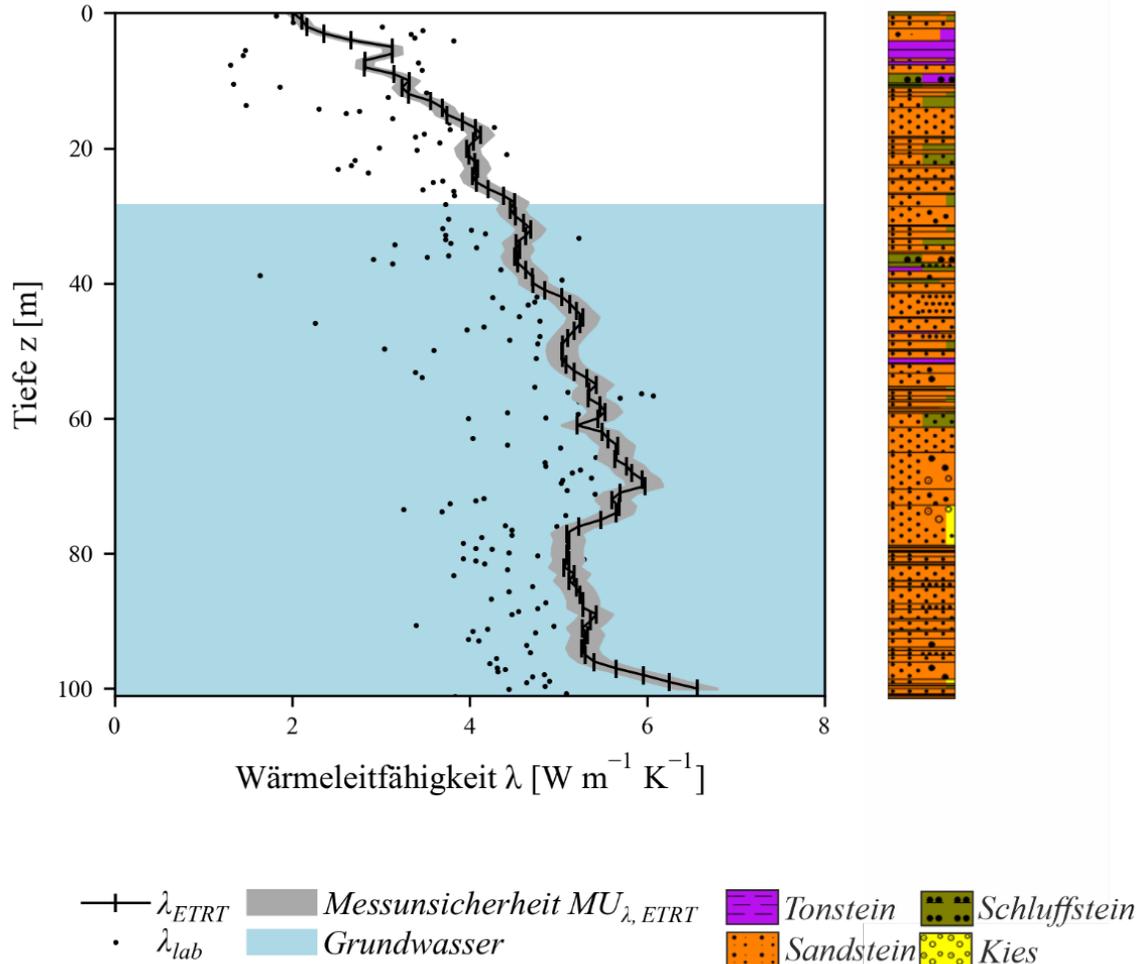


- Bestimmung der effektiven Wärmeleitfähigkeit in-situ
- Mit Glasfaserkabel tiefenorientiert

## Neuweiler, Nordschwarzwald

- Bohrlochtiefe: 103 m, Grundwasser bei ca. 28,5 m
- Bohrlochradius: 0,089 m
- Durchführung ETRT: 19.05.2021 - 27.05.2021
- Heizleistung: 31,2 W/m





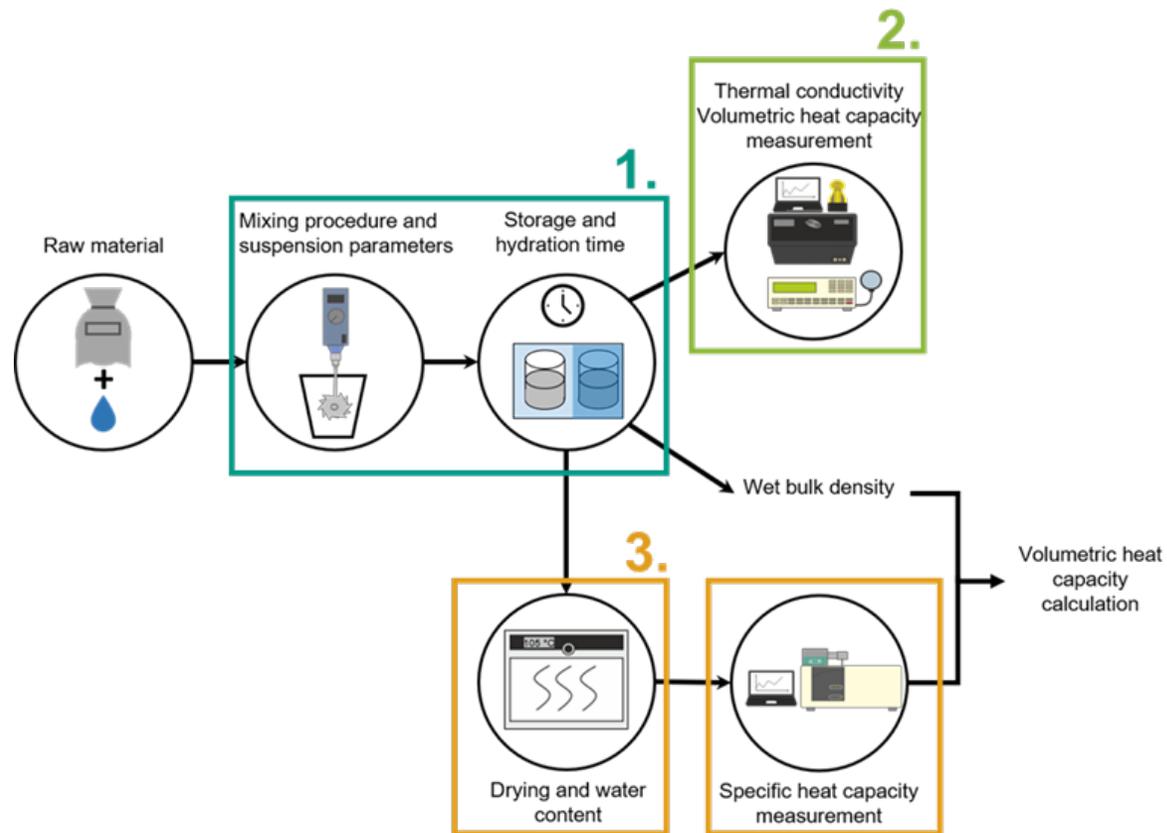
## Wärmeleitfähigkeit [ $W m^{-1} K^{-1}$ ]

- Vergleich mit Laborwerten

	Mittelwerte
ETRT	4,7
Labor, gesättigt	4,6
Labor, trocken	2,5

## Spezifischen Wärmekapazität (Labor)

- Sandstein (trocken)
- $c_p$  (20 °C) : 0,76 - 0,78 [ $kJ Kg^{-1} K^{-1}$ ]
- $c_p$  (-10 bis 40 °C): 0,68 - 0,87 [ $kJ Kg^{-1} K^{-1}$ ]



## Ermittlung der Einflussparameter für $c_p$ und $\lambda$ durch Variation der Versuchsparameter

- Probengeometrie
- Anmischgeschwindigkeit (650 und 2000 U/min)
- Lagerung (luftfeucht/gesättigt)
- Hydratationszeit (7 – 365d)



## Messung thermischer Parameter (temperaturabhängig)

- Spezifische Wärmekapazität
- Wärmeleitfähigkeit
- Kombinierte Messunsicherheit nach GUM (2008)



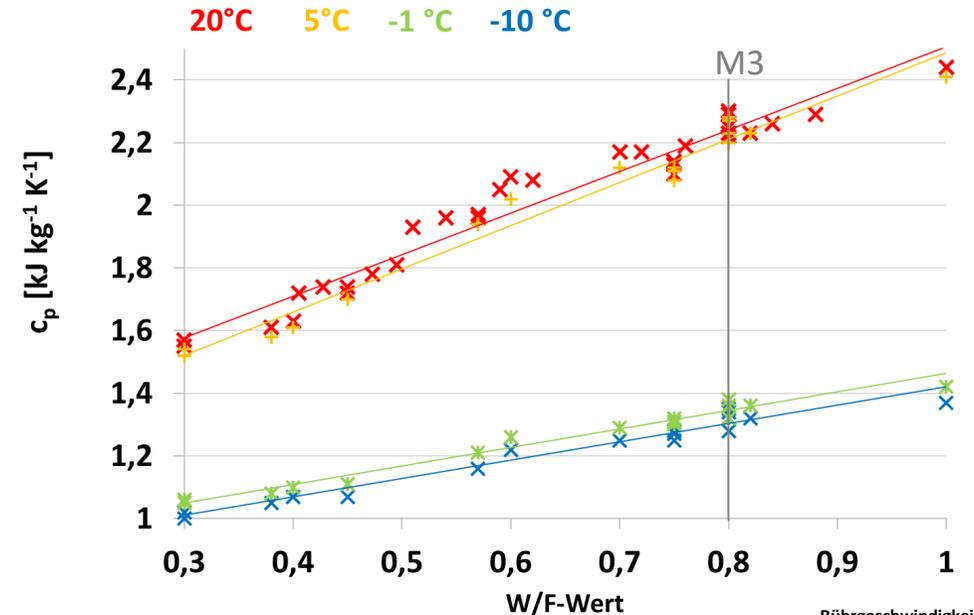
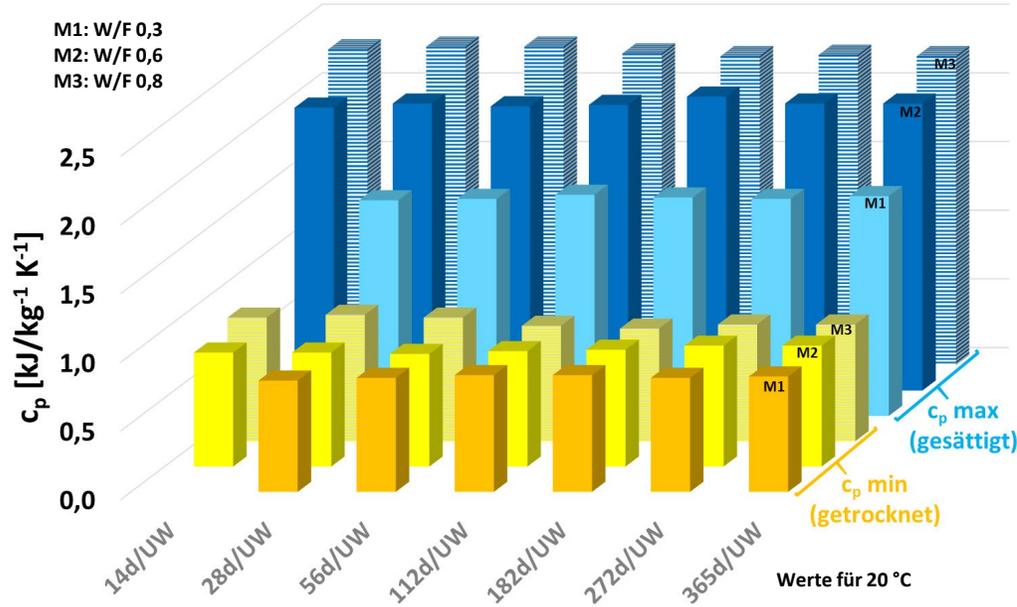
## Standardmethode

- Anmischgeschwindigkeit 2000 U/min
- Lagerung: gesättigt
- Hydratationszeit: 28d



**Vergleichbarkeit von Ergebnissen => Erstellen einer Datenbank**

# Labor – Ergebnisbeispiel (Spezifische Wärmekapazität $c_p$ von Verfüllbaustoffen)



Rührgeschwindigkeit: 2000 U/min  
 Lagerung: gesättigt  
 Hydratationszeit: 28d  
 Gesättigte Proben

## Geringer Einfluss:

- Hydratationszeit (> 14d)
- Lagerung (Sättigung ≈ 100%)

## Einfluss auf $c_p$ -Wert:

- Chemische Zusammensetzung
- W/F-Wert (Wassergehalt)

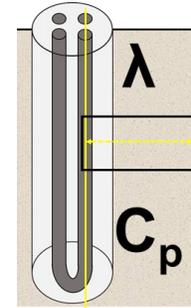
## Einfluss auf $c_p$ -Wert:

- Temperatur
- W/F-Wert (Wassergehalt)

$c_p$  Wasser (20 °C): 4,18 [kJ kg<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup>]  
 $c_p$  Eis (-1 °C): 2,10 [kJ kg<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup>]



## Thermische Parameter für das System Erdwärmesonde / Untergrund



- **Erstellen einer Datenbank für am deutschen Markt erhältliche Verfüllbaustoffe**
  - Vergleichbarkeit der Daten durch Festlegung einer „Standardmethode“
  - Generierung von temperaturabhängigen Daten
- **Bestimmung der thermischen Parameter von regionalen Gesteinen (vorwiegend Baden-Württemberg)**
  - Genaue Angaben zur Herkunft
  - Temperaturabhängig



# Vielen Dank für die Aufmerksamkeit!

Gefördert durch:



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



## 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

Institut für Angewandte Geowissenschaften (AGW)

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



Qualitätssteigerung  
oberflächennaher Geothermiesysteme

[www.qewsplus.de](http://www.qewsplus.de)

Fabian Neth  
Hochschule Biberach  
Institut für Gebäude- und Energiesysteme  
Karlstraße 11  
88400 Biberach an der Riß  
Tel.: +49 7351 582 245  
neth@hochschule-bc.de

Workshopreihe:

Nachhaltige Wärmeversorgung mittels Wärmepumpe:

Anwendung – Qualitätssicherung – Quartiersversorgung



Qualitätssteigerung  
oberflächennaher Geothermiesysteme

Teilprojekt 3:

Qualitätsanforderungen an  
Erdwärmesonden-Verfüllbaustoffe

Yannick Reduth

**HBC.**  
HOCHSCHULE  
BIBERACH  
UNIVERSITY  
OF APPLIED SCIENCES

**BURKHARDT**  
Geologische und  
hydrologische  
Bohrungen

**eifer**

**HAURI**

**H.S.W.** Ingenieurbüro  
Gesellschaft für Energie und Umwelt mbH

**KIT**  
Karlsruher Institut für Technologie

**solites**

Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Klimaschutz

**Fraunhofer**  
ISE

In Zusammenarbeit mit:



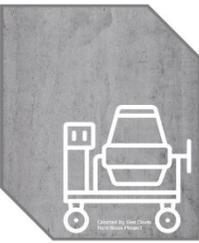
ZAE BAYERN

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

Diese Unterlagen sind ausschließlich für den persönlichen Gebrauch durch die Teilnehmerinnen und Teilnehmer des Workshops „Nachhaltige Wärmeversorgung mittels Wärmepumpe: Anwendung – Qualitätssicherung – Quartiersversorgung“ vom 10.05.2023 bestimmt.

In diesen Unterlagen ist z. T. geistiges Eigentum Dritter in zitierender Weise wiedergegeben, weshalb eine unrechtmäßige Weiterverbreitung dieser Unterlagen neben ideellen auch finanzielle Schäden nach sich ziehen kann, für die der Verursacher haftbar gemacht wird.

Eine Weitergabe an außenstehende Dritte in irgendeiner Form ist deshalb grundsätzlich nicht gestattet. Für die Teile dieses Dokuments, an denen die Verfasser selbst die Urheberrechte halten, werden auf Anfrage gerne weitergehende Nutzungsrechte (für Zwecke der Lehre und Forschung kostenlos) gewährt.



## Teilprojekt 3 Qualitätsanforderungen an Erdwärmesonden-Verfüllbaustoffe

### TP 3.1:

Filtrations-  
verhalten  
von EWS-  
Verfüll-  
baustoffen

### TP 3.2:

Ermittlung der  
hydraulischen  
Durchlässig-  
keit von  
Systemproben

### TP 3.3:

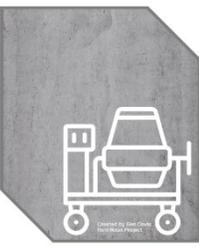
Realitätsnahe  
Kombination  
von Unter-  
suchungs-  
aspekten von  
Filtrations-  
effekten

### TP 3.4:

Analyse der  
Verfüll-  
qualität von  
EWS in  
einem realen  
Untergrund

### TP 3.5:

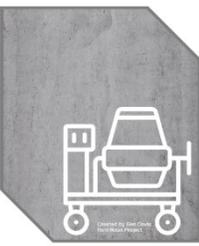
Neues  
Verfüllmess-  
konzept für  
EWS



## TP 3.1:

Filtrations-  
verhalten  
von EWS-  
Verfüll-  
baustoffen

- Weiterentwicklung des Filtrationsversuchstand (QEWSII)
- Automatisierte Nachbildung eines Verfüllvorgangs einer realen EWS
- Betrachtung der Druckverhältnisse in realen Bohrlöchern
- Betrachtung des Übergangsbereichs zwischen zwei Formationen mit gespanntem Grundwasserleiter
- ANSYS-Simulation zur Nachbildung des Verfüllvorgangs



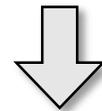
## Messung des Druckverlaufs in der Verfüllung realer EWS-Bohrungen

- Sandstein
- Tonstein
- Granit

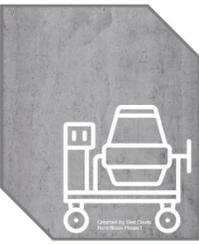
## Nachbildung eines Bohrlochs im Versuchsstand

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

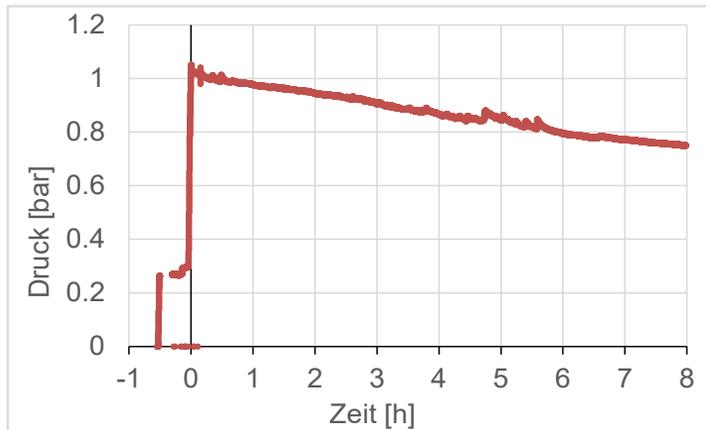
**Vergleich und Erklärung der gemessenen Druckkurven**



**Rückschluss auf die Vorgänge im Untergrund**

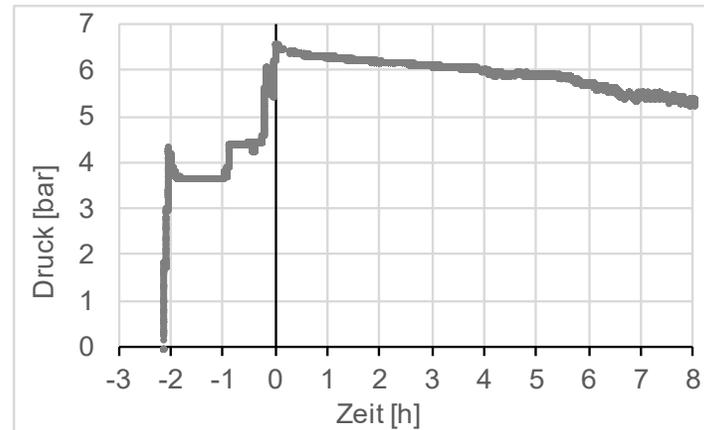


## Verfüllung im PVC-Rohr



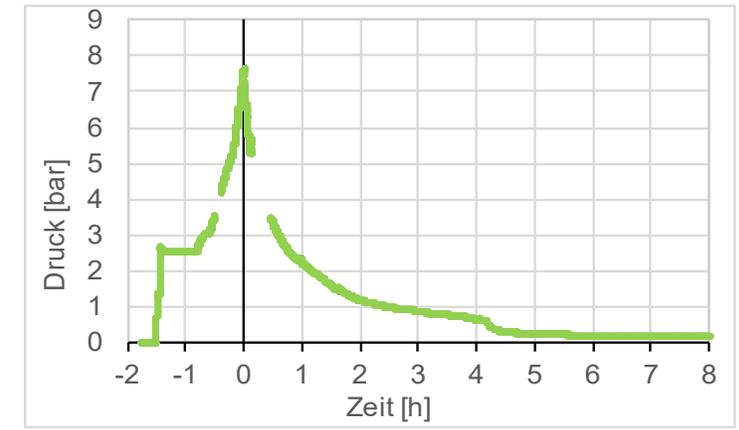
Sensortiefe: 5,50 m uGOK  
 Suspensionsdichte: 1,94 g/cm<sup>3</sup>

## im Tonstein / Mergel



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

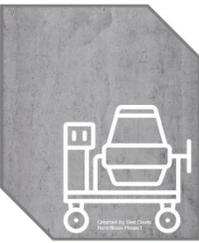
## im Sandstein



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

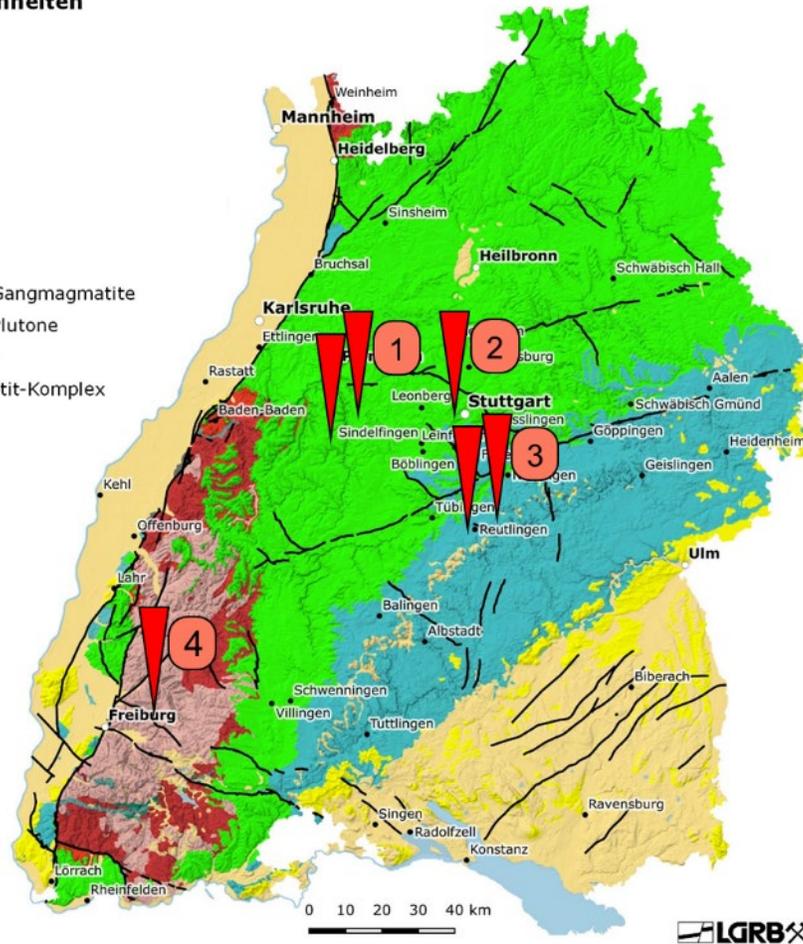
Relativdruckmessungen: 0 bar bedeutet Atmosphärendruck





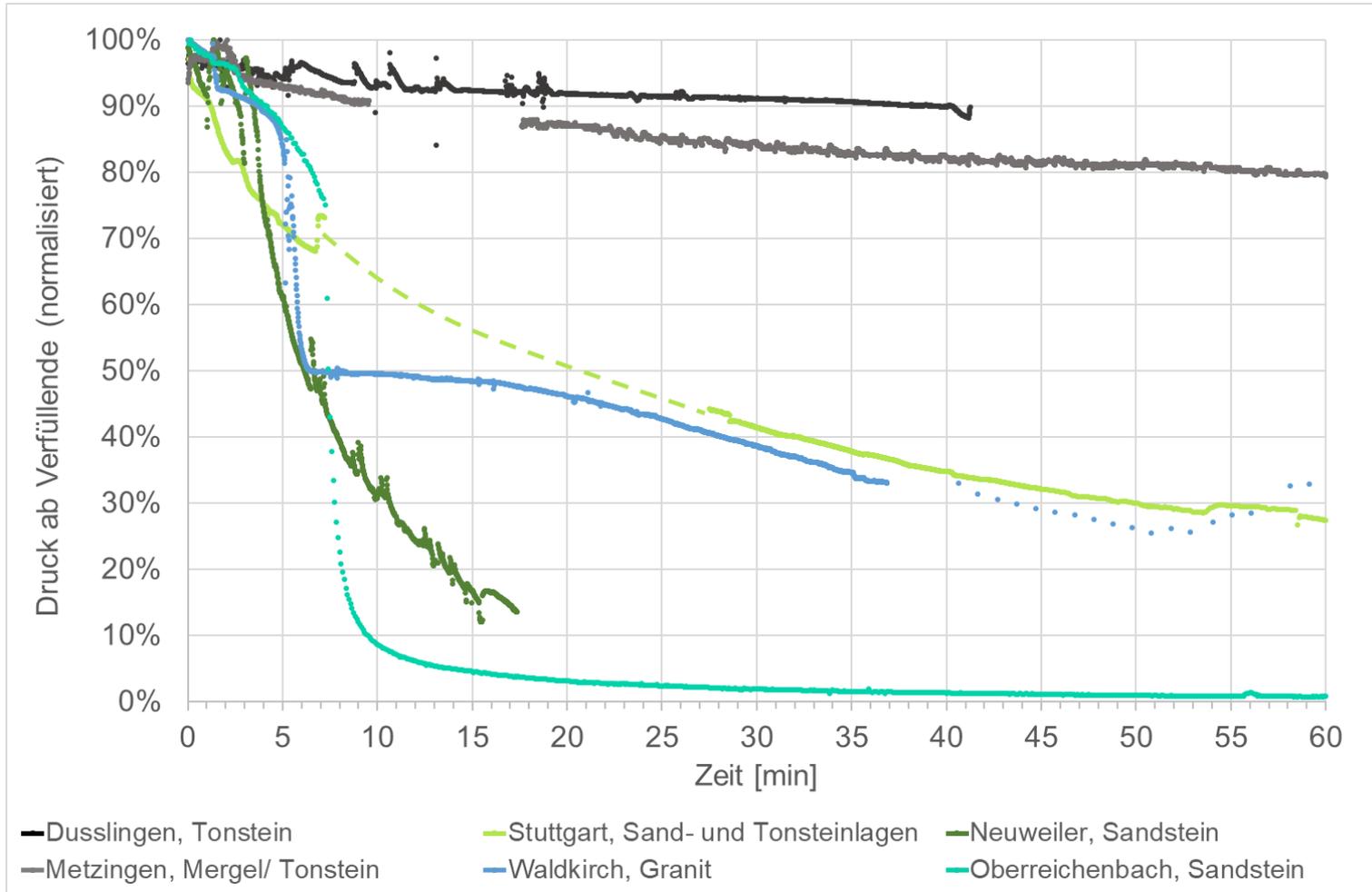
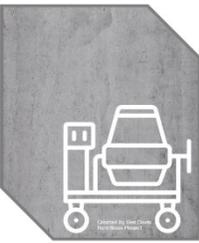
**Geologische Einheiten**

- Quartär
- Tertiär
- Mesozoikum
- Jura
- Trias
- Perm
- Karbon
- Devon
- Variskische Gangmagmatite
- Variskische Plutone
- Alte Schiefer
- Gneis-Migmatit-Komplex



Druckmessungen in unterschiedlichen Geologien:

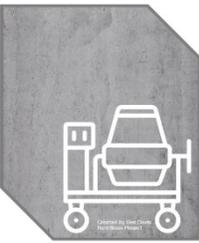
1. Sandstein
2. Wechsellagen Tonstein und Sandstein
3. Mergel und Tonstein
4. Granit



wenig bis kaum wasser-  
durchlässige Formation

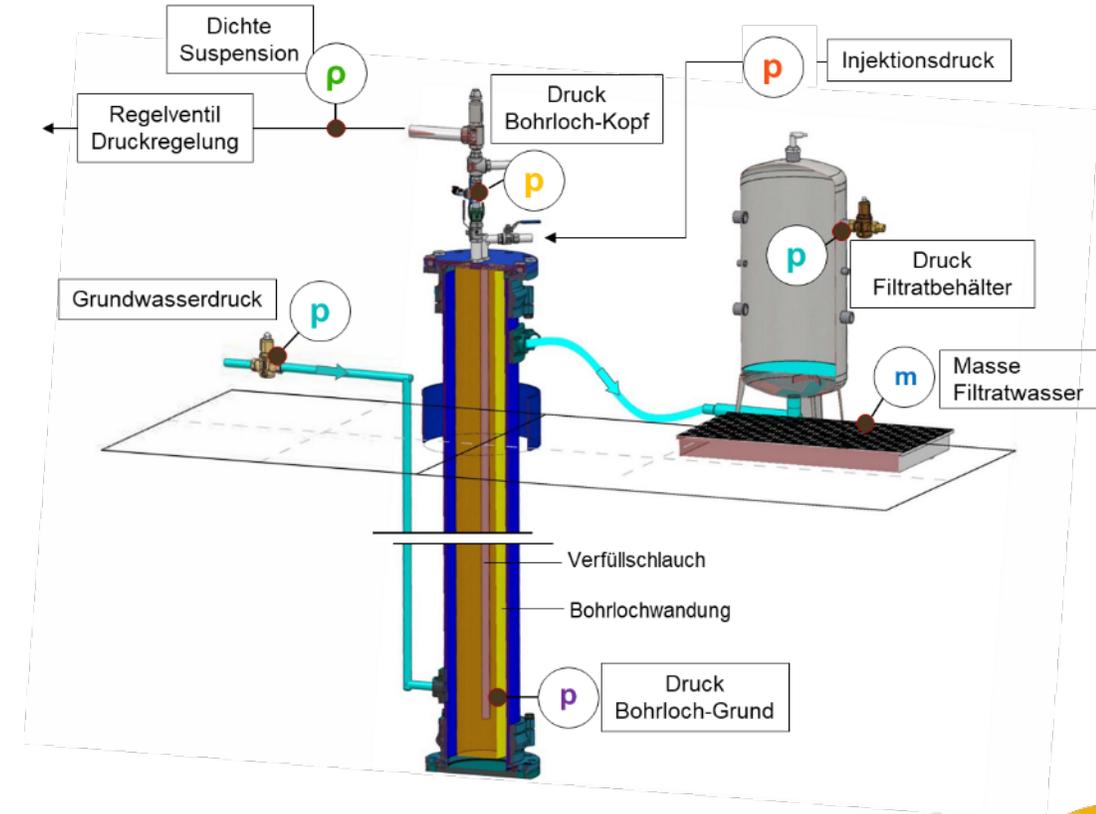
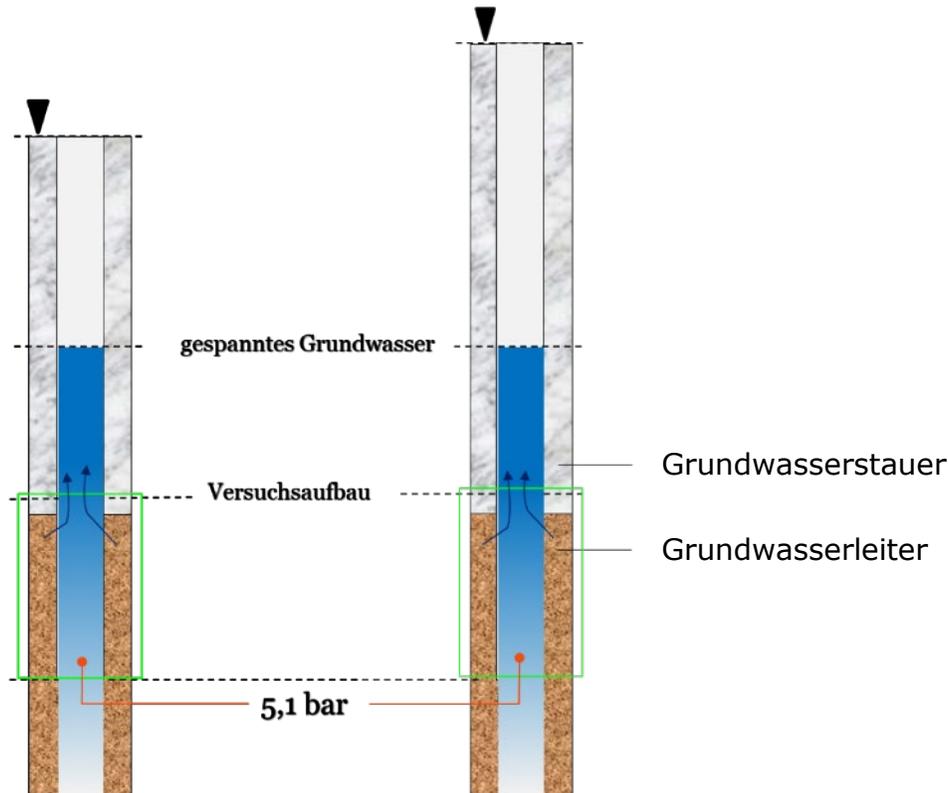
wasserdurchlässige  
Formation

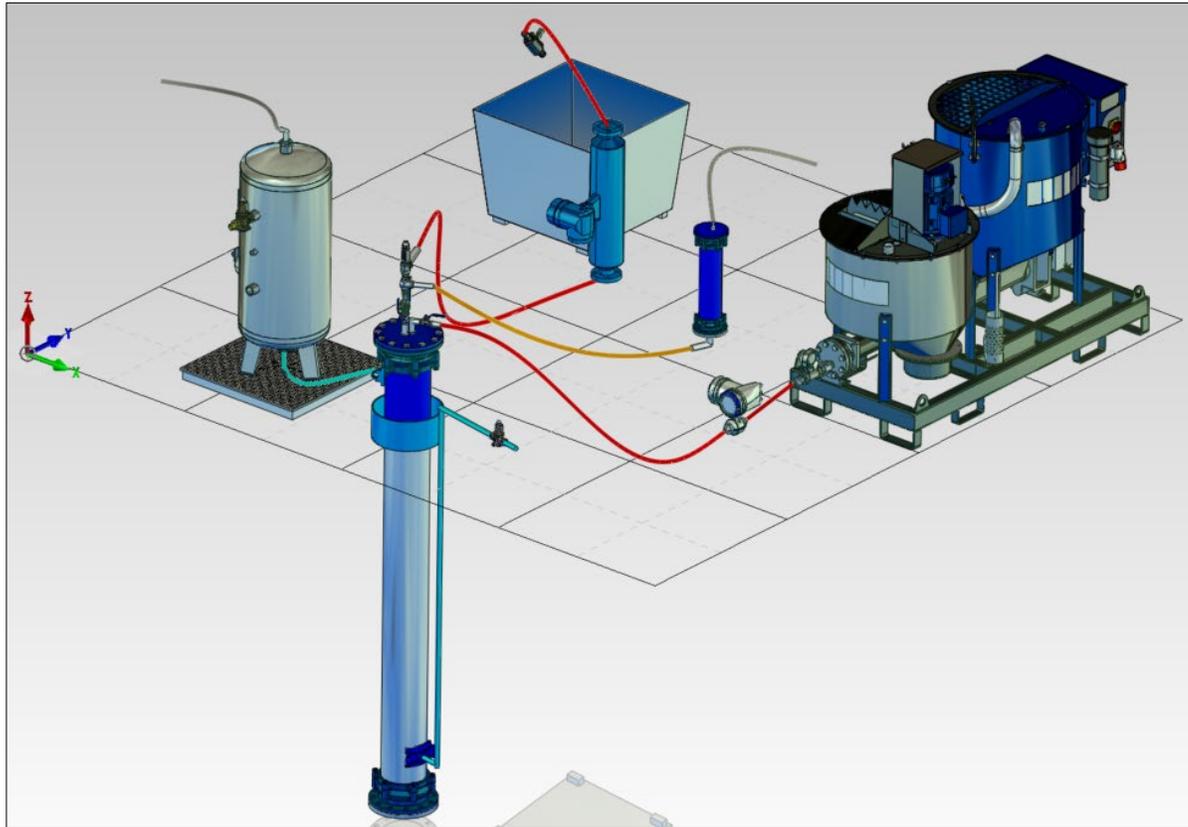
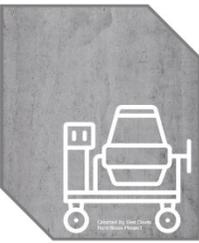
# Filtrationsstand Nachbildung eines tiefen Bohrlochabschnitts



Dichte = 1,94 g/cm<sup>3</sup>  
 => Tiefe Drucksensor 26,8 m

Dichte = 1,52 g/cm<sup>3</sup>  
 => Tiefe Drucksensor 34,2 m

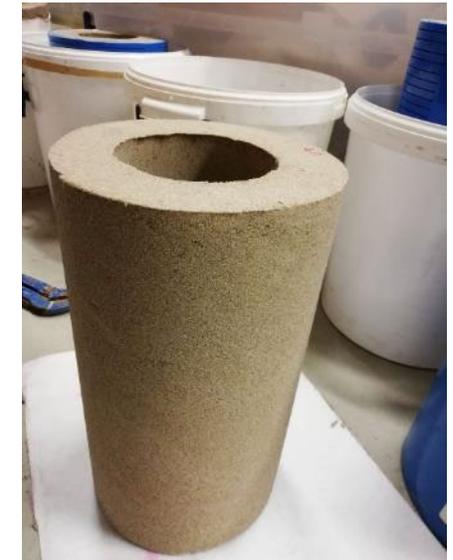




Versuchsstand

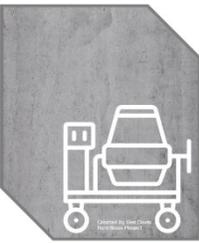


Filtrationsversuch

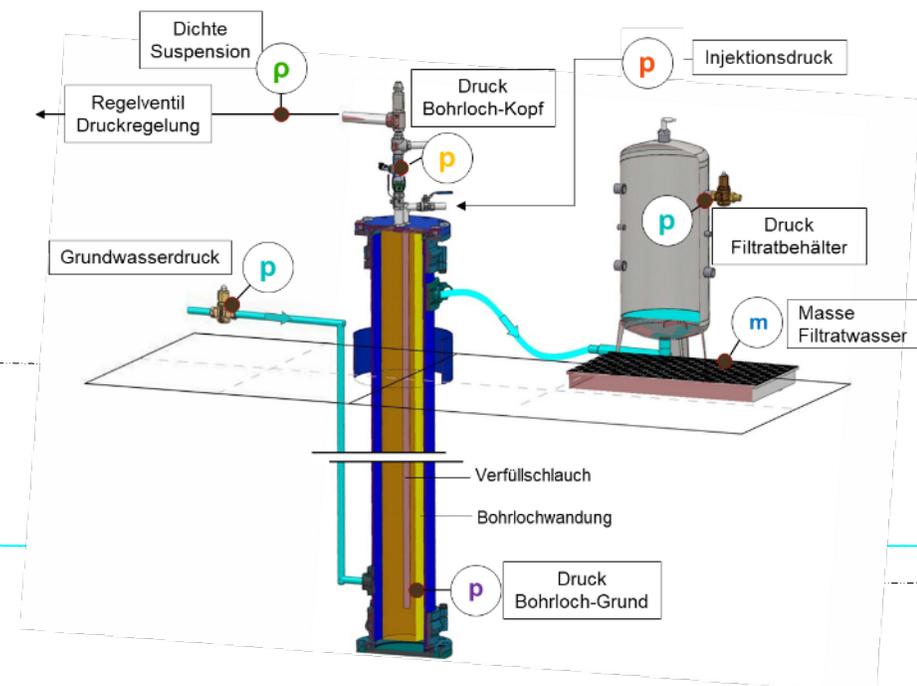
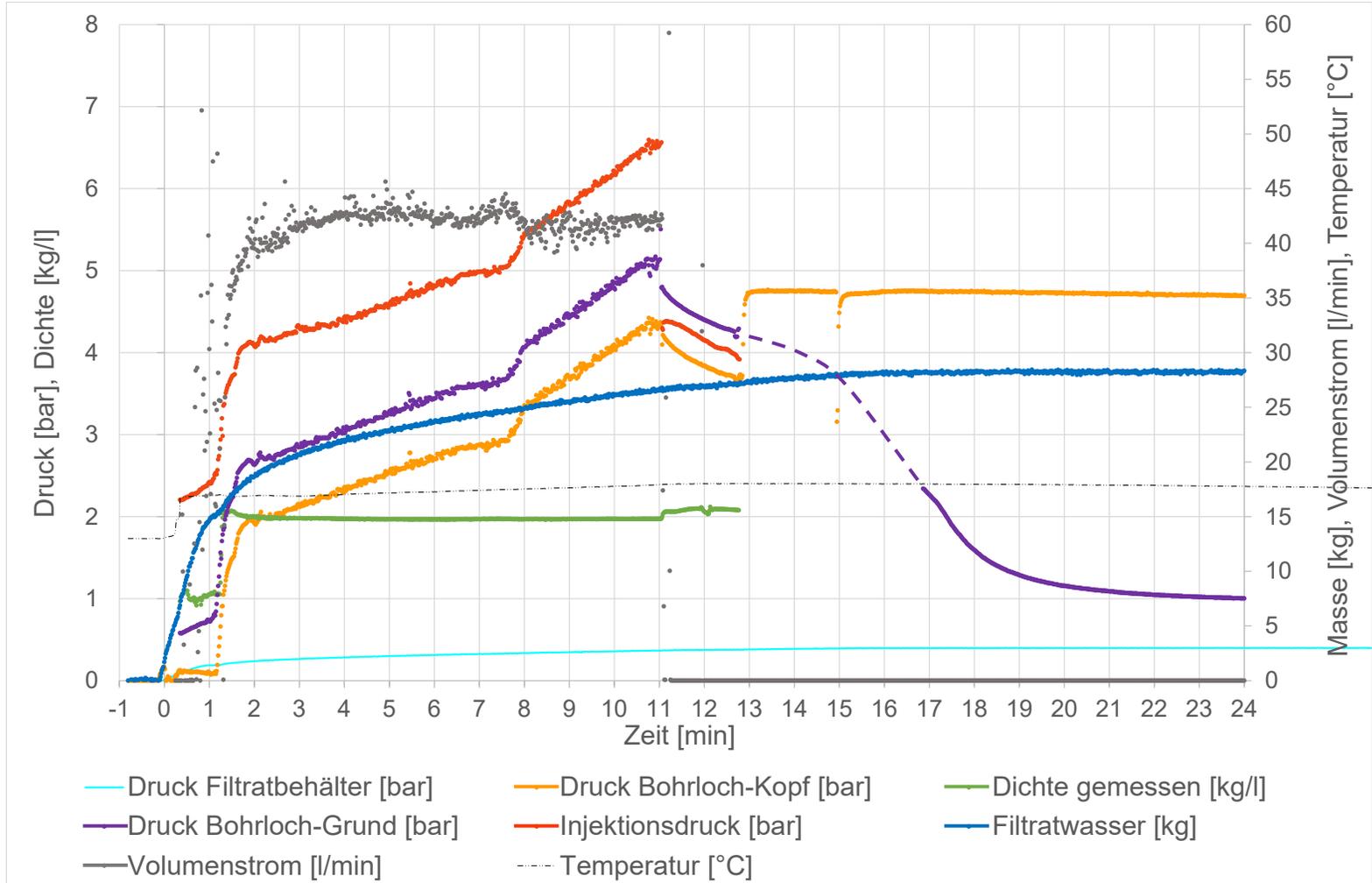


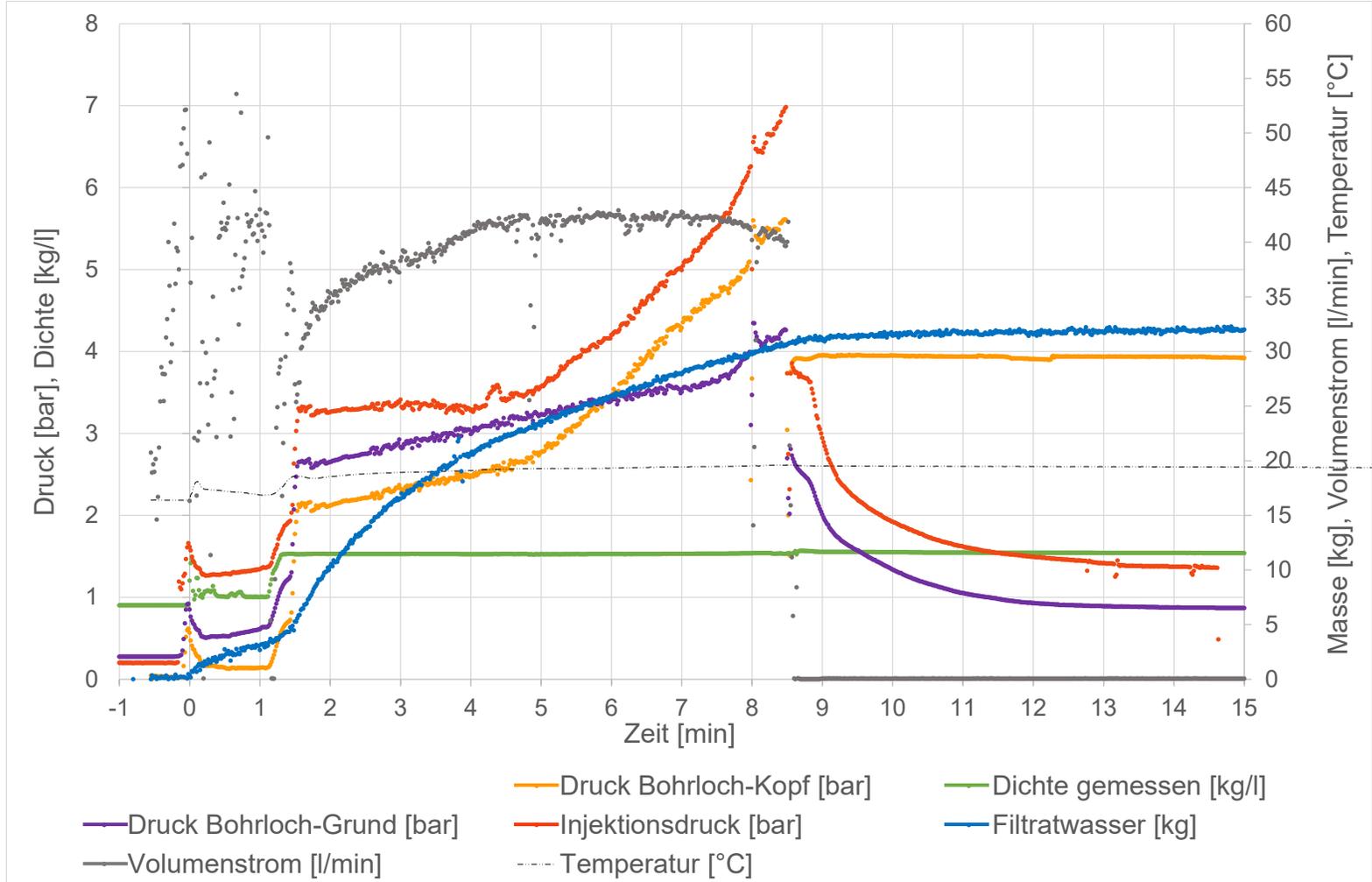
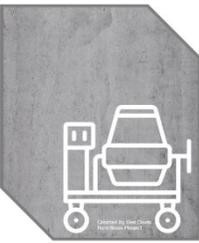
$$k_{f10} = 3,61 \pm 0,05 * 10^{-5} \text{ m/s}$$

Wasserdurchlässige  
 künstliche Formation

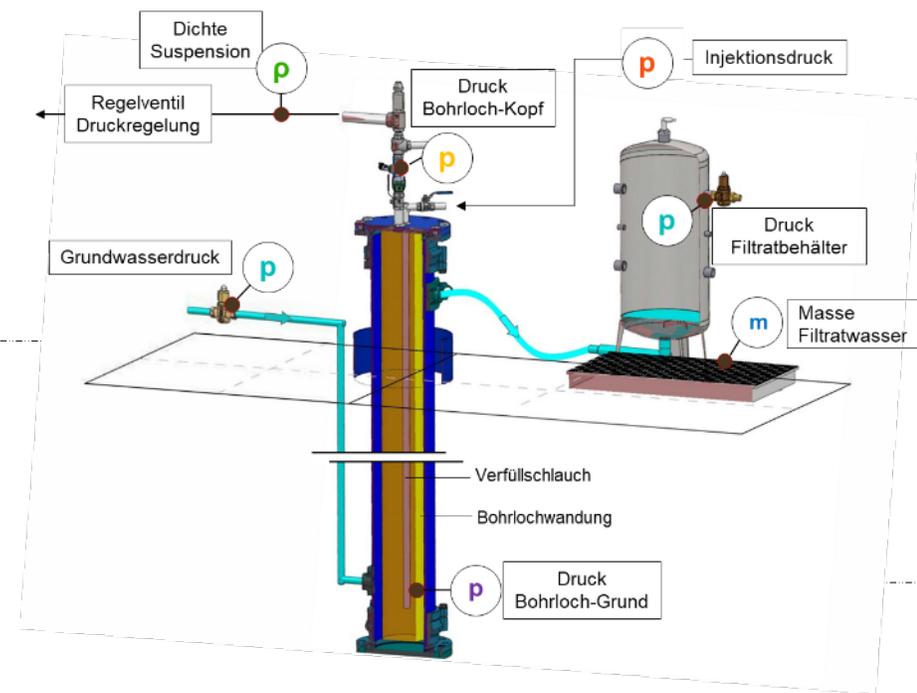


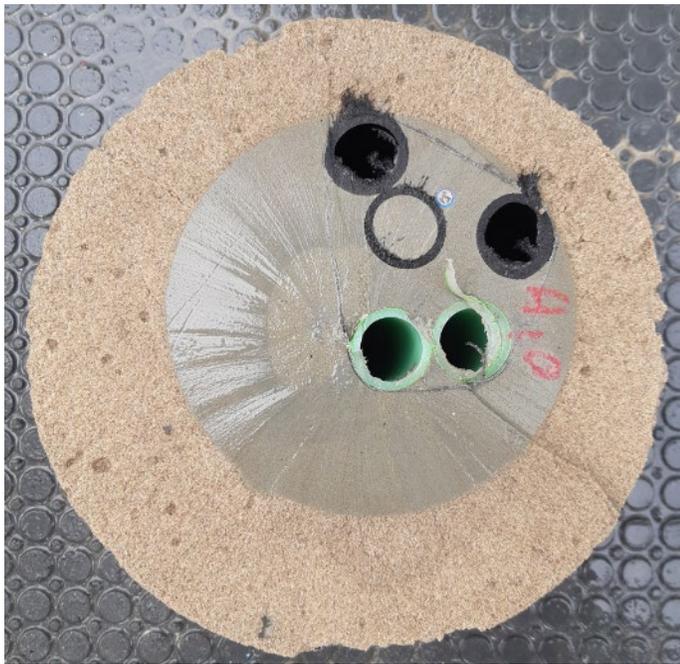
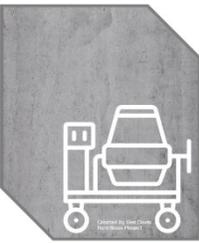
Beispiel Messdaten Baustoff mit  
 Wasser/Feststoff-Verhältnis: **0,3**





Beispiel Messdaten Baustoff mit Wasser/Feststoff-Verhältnis: **0,8**

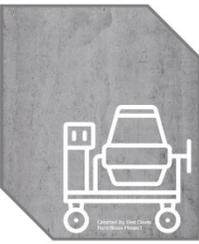




Horizontalschnitt durch EWS mit umliegender künstlicher Sandformation



Abschnittsweise zerstörungsfreie Freilegung der Verfüllsäule



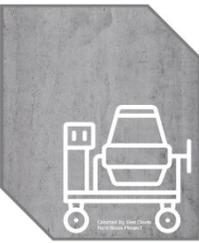
Sehr gute Verfüllqualität bei anliegendem Sondenrohr



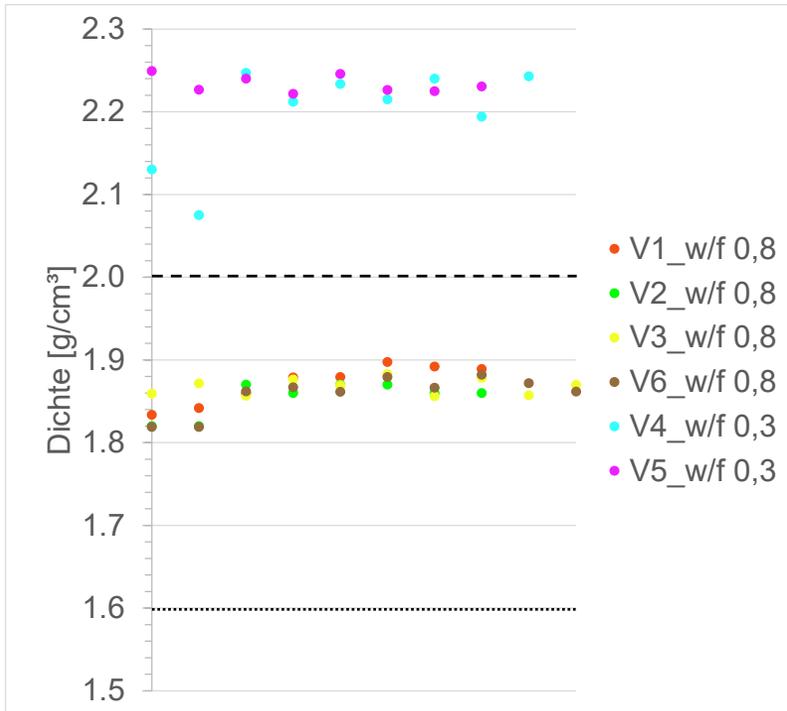
Filterkuchen und Strömungskanal des Verfüllbaustoffs mit W/F 0,3



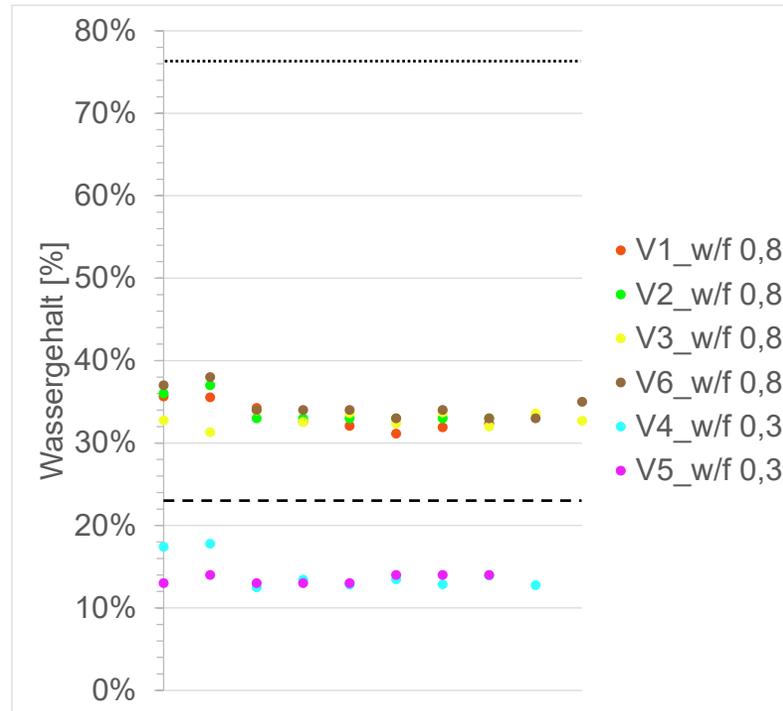
Filterkuchen und Strömungskanal des Verfüllbaustoffs mit W/F 0,8



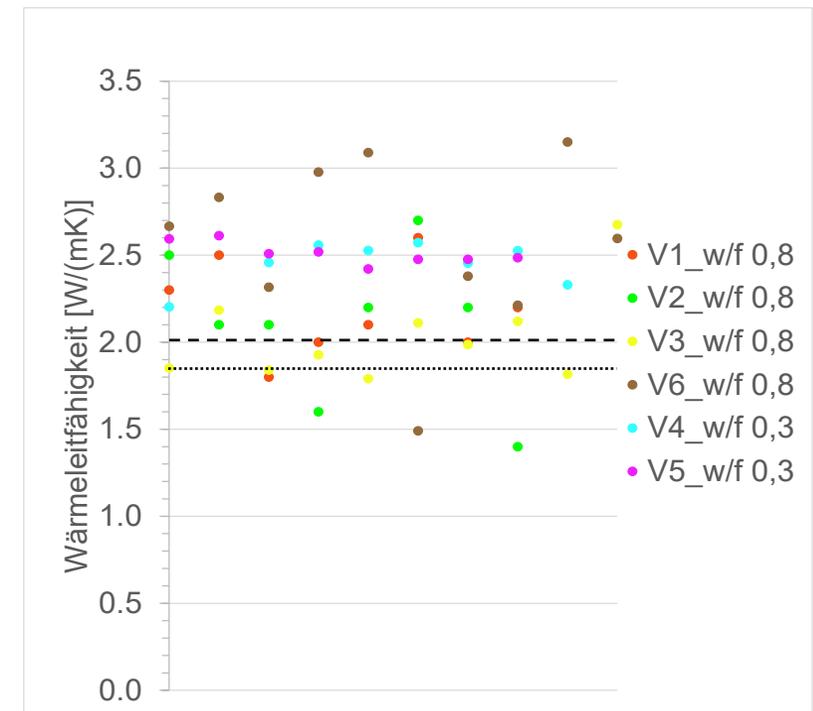
## Dichte



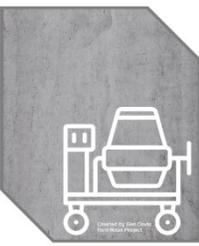
## Wassergehalt



## Wärmeleitfähigkeit



Referenzproben nicht filtriert  
 ..... W/F 0,8  
 - - - W/F 0,3



Beobachtete Auswirkungen der Filtration auf den Verfüllbaustoff:

- Trennung der Verfüllsäule in Strömungskanal und Filterkuchenbereich
- Deutlich erhöhte Dichte gegenüber des Baustoffs vor der Verfüllung
- Erhöhte Wärmeleitfähigkeit
- Ausbleiben von Fehlstellen und gravitativ getriebener Entmischung

Weiterführende Untersuchungen:

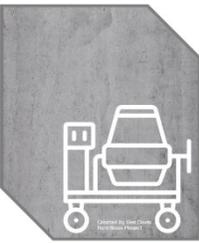
- Systemdurchlässigkeitsmessungen filtrierter Proben durch das ZAE Bayern in TP 3.3
- Übertragung auf reale Erdwärmesonden und Vergleich mit Filtrationsversuchen in TP 3.4



## TP 3.4:

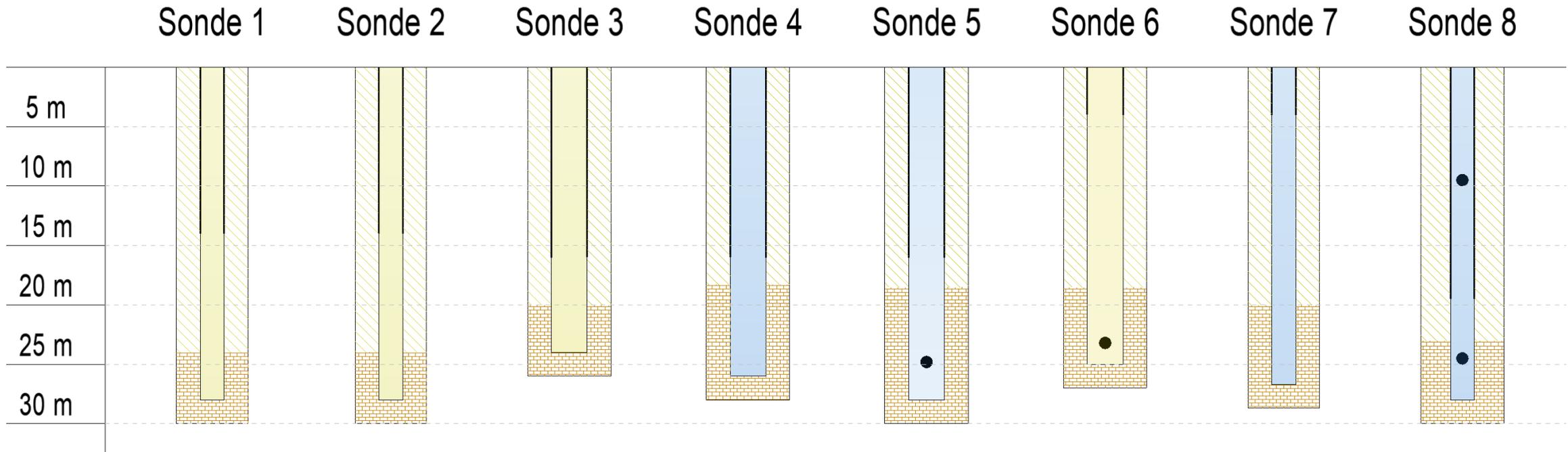
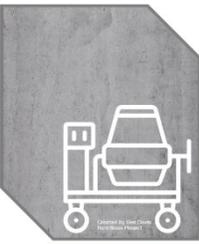
Analyse der  
Verfüll-  
qualität von  
EWS in  
einem realen  
Untergrund

- Erstellung von acht Erdwärmesonden im Steinbruch
- Charakterisierung der Geologie und Bohrlochgeometrie
- Möglichst vollständige Freilegung und Analyse der Sonden
- Vergleich und Erweiterung der Erkenntnisse aus den Laboruntersuchungen auf reale Erdwärmesonden

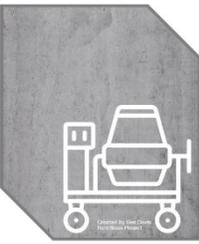


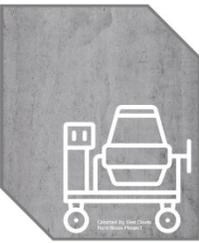
Geophysikalische  
Bohrlochvermessung

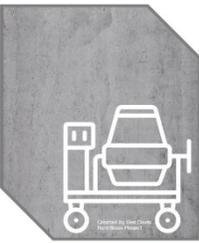
Bohrarbeiten im Steinbruch 06/2021 & 06/2022  
EWS in ca. 20 m mächtiger Lössbedeckung, darunter Kalkstein

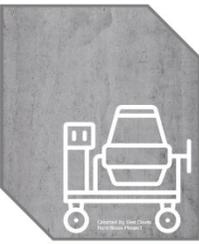


Löss		Baustoff A		6 x 32er DU-Rohrsonden	BL-Durchmesser 150/132 mm
Kalkstein		Baustoff B		2 x Wellrohrsonden	BL-Durchmesser 219/190 mm



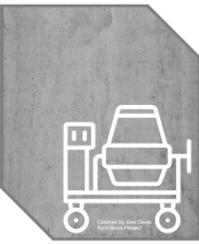






## Optische Analyse und Laboranalyse Analog zu den Filtrationsversuchen





Optische Analyse und Laboranalyse Analog zu den Filtrationsversuchen

Sonde 1

Sonde 2

Sonde 3

Sonde 4

Sonde 5

Sonde 6

Sonde 7

Sonde 8



# Vielen Dank für die Aufmerksamkeit

Gefördert durch:



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



## 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

Institut für Angewandte Geowissenschaften (AGW)

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



Qualitätssteigerung  
oberflächennaher Geothermiesysteme

[www.qewsplus.de](http://www.qewsplus.de)

Yannick Reduth  
Solites – Steinbeis Forschungsinstitut  
Meitnerstr. 8  
70563 Stuttgart  
0711 673 2000 70  
reduth@solites.de  
<https://www.solites.de/>

Workshopreihe:

Nachhaltige Wärmeversorgung mittels Wärmepumpe:

Anwendung – Qualitätssicherung – Quartiersversorgung



Qualitätssteigerung  
oberflächennaher Geothermiesysteme

TP 3.2: Ermittlung der hydraulischen Durchlässigkeit  
von Systemproben

TP3.3: Realitätsnahe Kombination von  
Untersuchungsaspekten von Filtrationseffekten

Micha Pinnekamp, Lukas Pendzich, Jens Kuckelkorn, Yannick Reduth,  
Hagen Steger, Anna Albers, Petra Huttenloch, Roman Zorn

**HBC.**  
HOCHSCHULE  
BIBERACH  
UNIVERSITY  
OF APPLIED SCIENCES

**BURKHARDT**  
Geologische und  
hydrologische  
Bohrungen

**eifer**

**HAURI**

**H.S.W.**  
Ingenieurbüro  
Gesellschaft für Energie und Umwelt mbH

**KIT**  
Karlsruher Institut für Technologie

**solites**

Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Klimaschutz

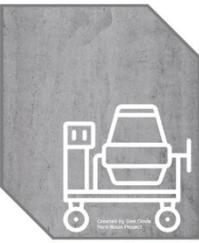
**Fraunhofer**  
ISE

In Zusammenarbeit mit:



ZAE BAYERN

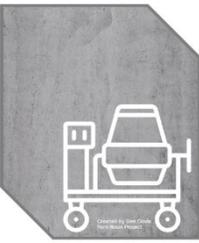
aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages



Diese Unterlagen sind ausschließlich für den persönlichen Gebrauch durch die Teilnehmerinnen und Teilnehmer des Workshops „Nachhaltige Wärmeversorgung mittels Wärmepumpe: Anwendung – Qualitätssicherung – Quartiersversorgung“ vom 10.05.2023 bestimmt.

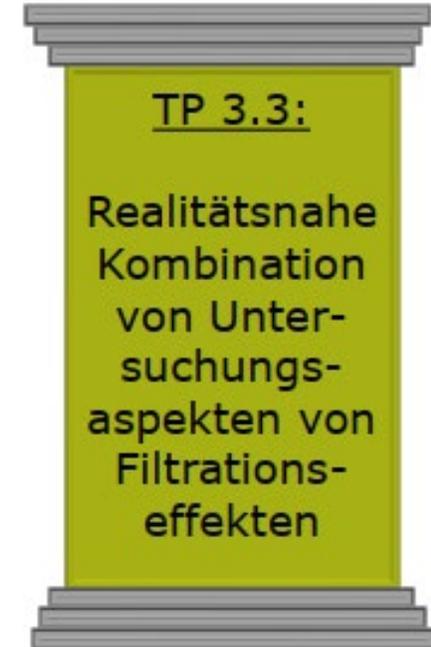
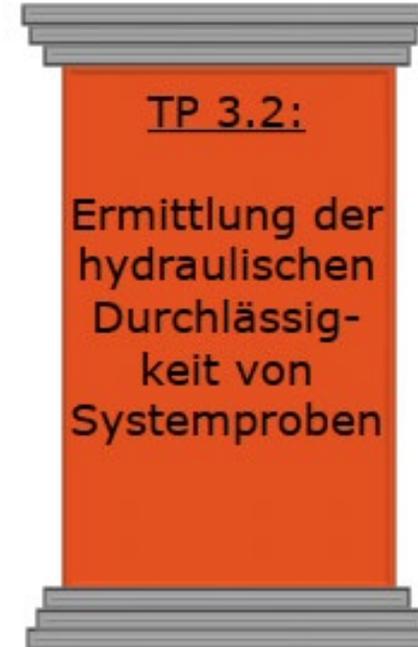
In diesen Unterlagen ist z. T. geistiges Eigentum Dritter in zitierender Weise wiedergegeben, weshalb eine unrechtmäßige Weiterverbreitung dieser Unterlagen neben ideellen auch finanzielle Schäden nach sich ziehen kann, für die der Verursacher haftbar gemacht wird.

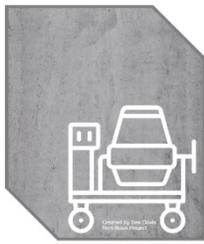
Eine Weitergabe an außenstehende Dritte in irgendeiner Form ist deshalb grundsätzlich nicht gestattet. Für die Teile dieses Dokuments, an denen die Verfasser selbst die Urheberrechte halten, werden auf Anfrage gerne weitergehende Nutzungsrechte (für Zwecke der Lehre und Forschung kostenlos) gewährt.



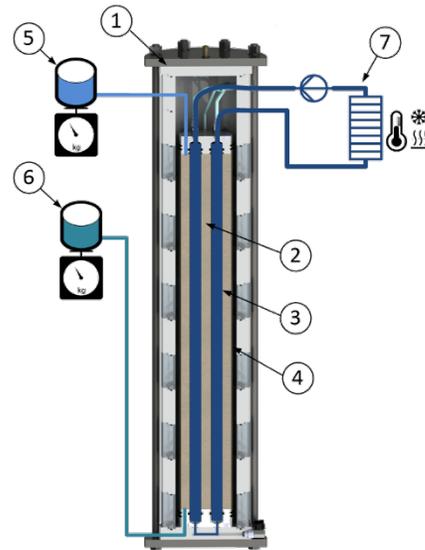
## Inhalt TP3.2 & TP3.3

- Aufbau weiterer Systemtriaxialzelle & Integration in bestehenden Versuchsstand (TP3.2)
- Aufbau eines weiteren Teststands mit zwei Systemtriaxialzellen (TP3.3)
- Durchführung und Auswertung der Messungen an drei Ringversuchen mit je vier Systemproben
  - 1. Ringversuch abgeschlossen: Auswertung
  - 2. Ringversuch läuft
  - 3. Ringversuch in Planung





Systemprobe (1 m) mit vier Sondenrohren und zentralem Hinterfüllschlauch

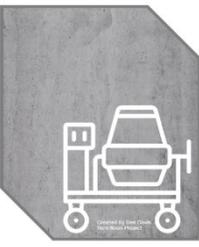


Schema der Systemtriaxialzelle:

- 1 – Druckbehälter
- 2 – Hinterfüllbaustoff
- 3 – Sondenrohre (2-U)
- 4 – Latexmembran
- 5 – Messwasser Auslass
- 6 – Messwasser Einlass
- 7 – Temperierkreis

- Basierend auf dem Konzept der Triaxialzelle nach DIN 180130-1
- Variable Probenlänge und Querschnittsgeometrie
- Doppel-U-Sonde
- Systemtrennung zwischen Porenwasser und Regelluft
- Kontinuierliches Wiegen des durchfließenden Porenwassers
- Maximal 13 bar Porenwasserdruck
- Temperier- und Frost-Tau-Wechsel (FTW) über Temperierkreis





Herstellung filtrierter Bohrlochabschnitte zur Bestimmung der Systemdurchlässigkeit



Aufbau der Filtrationszelle

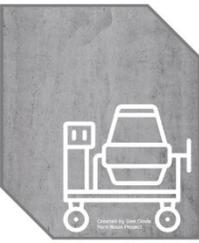


Herstellung der filtrierten Systemprobe



Filtrierte Systemprobe (links)  
und Referenzprobe (rechts)

# 1. Ringversuch: Einbau Referenzprobe und und filtrierte Systemprobe



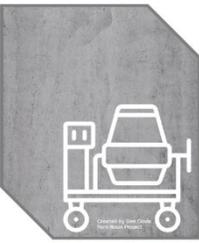
Unfiltrierte Referenzprobe



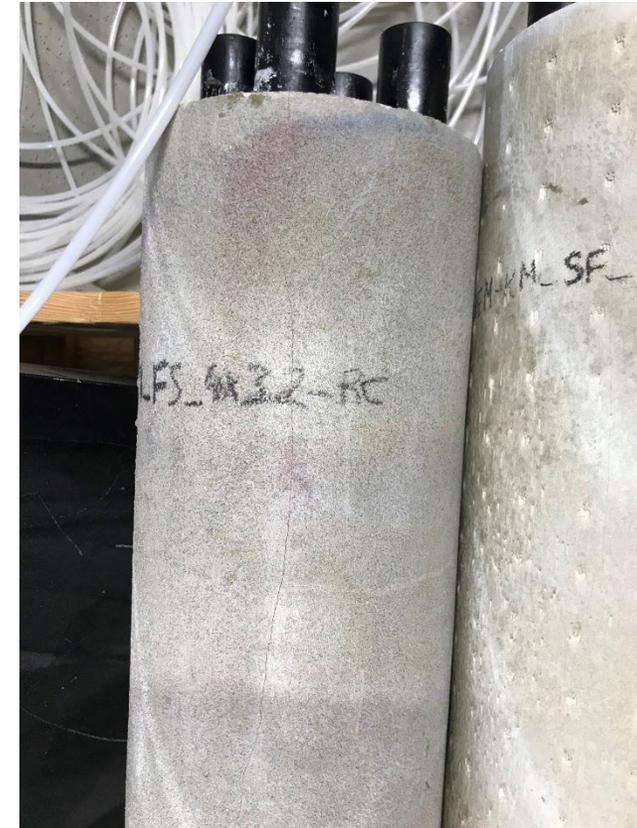
Filtrierte Systemprobe



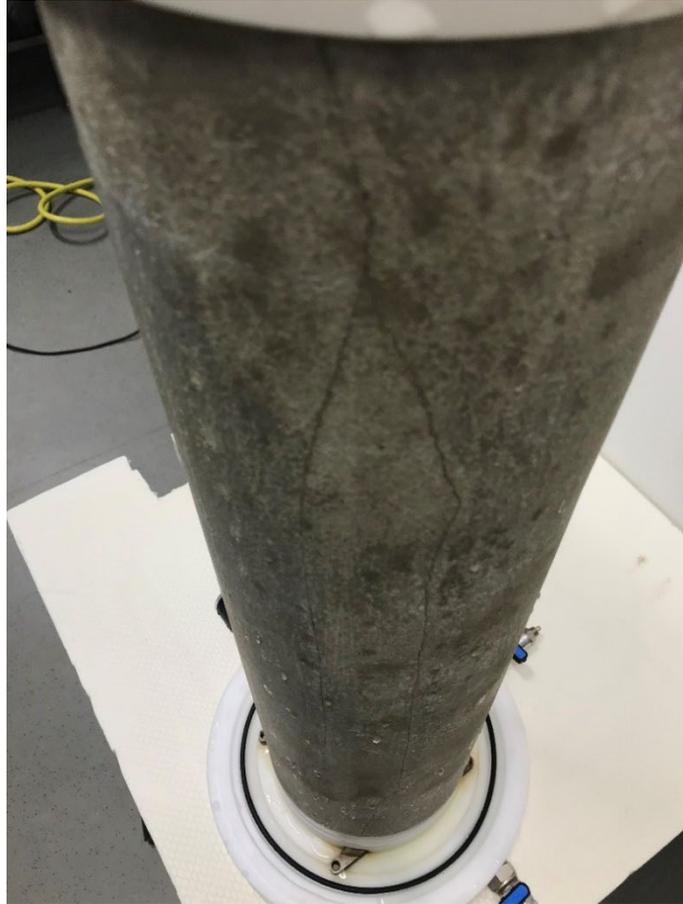
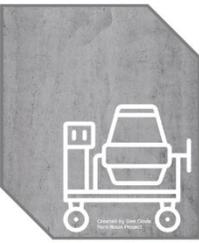
# 1. Ringversuch: Ausbau Referenzprobe und filtrierte Systemprobe



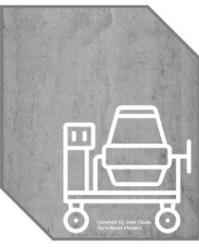
Fazit: Filtrierte Probe tendenziell etwas robuster und undurchlässiger, aber ähnliche Reaktionen auf Einflüsse. Beide Proben weisen Risse auf.



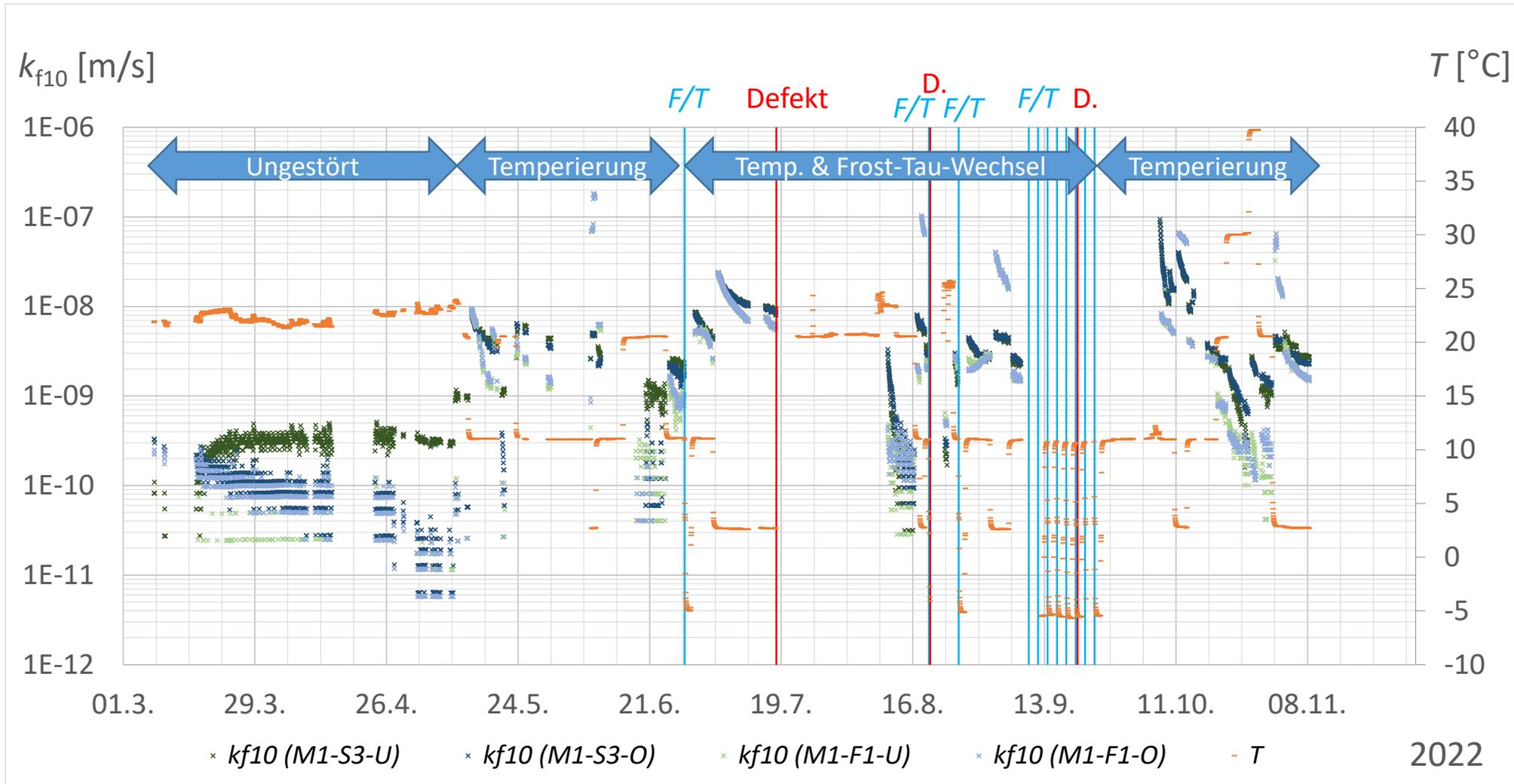
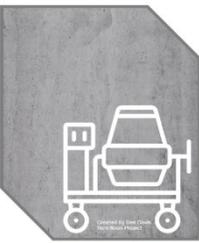
# 1. Ringversuch: Ausbau Probe 1



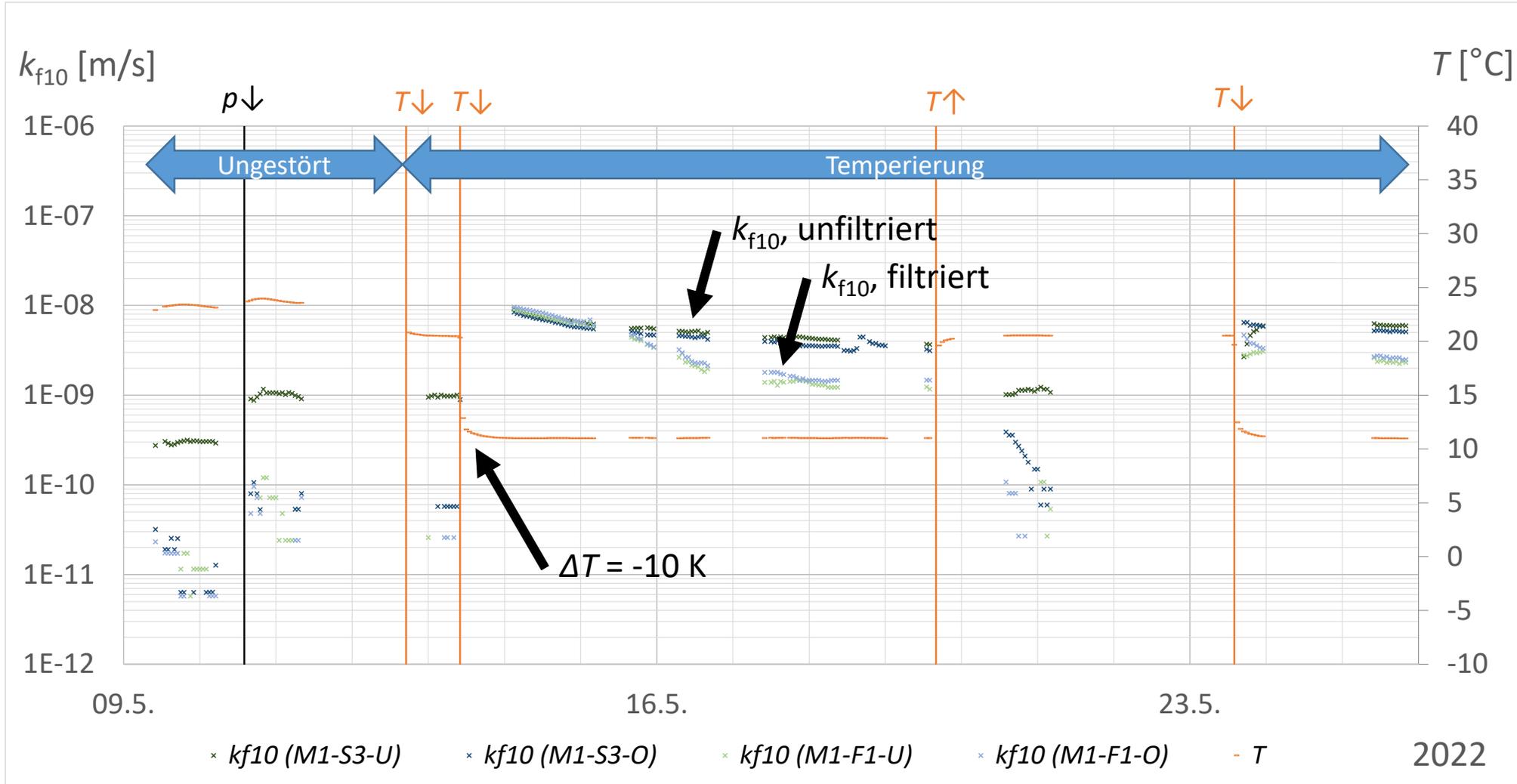
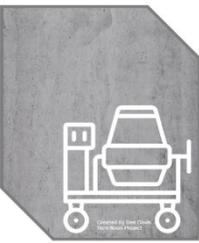
# 1. Ringversuch: Ausbau Probe 2



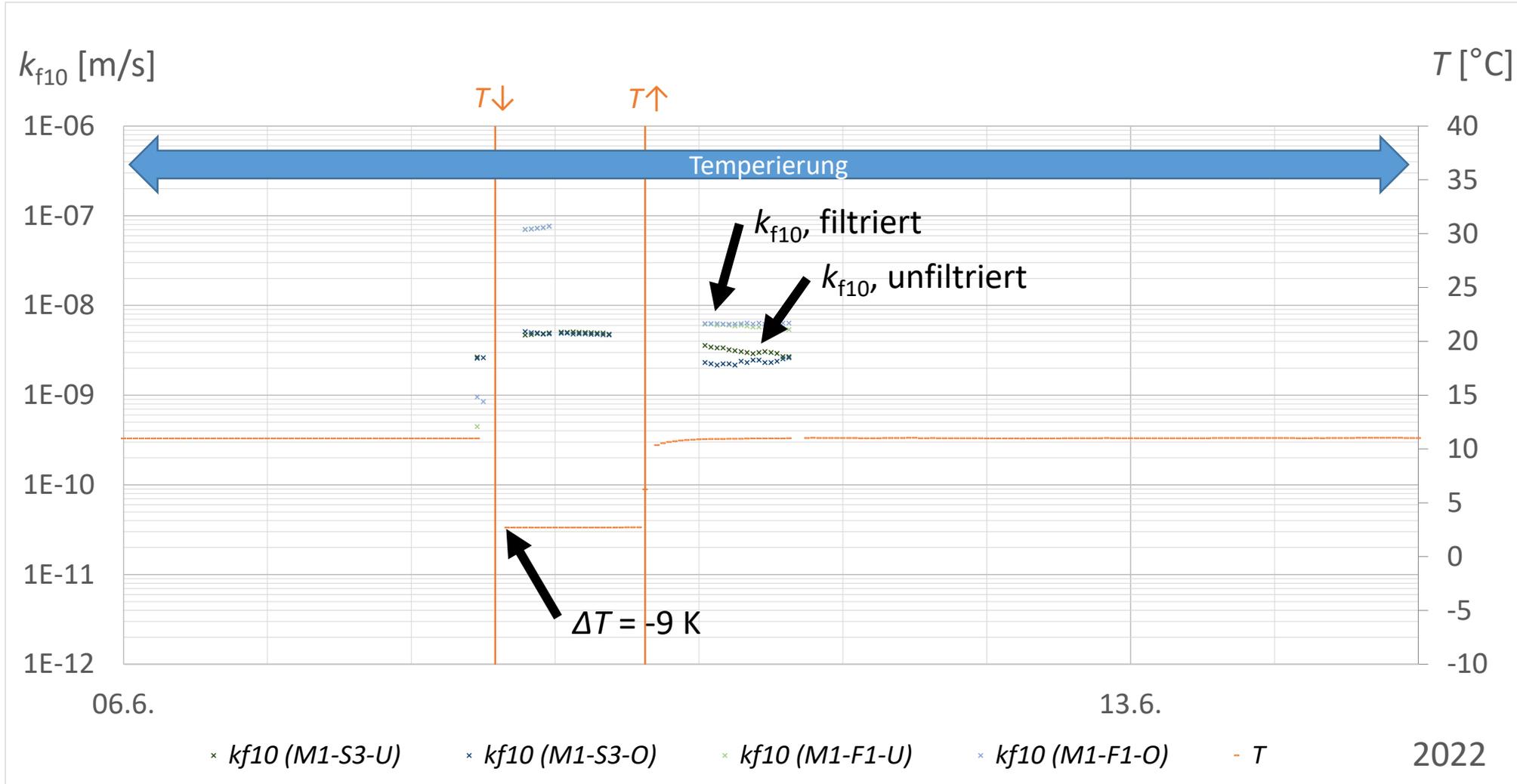
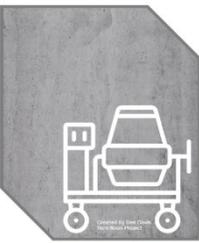
# Gesamtübersicht des 1. Ringversuchs



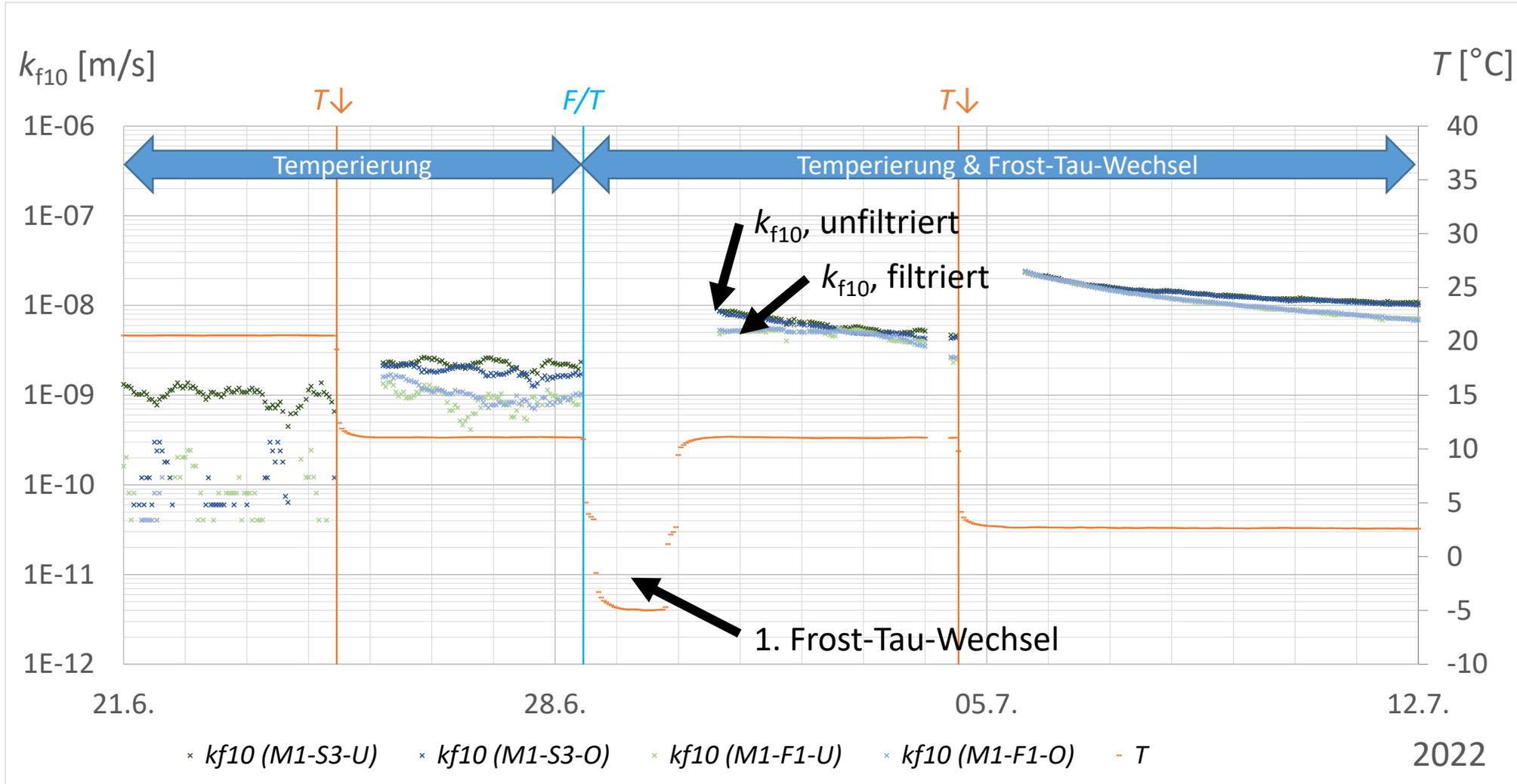
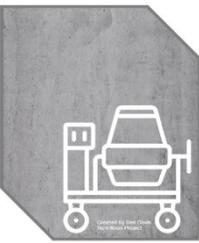
# Erste Temperierungen



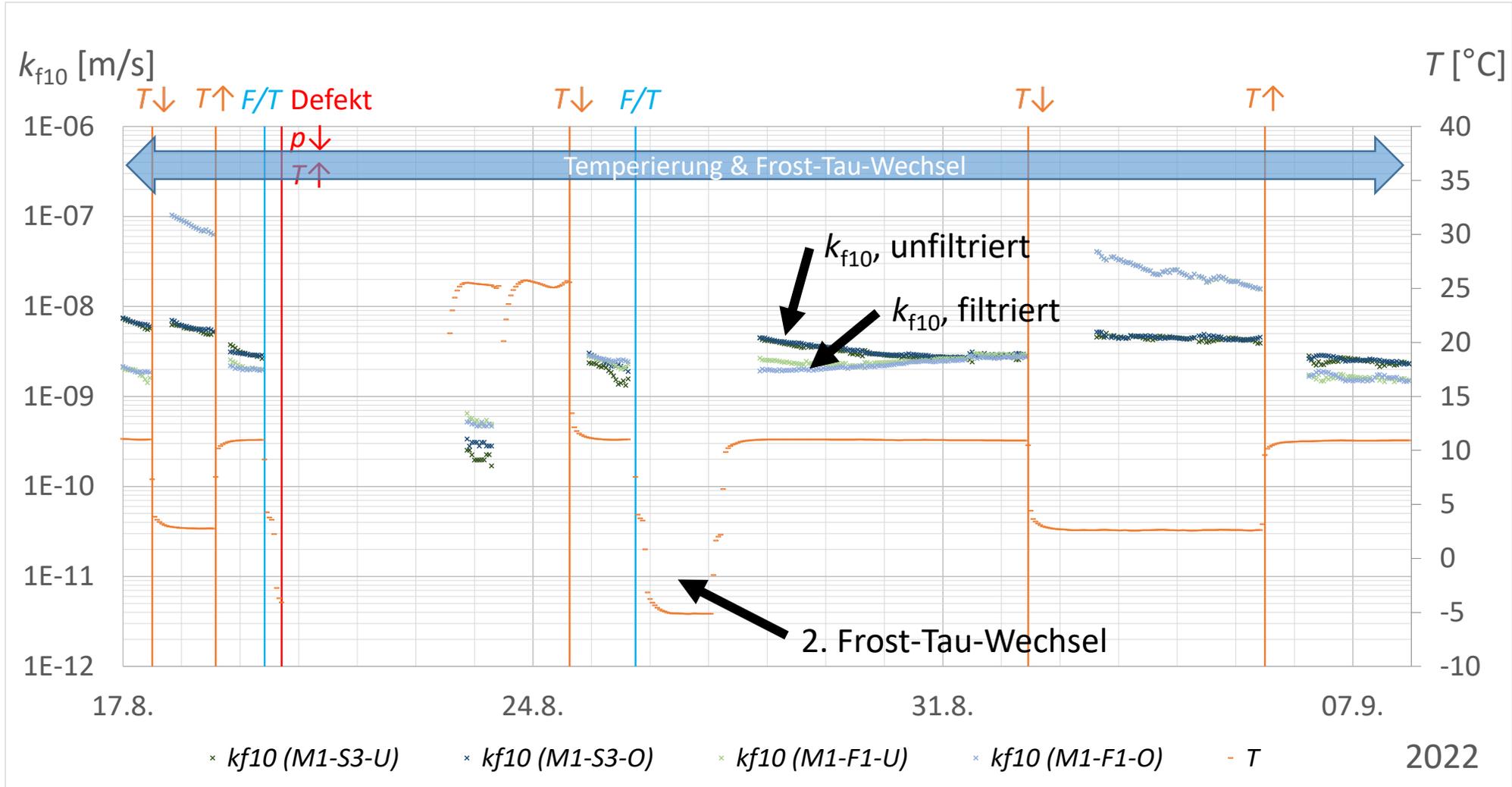
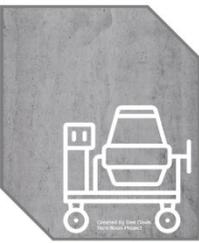
# Erste Abkühlung auf 1 °C

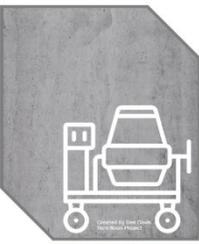


# 1. Frost-Tau-Wechsel

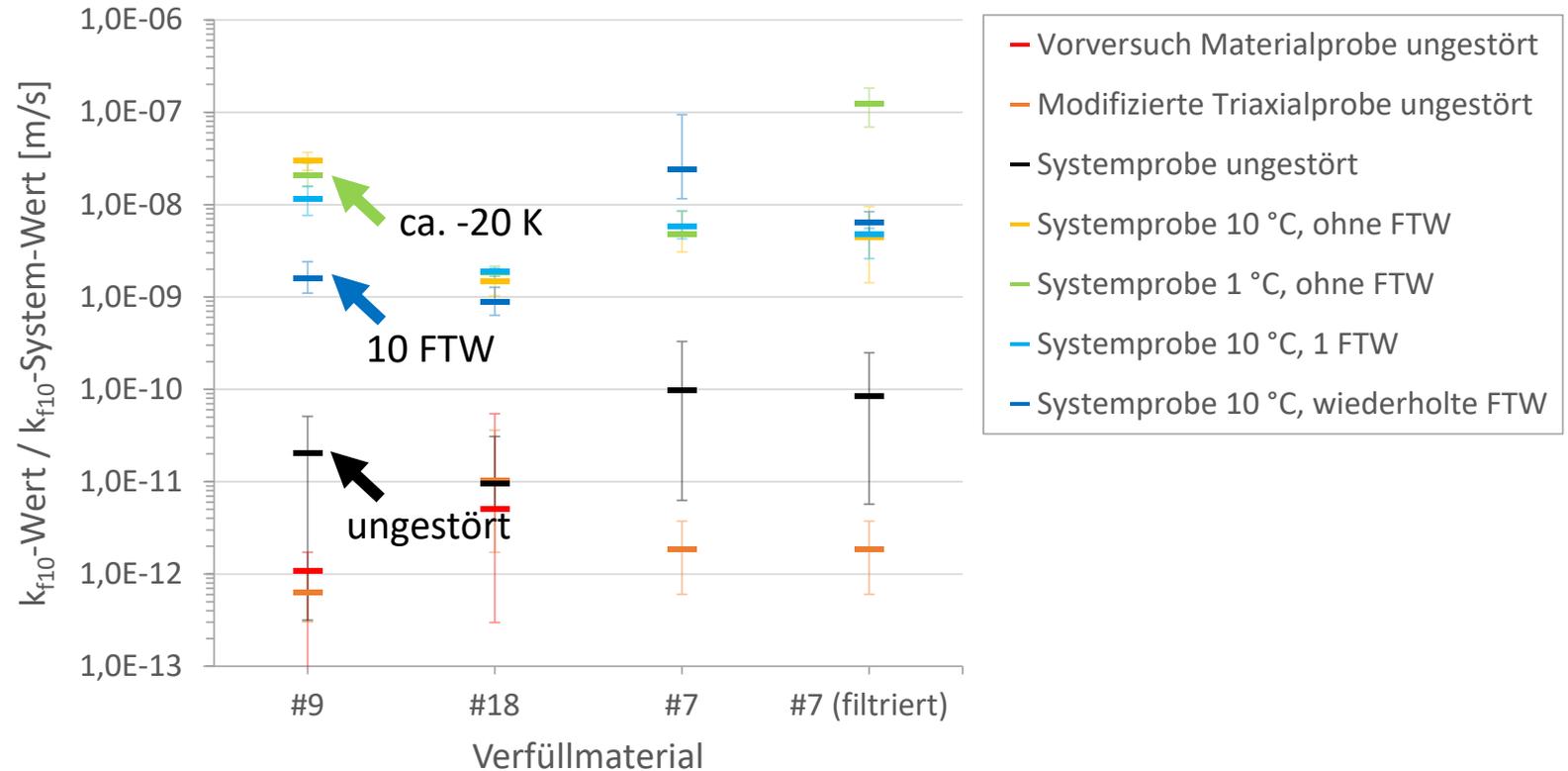


# Defekt und 2. Frost-Tau-Wechsel

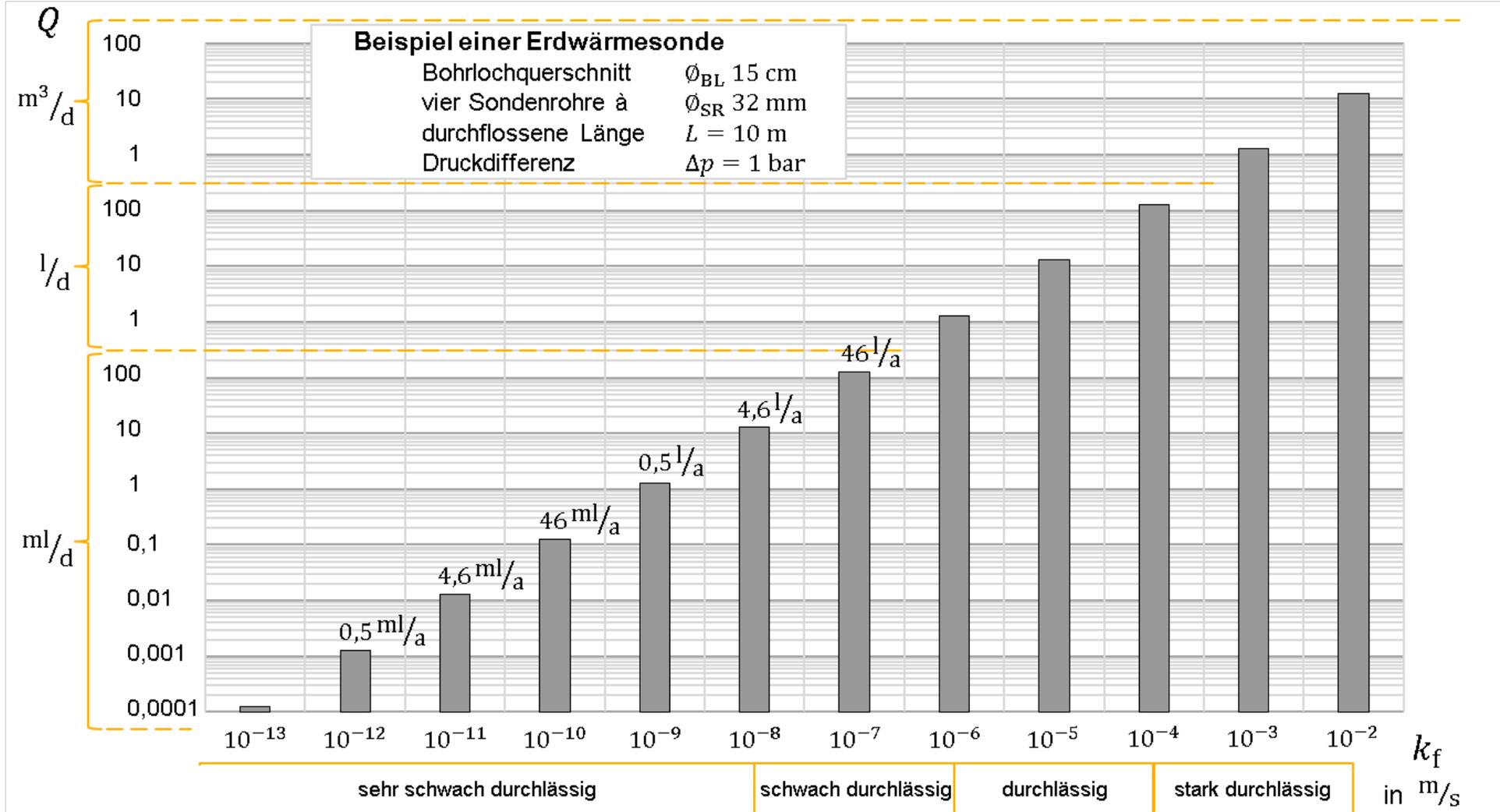
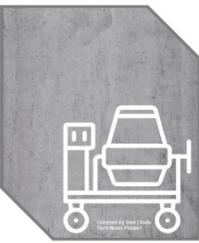


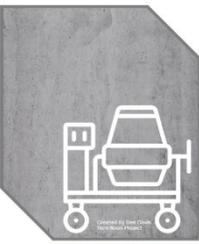


- Ungestörte Systemdurchlässigkeit  $\leq 1 \cdot 10^{-10}$  m/s
- Bei stufenweiser Abkühlung von 20 °C auf 1 °C steigt der  $k_f$  um mehrere Zehnerpotenzen
- Dies lässt sich auf die thermische Kontraktion der Sondenrohre zurückführen
- Nach FTW sind vergleichsweise geringe zusätzliche Anstiege der hydraulischen Leitfähigkeit festzustellen

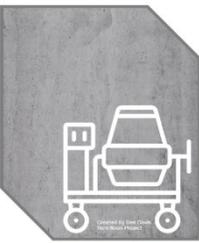


# Rechenbeispiel für Volumenstrom





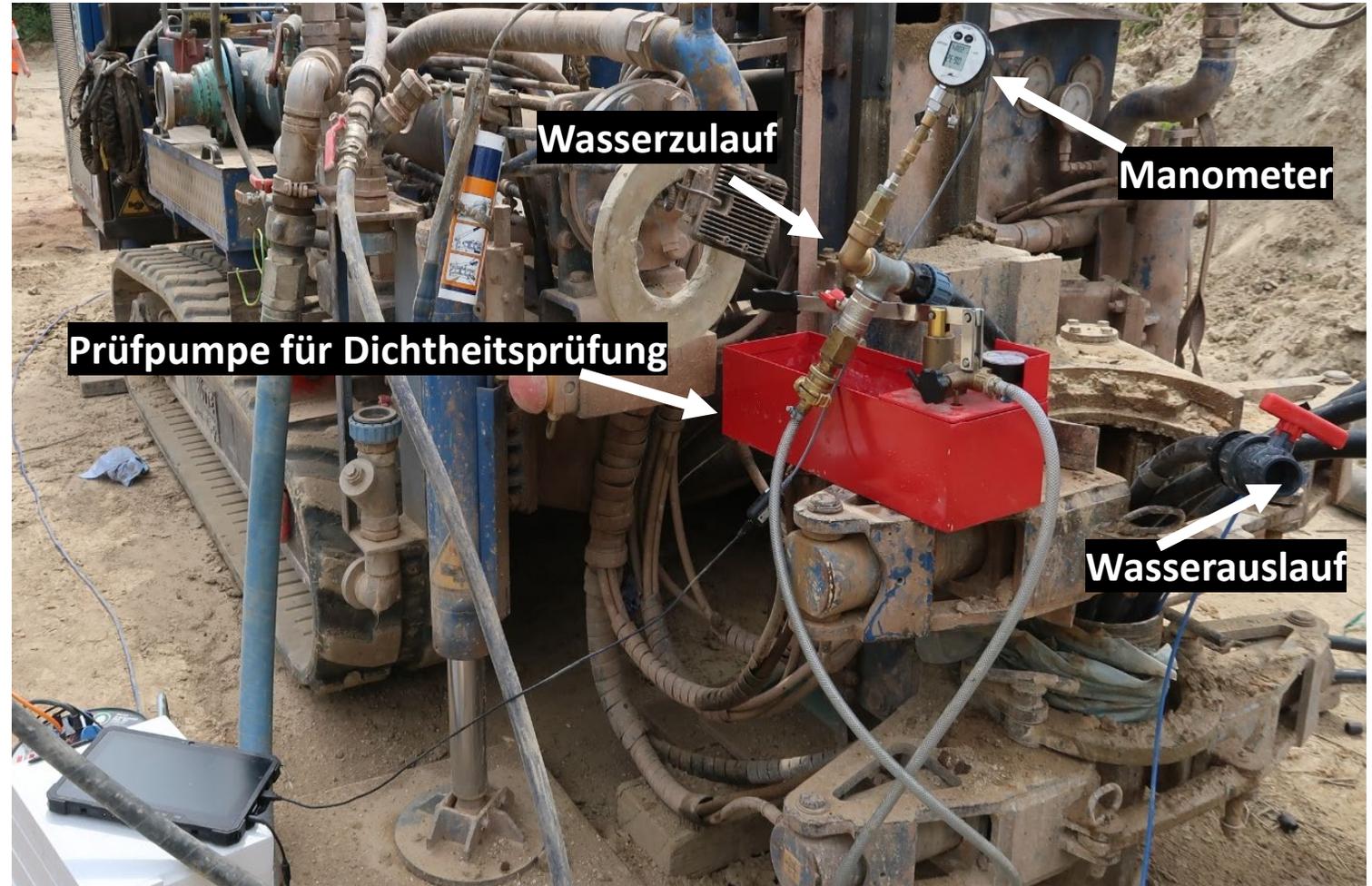
- Standortspezifische hydrogeologische Bedingungen (Wasserspiegel, Druckpotentiale)
- Untergrundtemperatur
- Bohrtiefe
- Suspensionsdichte
- Suspensionstemperatur beim Verfüllvorgang
- Hydratationswärme der Suspension
- Geschwindigkeit des Verfüllvorgangs (E-Modul von HDPE ist von der Belastung abhängig)
- Temperatur der Sonde beim Einbau
- Temperatur des Wassers in der EWS
- Länge des Überstands der EWS über GOK (Umgebungstemperatur)
- Alter der EWS
- Material der EWS (Materialkennwerte)
- Wandstärke der EWS
- Durchmesser der EWS
- Länge der EWS (Abweichung zur vertikalen Endteufe)

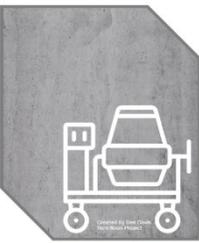


Befüllen der EWS

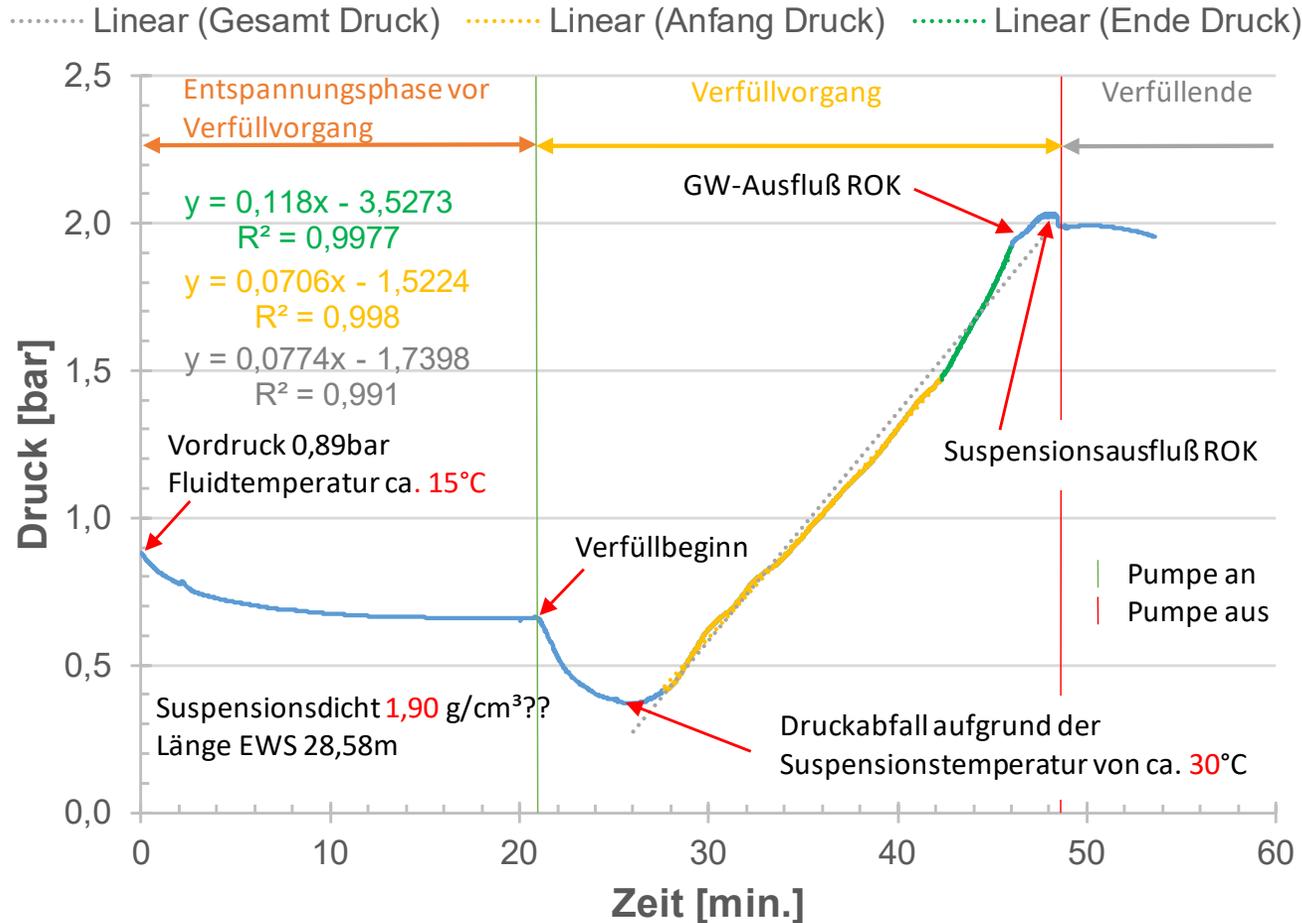


Entlüften der EWS

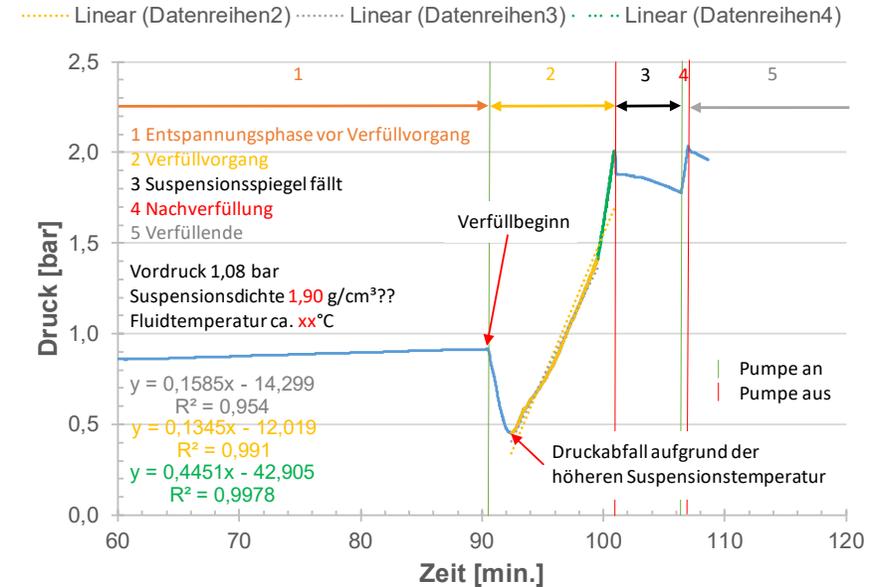




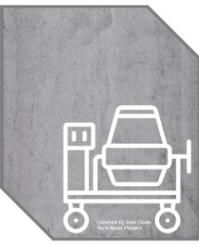
## Bohrung 5



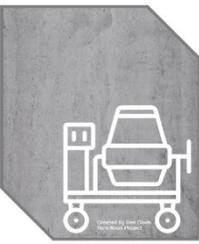
## Bohrung 7



	EWS 5	EWS 7
$\Delta p$ an Testsonde	1,7 bar	1,6 bar
$\Delta p$ auf 99 m EWS	5,8 bar	6,2 bar
$\Delta p$ auf 99 m korr.	7,6 bar	7,8 bar
$\Delta p$ auf 99 m korr.	6,7 bar	5,6 bar
$\Delta p$ auf 99 m korr.	11,3 bar	18,5 bar



- 1) Sondenfluiddruck- und vor allem -temperaturvariationen haben einen gravierenden Einfluss auf die vertikale Systemdurchlässigkeit (Randumläufigkeiten am Sondenrohr)
- 2) Die untersuchten Materialien zeigten in Relation zu Punkt 1) einen vergleichsweise geringen Einfluss der Frost-Tau-Wechsel (FTW) auf die Systemdurchlässigkeit. Allerdings kann diese zusätzliche Alterung eine deutliche Erhöhung des Volumenstroms verursachen.
- 3) Durchlässigkeitserhöhungen können durch Gegendruck und Zeitfaktor, zumindest teilweise, kompensiert werden.
- 4) Beim Verfüllvorgang steigt der Druck im verschlossenen Sondenrohr signifikant an, was negative Auswirkungen auf die spätere Systemdurchlässigkeit haben kann.
- 5) Die Ergebnisse im Labor wurden unter idealisierten Randbedingungen ermittelt, auf der Baustelle kommen zusätzliche Herausforderungen und Fehlerquellen hinzu.



- 1) Der von geologischen Diensten<sup>a)</sup> empfohlene  $k_f$ -sys bis  $1 \cdot 10^{-9}$  m/s für EWS-Bauwerke an Standorten mit GW-Gefährdungspotenzial ist ohne Gegenmaßnahmen nur bei einem ungestörten System ohne Auskühlung der Sonde erreichbar.
- 2) Solange Lösungsansätze für ein hydraulisch robustes Gesamtsystem nicht zur Marktreife gebracht sind, muss an Standorten mit GW-Gefährdungspotenzial eine Risikobewertung mit realistischen  $k_f$ -Werten für das EWS-Bauwerk unter Berücksichtigung der natürlichen Grundwasserströmungen durchgeführt werden.
- 3) An Standorten mit GW-Gefährdungspotenzial sollten beim Hinterfüllvorgang die Sondenrohre unbedingt geöffnet bleiben, um einen übermäßigen Druckanstieg in den Sondenrohren zu vermeiden. Dabei ist allerdings auch ein Kollabieren der Sondenrohre zu verhindern.

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

# Danke für die Aufmerksamkeit!

Gefördert durch:



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



## 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

Institut für Angewandte Geowissenschaften (AGW)

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



Qualitätssteigerung  
oberflächennaher Geothermiesysteme

[www.qewsplus.de](http://www.qewsplus.de)

Micha Pinnekamp  
ZAE Bayern e. V.  
Walther-Meißner-Straße 6  
85748 Garching  
+49 89 329442-25  
micha.pinnekamp@zae-bayern.de

Workshopreihe:

Nachhaltige Wärmeversorgung mittels Wärmepumpe:

Anwendung – Qualitätssicherung – Quartiersversorgung



Qualitätssteigerung  
oberflächennaher Geothermiesysteme

## Teilprojekt 4: Multifunktionale Modellierung von oberflächennahen Geothermiesystemen

Roland Koenigsdorff, Fabian Neth, Lukas Schleichert,  
Adinda Van de Ven

**HBC.**  
HOCHSCHULE  
BIBERACH  
UNIVERSITY  
OF APPLIED SCIENCES

**BURKHARDT**  
Geologische und  
hydrologische  
Bohrungen

**eifer**

**HAURI**

**H.S.W.** Ingenieurbüro  
Gesellschaft für Energie und Umwelt mbH

**KIT**  
Karlsruher Institut für Technologie

**solites**

Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Klimaschutz

**Fraunhofer**  
ISE

In Zusammenarbeit mit:



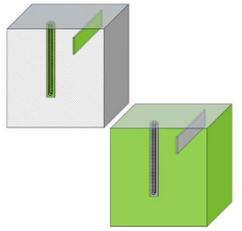
ZAE BAYERN

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

Diese Unterlagen sind zunächst ausschließlich für den persönlichen Gebrauch durch die Teilnehmerinnen und Teilnehmer „Nachhaltige Wärmeversorgung mittels Wärmepumpe: Anwendung – Qualitätssicherung – Quartiersversorgung“ vom 10.05.2023 bestimmt.

In diesen Unterlagen ist z. T. geistiges Eigentum Dritter in zitierender Weise wiedergegeben, weshalb eine unrechtmäßige Weiterverbreitung dieser Unterlagen neben ideellen auch finanzielle Schäden nach sich ziehen kann, für die der Verursacher haftbar gemacht wird.

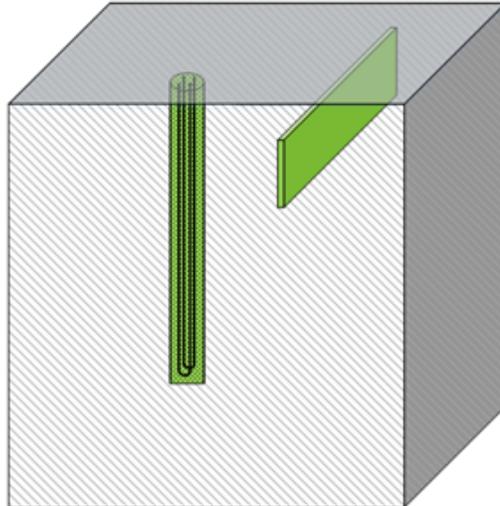
Eine Weitergabe an außenstehende Dritte in irgendeiner Form ist deshalb grundsätzlich nicht gestattet. Für die Teile dieses Dokuments, an denen die Verfasser selbst die Urheberrechte halten, werden auf Anfrage gerne weitergehende Nutzungsrechte (für Zwecke der Lehre und Forschung kostenlos) gewährt.



## Vorgehen

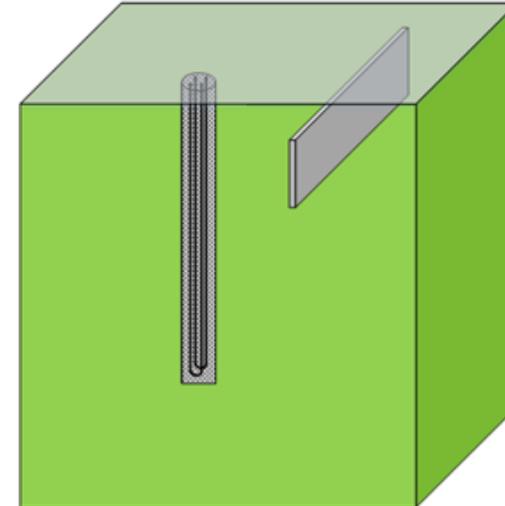
### Unterteilung des Berechnungsgebiets & Anwendung analytischer Näherungsmodelle

- Quellensystem  
(inkl. Einbausituation)

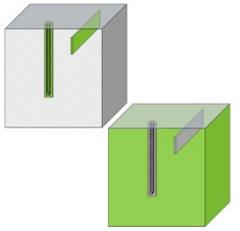


Analytische Widerstandsmodelle  
& ggf. Kapazitäten

- Umliegender Untergrund  
(inkl. Erdoberflächeneinfluss)



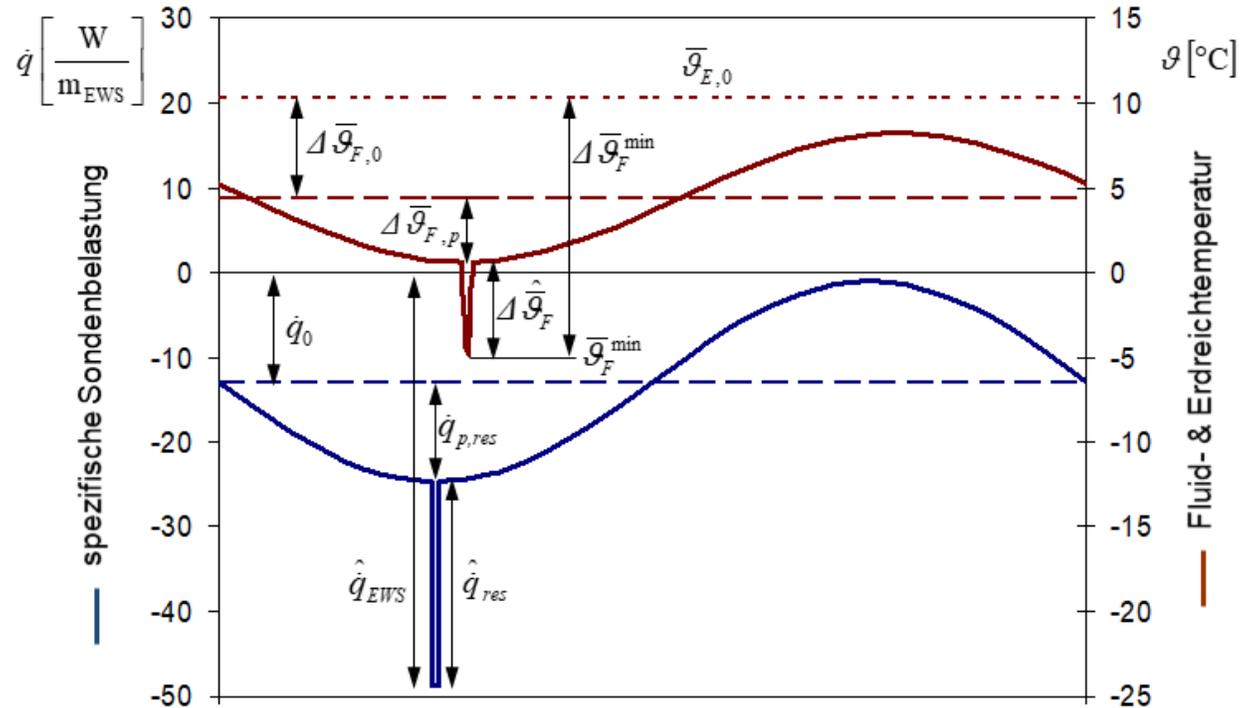
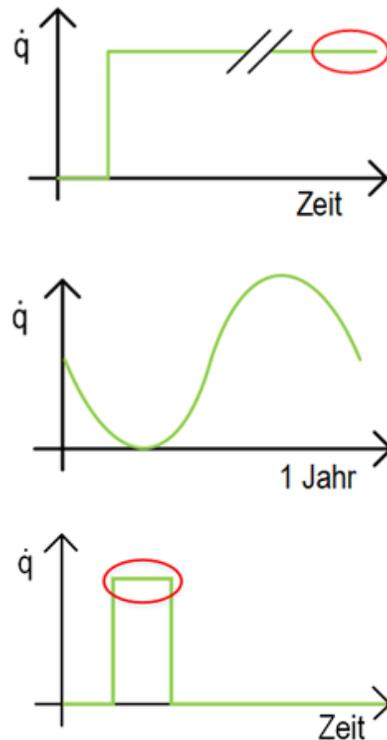
Erweiterungen analytischer Lösungen der  
momentanen punktförmigen Wärmequelle



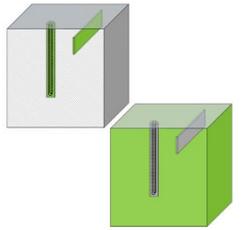
## Vorgehen



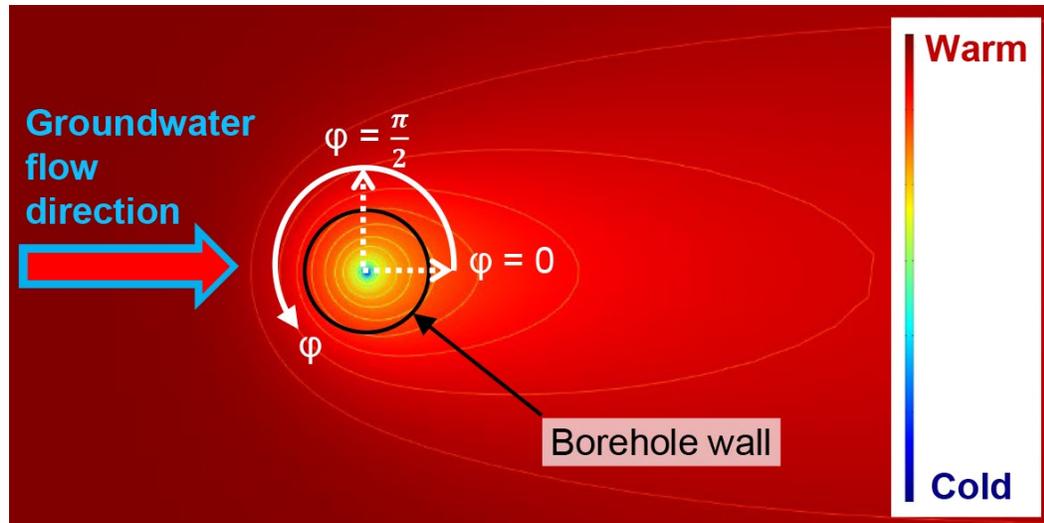
### Das geothermische Lastprofil und die Temperaturreaktion



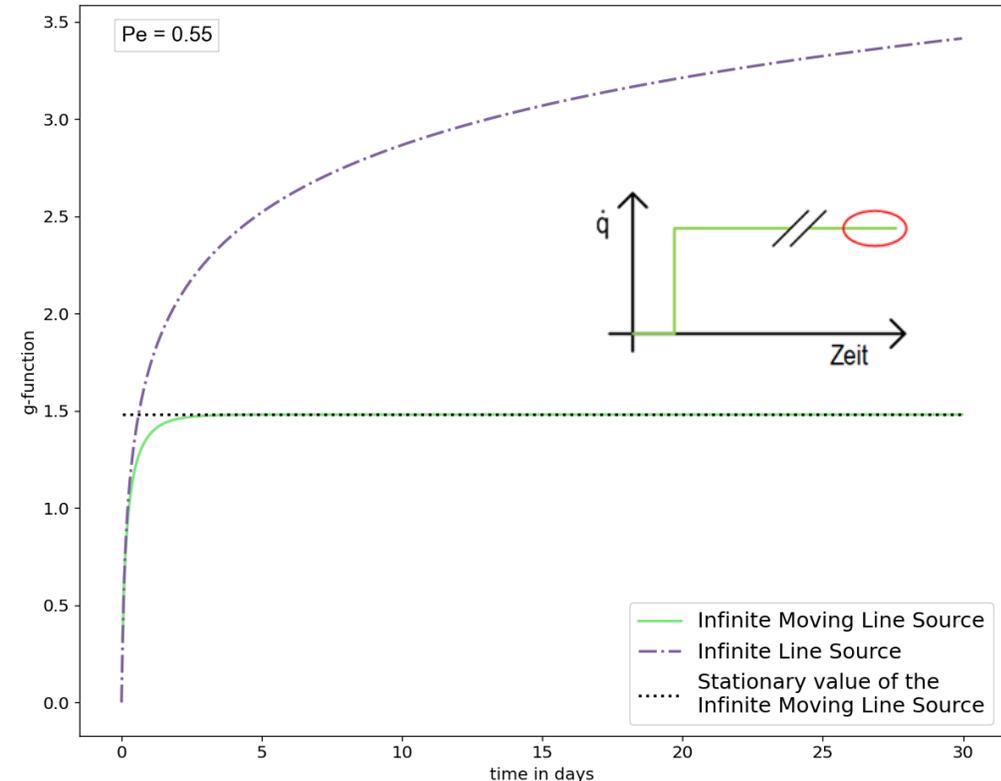
Quelle: R. Koenigsdorff, Oberflächennahe Geothermie für Gebäude, 2011



## Die analytische Lösung der Infinite Moving Line Source



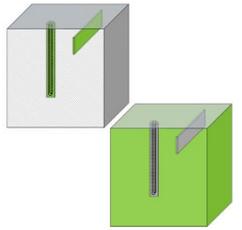
$$\Delta\vartheta = \frac{\dot{q}}{2 \pi \lambda_{eff}} \left\{ I_0 \left( \frac{Pe}{2} \right) K_0 \left( \frac{Pe}{2} \right) \right\}$$



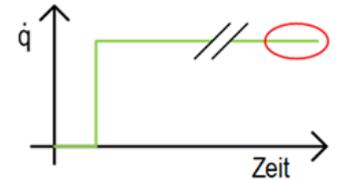
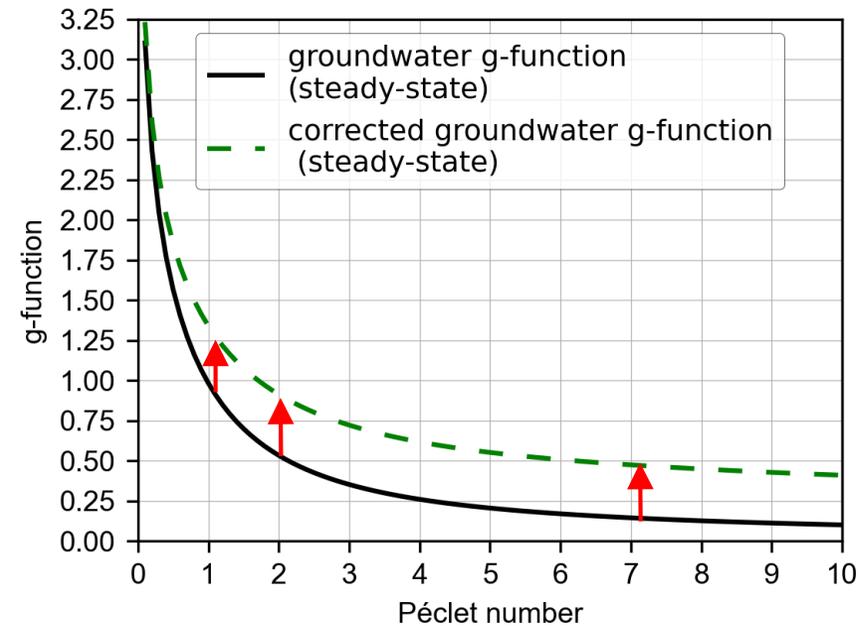
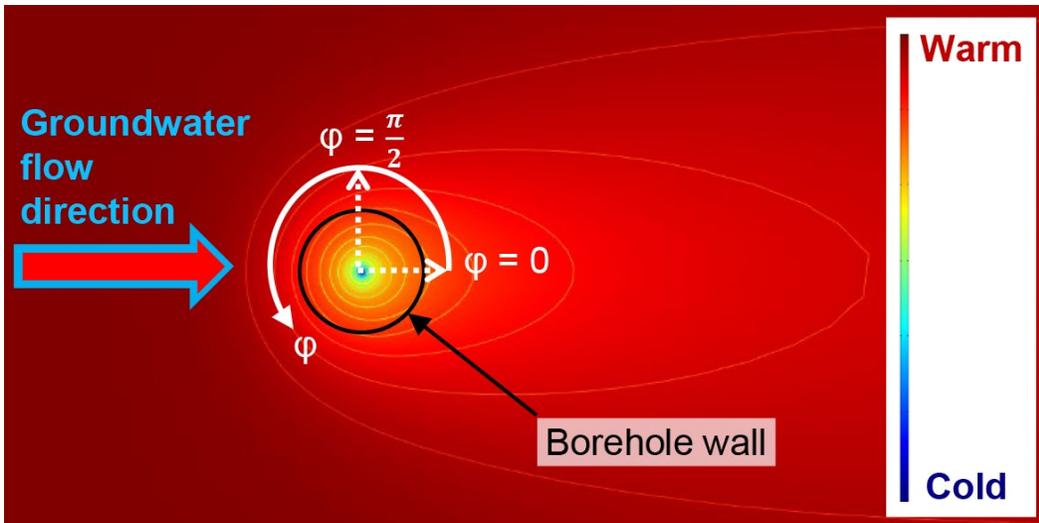
Quelle:

Van de Ven, Adinda, Roland Koenigsdorff, and Peter Bayer. 2021. "Enhanced Steady-State Solution of the Infinite Moving Line Source Model for the Thermal Design of Grouted Borehole Heat Exchangers with Groundwater Advection" *Geosciences* 11, no. 10: 410. <https://doi.org/10.3390/geosciences11100410>





## Korrektur analytische Lösung für Grundwasserfluss um Bohrlochverfüllung

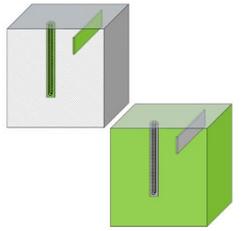


$$\Delta\vartheta = \frac{\dot{q}}{2 \pi \lambda_{eff}} \left\{ I_0 \left( \frac{Pe}{2} \right) K_0 \left( \frac{Pe}{2} \right) \right\}$$

→ Korrektur am Bohrlochrand erforderlich

Quelle:

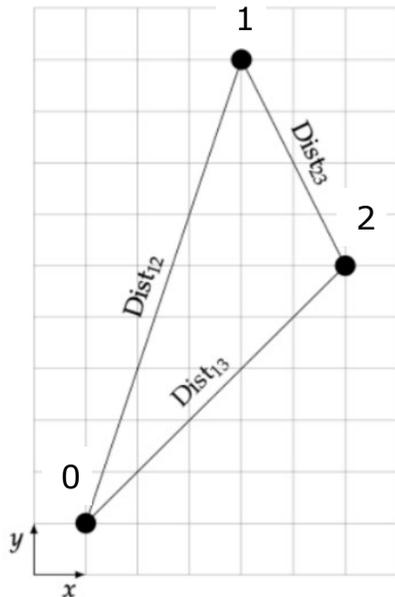
Van de Ven, Adinda, Roland Koenigsdorff, and Peter Bayer. 2021. "Enhanced Steady-State Solution of the Infinite Moving Line Source Model for the Thermal Design of Grouted Borehole Heat Exchangers with Groundwater Advection" *Geosciences* 11, no. 10: 410. <https://doi.org/10.3390/geosciences11100410>



## Vorgehen

- g-Endwert inkl. Korrektur aufgrund der Verfüllung für eine Einzelsonde
- Superponiert mit Temperaturänderungen der Nachbarsonden

**Bis zu welcher Entfernung ist die Bohrlochverfüllungskorrektur erforderlich?**



**Eingaben:**

```
Koordinaten:
[0.0, 3.0, 5.0]
[0.0, 9.0, 5.0]
Höhen:
0 -
1 -
2 -
```

**g<sub>einzel</sub> + Einfluss:**

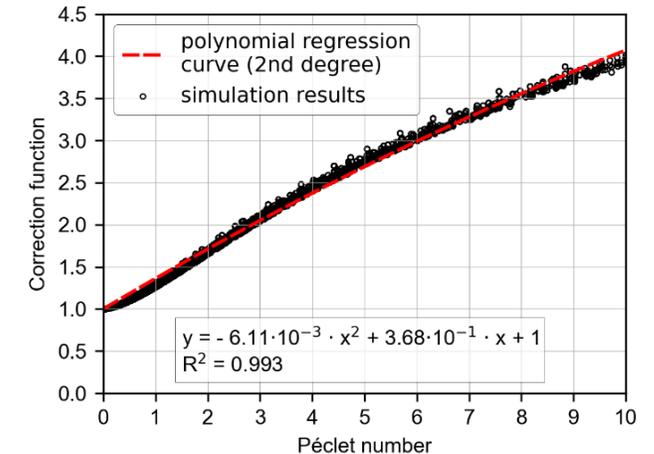
```
g_fls_matrix:
      0      1      2
0  6.417678  1.657575  2.098170
1  1.381313  6.600000  2.629540
2  1.234217  1.856146  6.948307
```

**Superposition:**

```
EWS_g_functions:
[0  10.173423
 1  10.610853
 2  10.038670
dtype: float64]
```

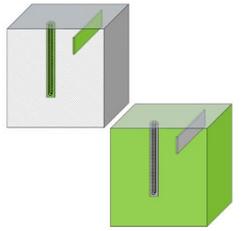
**Endergebnis:**

```
die gemittelte g-function des EWS-Feldes beträgt:
10.274
```



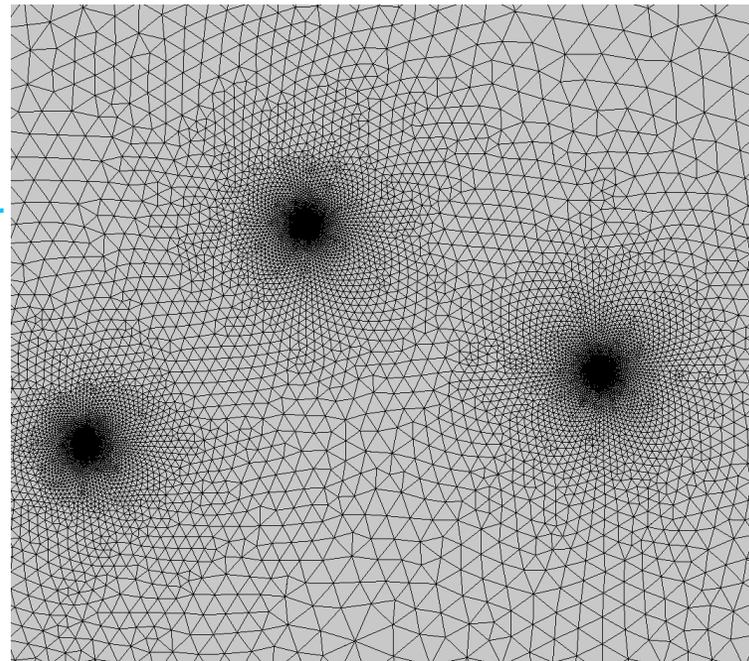
Quelle:  
 Van de Ven, A., Koenigsdorff, R., and Bayer, P. 2021. Enhanced Steady-State Solution of the Infinite Moving Line Source Model for the Thermal Design of Grouted Borehole Heat Exchangers with Groundwater Advection, *Geosciences* 11, no. 10: 410.



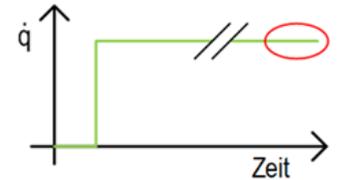
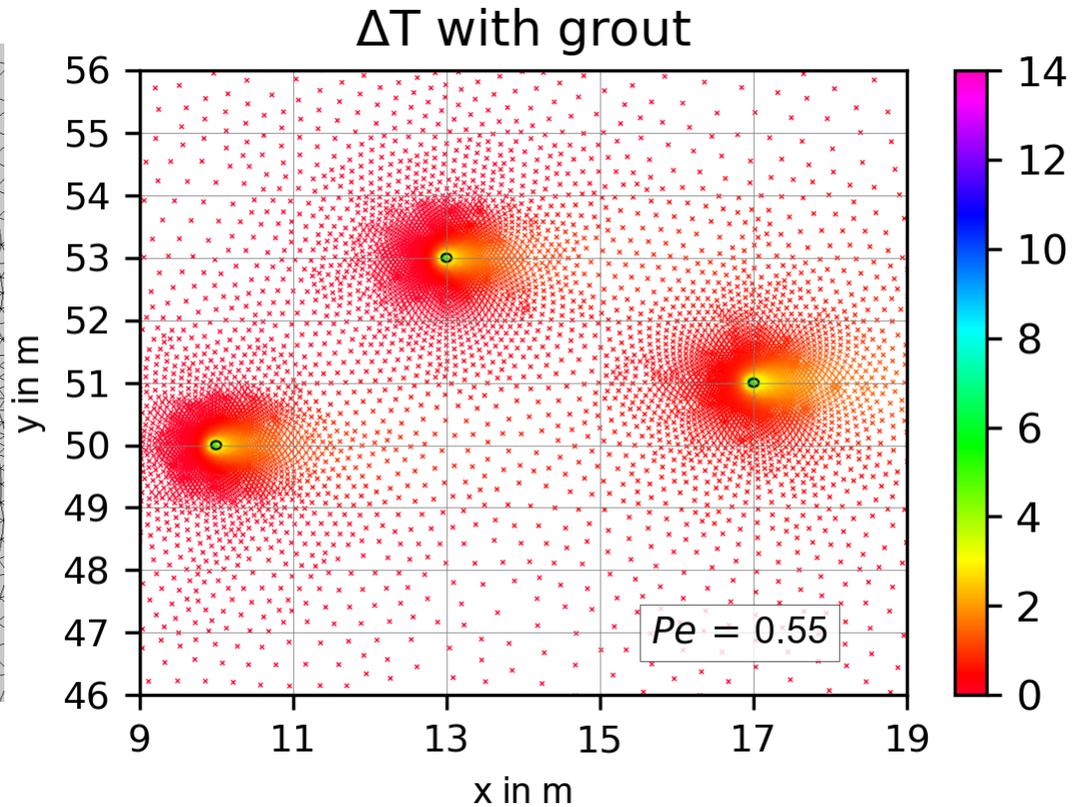


## Numerische Simulation

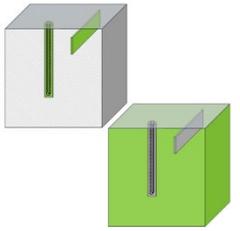
Groundwater  
 flow  
 direction



[0, 0] [3 m, 3 m] [7 m, 1 m]



Simulationen mit COMSOL Multiphysics<sup>®</sup>

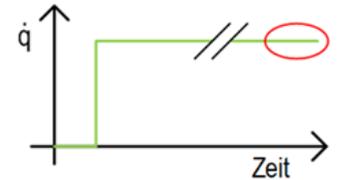
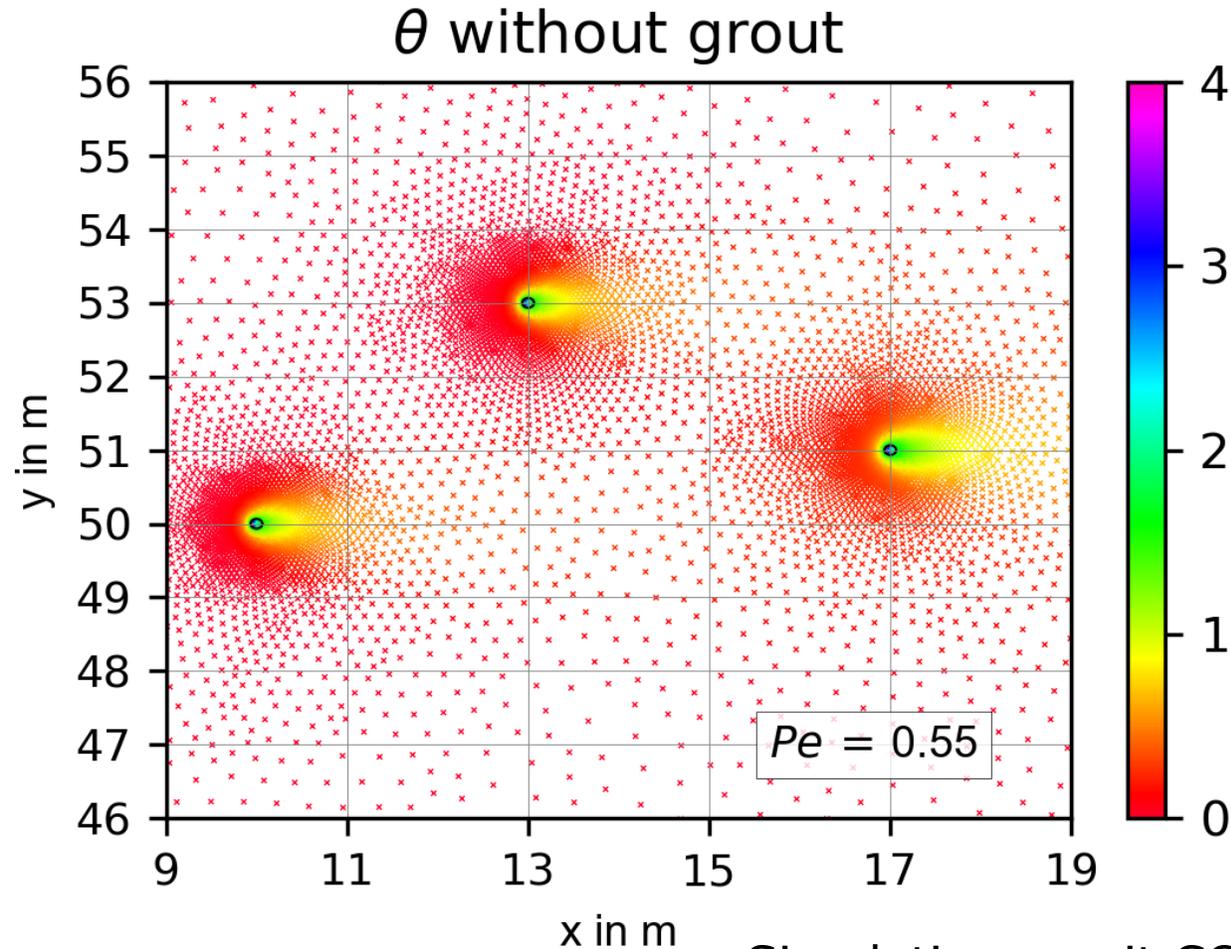


Temperaturfeld

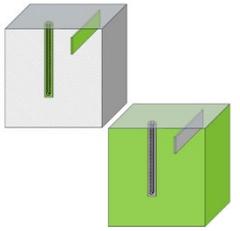
Bohrlöcher  
 unverfüllt



Groundwater  
 flow  
 direction



Simulationen mit COMSOL Multiphysics®

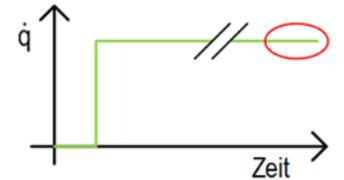
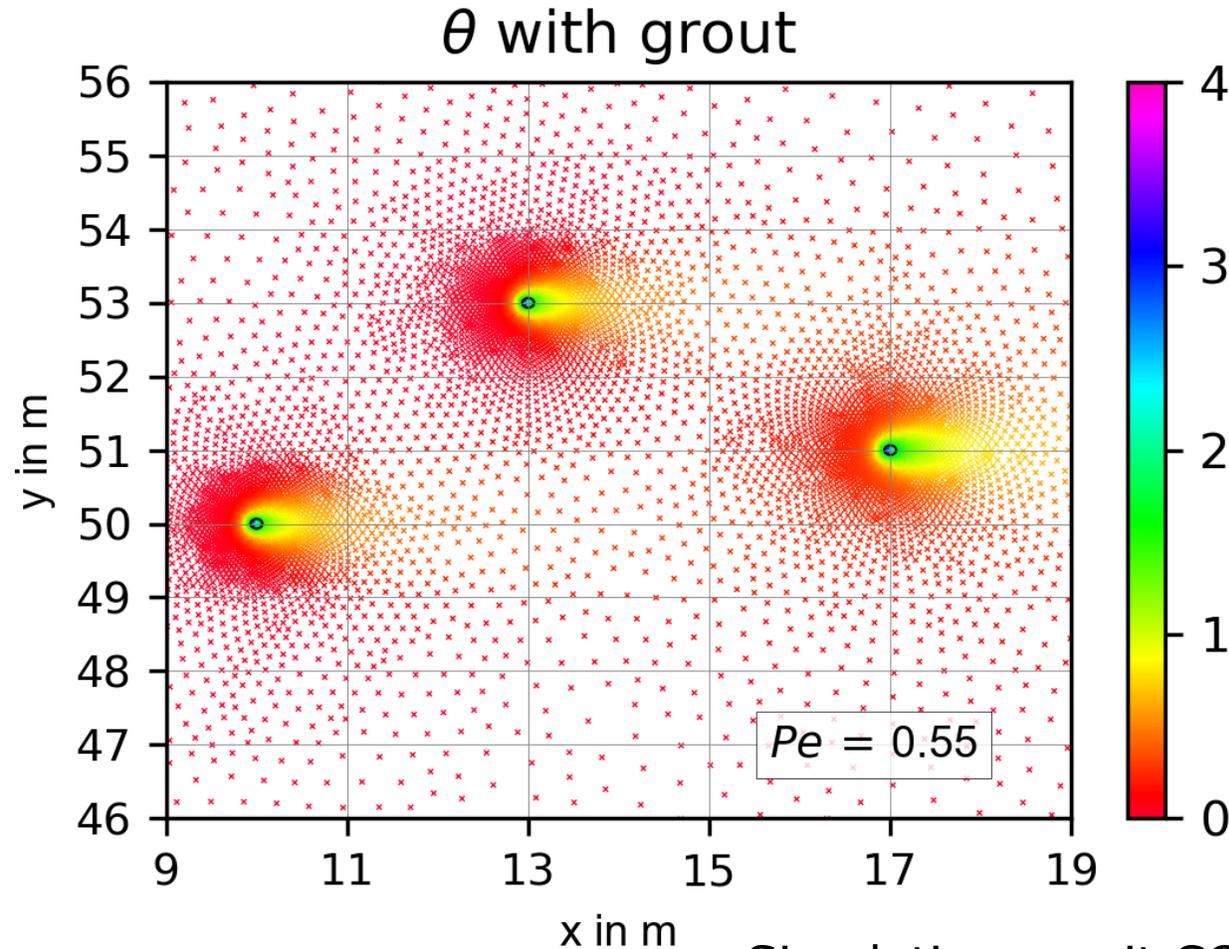


Temperaturfeld

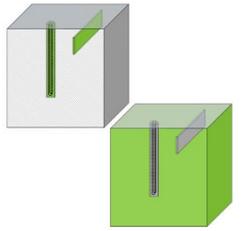
Bohrlöcher  
 verfüllt



Groundwater  
 flow  
 direction

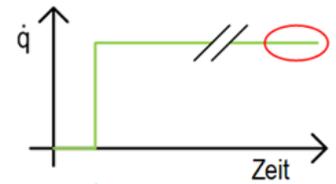
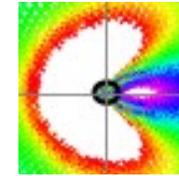
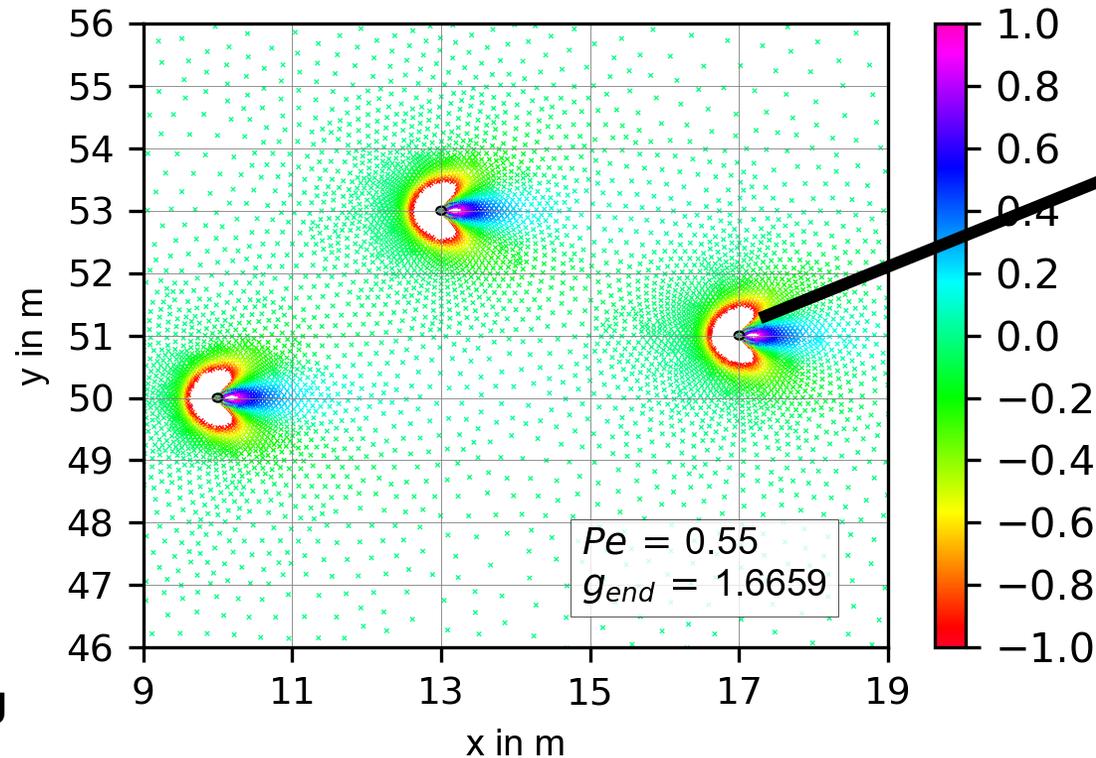


Simulationen mit COMSOL Multiphysics®



## Relative Differenz Temperaturänderung mit & ohne Bohrlochverfüllung in %

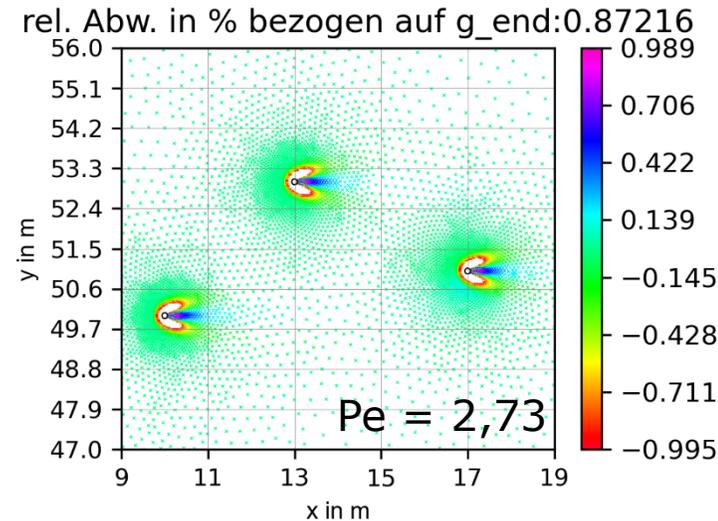
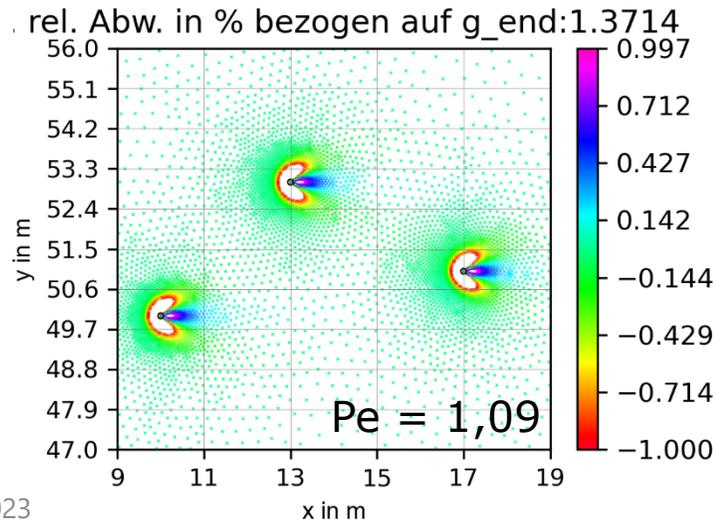
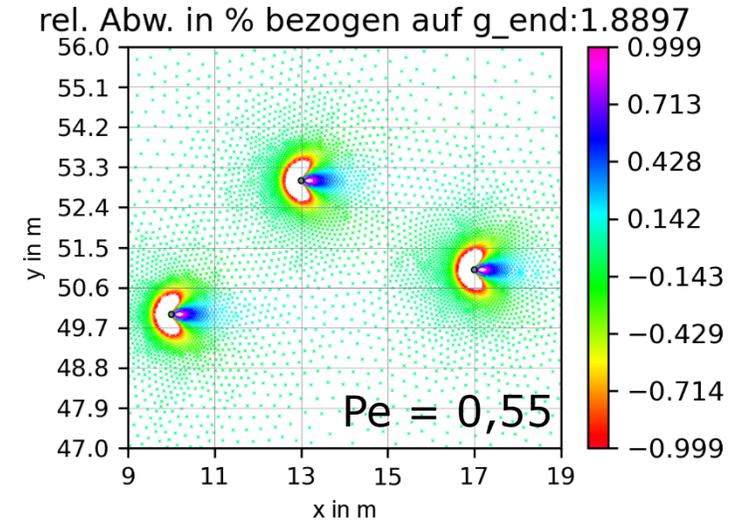
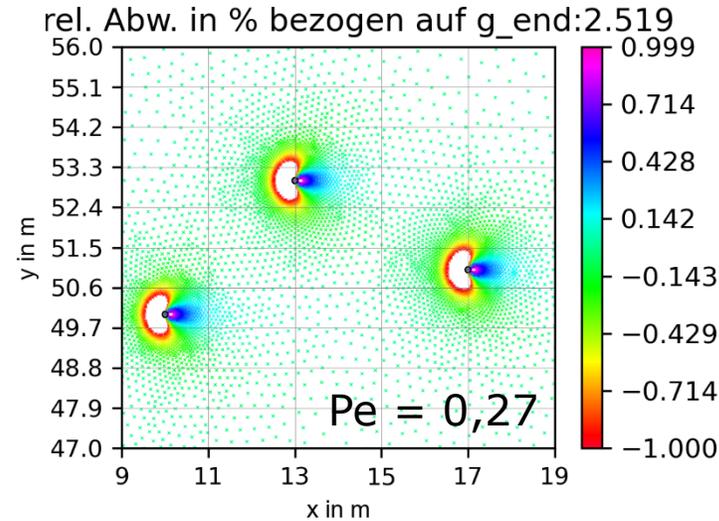
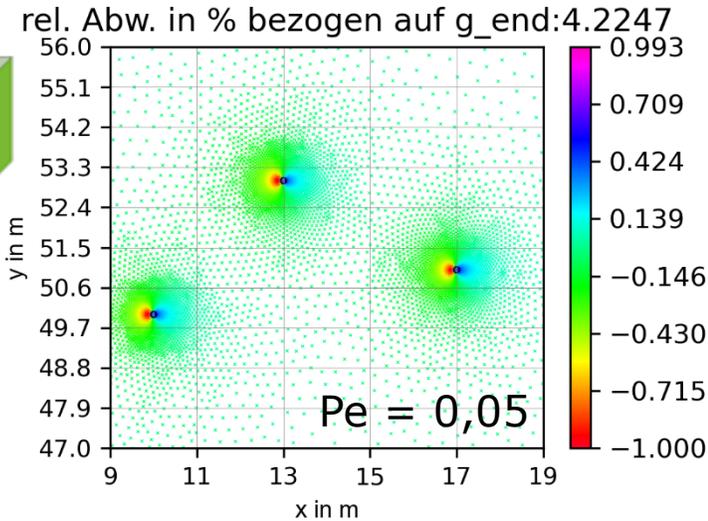
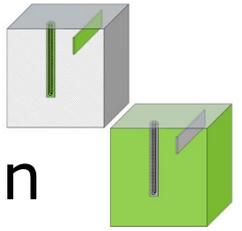
- Bohrlocheinfluss nur im Nahbereich ( $\approx 1$  m)
- Analytische Lösung (Infinite Moving Line Source) hinreichend für Fernwirkung
- Korrektur am Bohrlochrand erforderlich
- **Analytisches Modell für EWS-Felder in Grundwasserströmung**

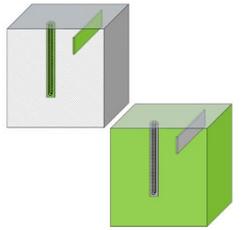


**Groundwater flow direction**

Simulationen mit COMSOL Multiphysics®

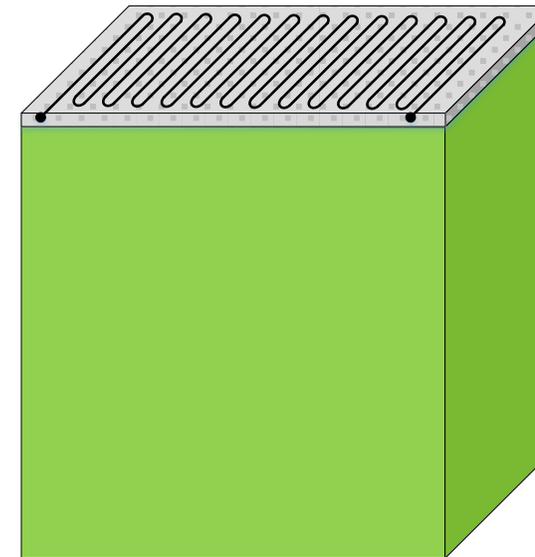
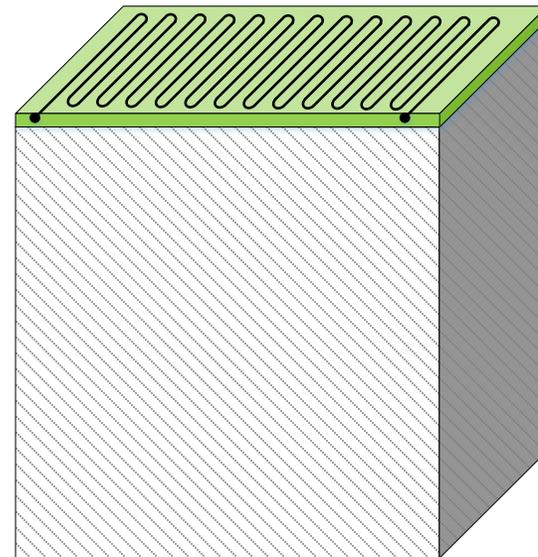
# EWS-Feld mit und ohne Bohrlochverfüllung - numerische Simulation: rel. Differenz für verschiedenen Pe-zahlen





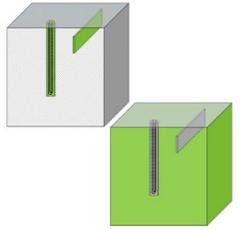
## Vorgehen analog zu EWS und EWK: Unterteilung des Rechengebiets

Quellensystem Bodenabsorber



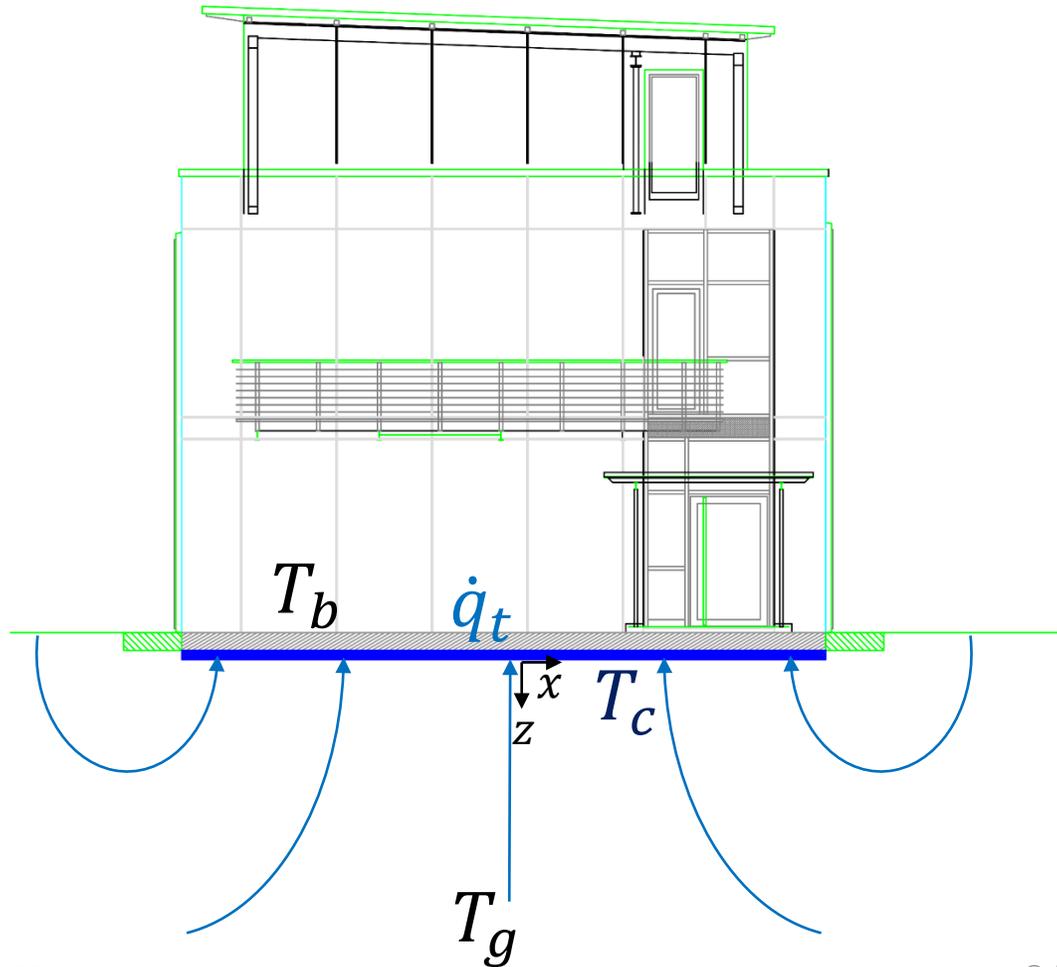
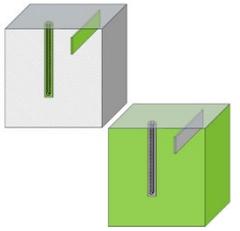
Angrenzender Untergrund

- + Weitere Einflussgrößen:
- Erdoberflächeneinfluss
  - Raumtemperatur oberhalb des Bodenabsorbers
  - Anisotrope Einbausituation (Sauberkeitsschicht / Erdreich)

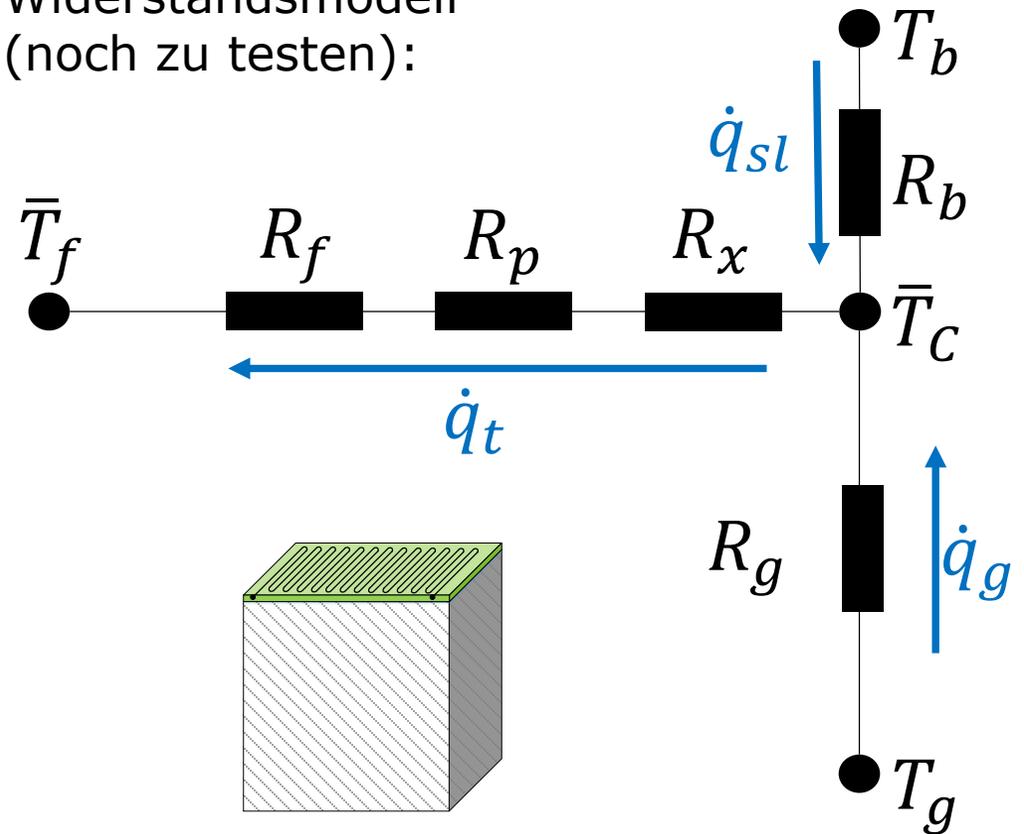


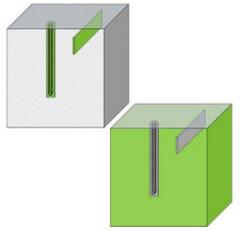
Durch den vorhandenen Bodenabsorber an der HBC ist nicht nur eine Validierung mittels Simulation, sondern auch durch Messungen möglich.

- Simulationsmodell (2D) für Ermittlung der g-functions und zur Verifizierung des analytischen Modells bereits vorhanden
- Mehrere Thermal-Response-Tests (TRTs) bereits am Bodenabsorber durchgeführt
- Ermittlung der ungestörten Untergrundtemperatur als Ausgangspunkt des gTAB-Modells
- TRTs dienen zur Validierung von analytischem Modell (TRT  $\leftrightarrow$  g-function) als auch dem Simulationsmodell



Erster Ansatz für das Widerstandsmodell (noch zu testen):

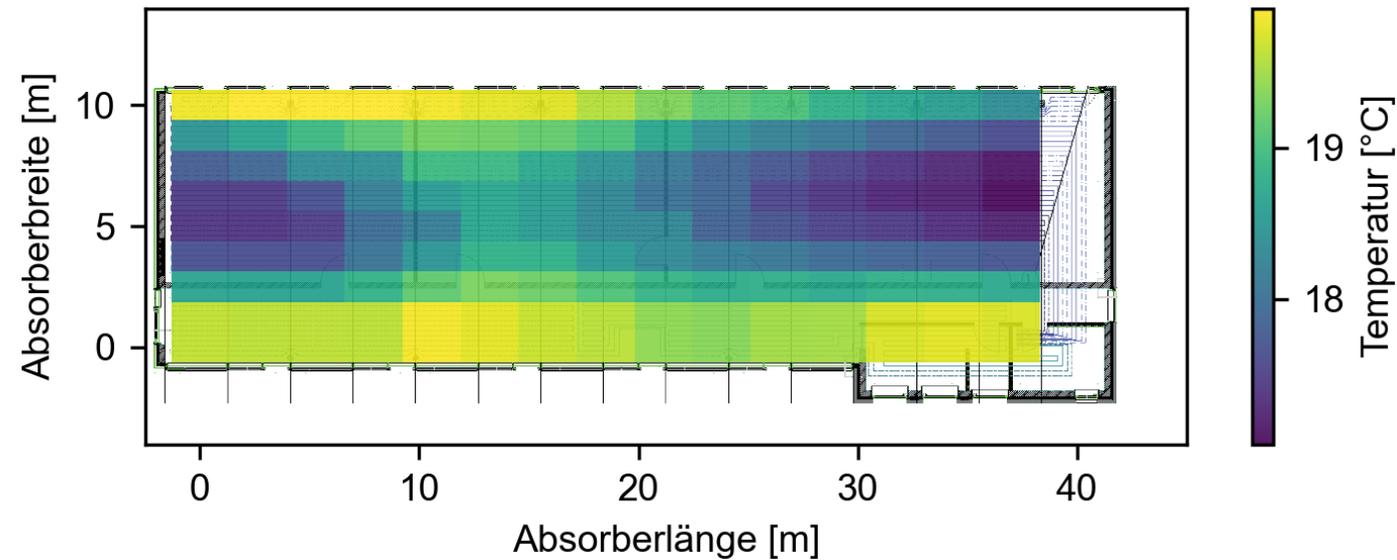
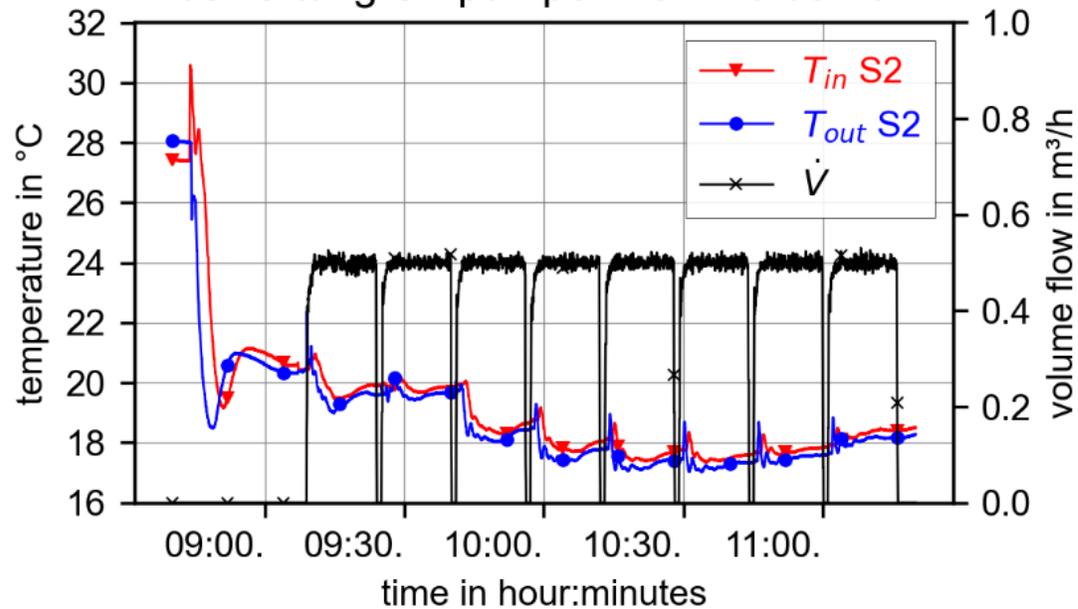


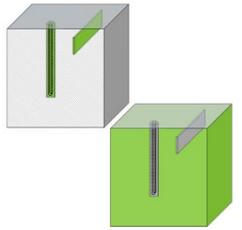


Ermittlung der ungestörten Temperatur des Bodenabsorbers:

Im Mittel ca. 18,5 °C (August 2022), abhängig von Aufbau und Lage des Gebäudes und der Bodenplatte

Auswertung Umpumpen vom 10.08.2022





## Aufbau des TRT-Gerätes für den Anschluss am Verteiler des Bodenabsorbers

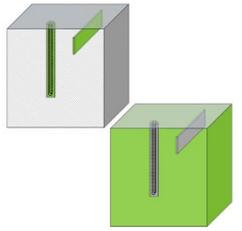


## Versuch der Auswertung über IPS analog zum Vorgehen am EWK

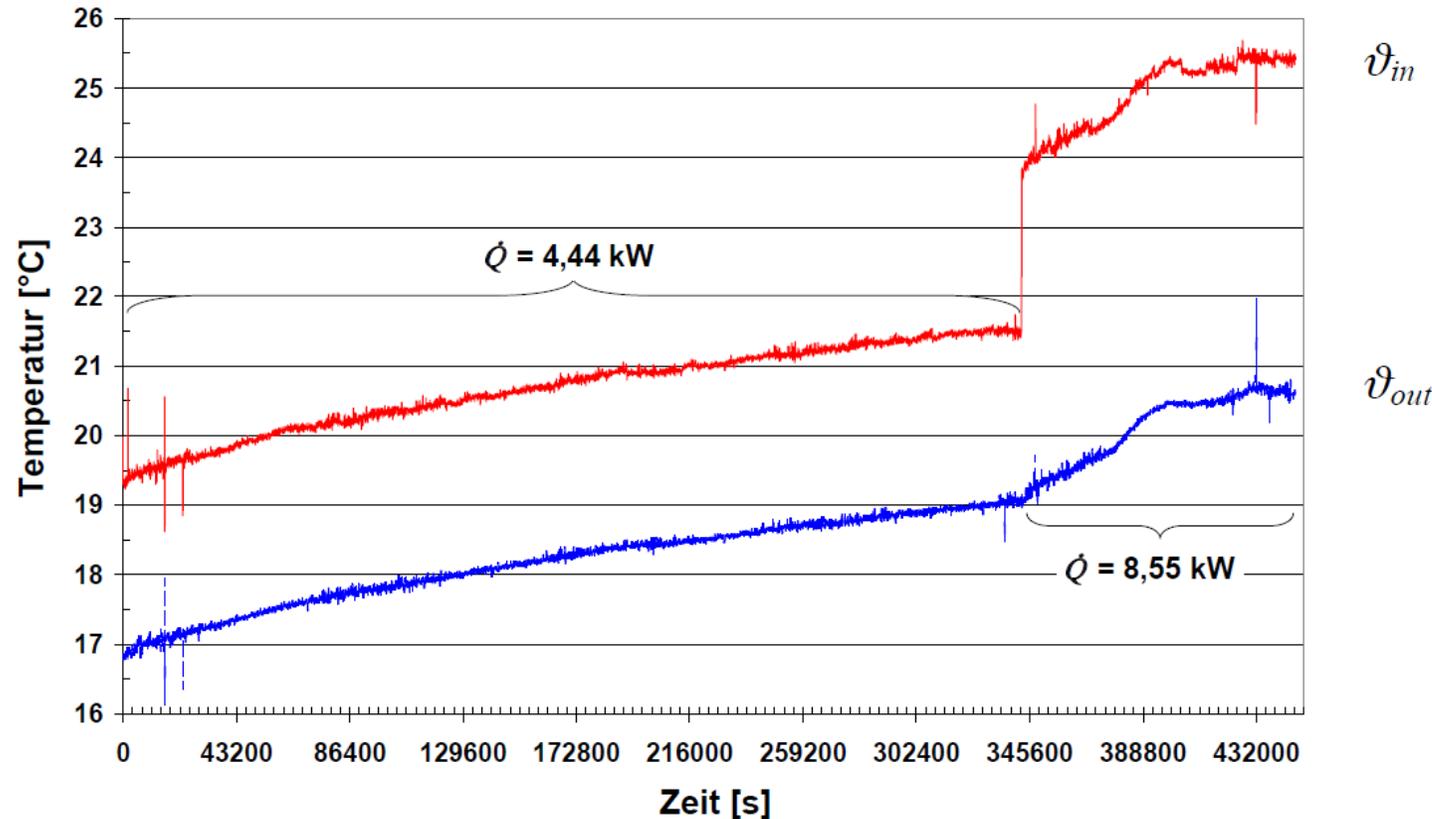
Lineare Regression der gemessenen Fluidmitteltemperatur	$\bar{T}_f(t) = k \cdot \sqrt{t} + m$
Berechnungsansatz für die Fluidmitteltemperatur	$\bar{T}_f(t) = \frac{\dot{q}}{\sqrt{\pi \lambda \rho c_p}} \cdot \sqrt{t} + R_c \cdot \frac{\dot{q}}{2} + T_0$
Ermittlung Wärmeleitfähigkeit des Erdreichs	$\lambda = \frac{\dot{q}^2}{k^2 \cdot \pi \cdot \rho \cdot c_p}$
Ermittlung thermischer Kollektorwiderstand	$R_c = \frac{2(m - T_0)}{\dot{q}}$

Literaturhinweis:

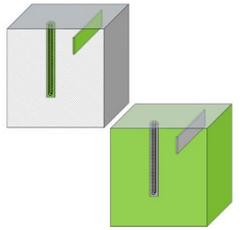
Van de Ven, A. Neth, F., Kainzlsperger, M., Koenigsdorff, R.: Thermal Response Tests an Erdwärmekollektoren, Geothermische Energie, Heft 104, Februar 2023



Versuch der TRT-Auswertung mittels Infinite Plane Source → Problem: thermische Begrenzung durch Perimeterdämmung



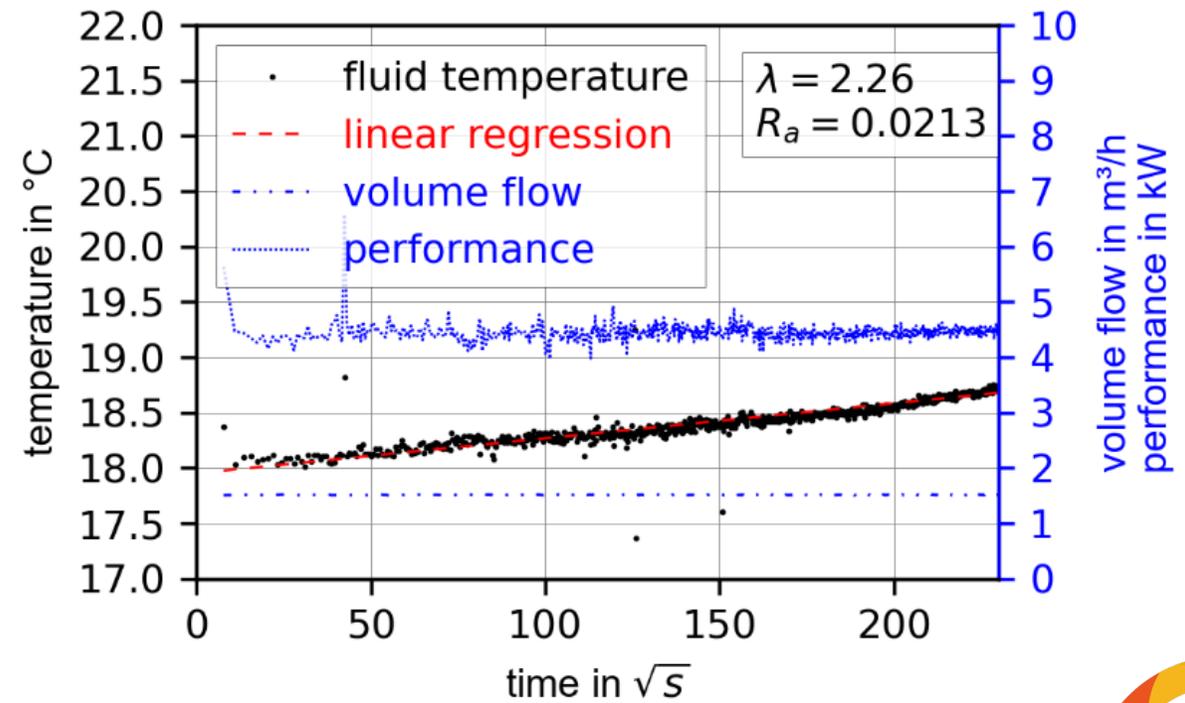
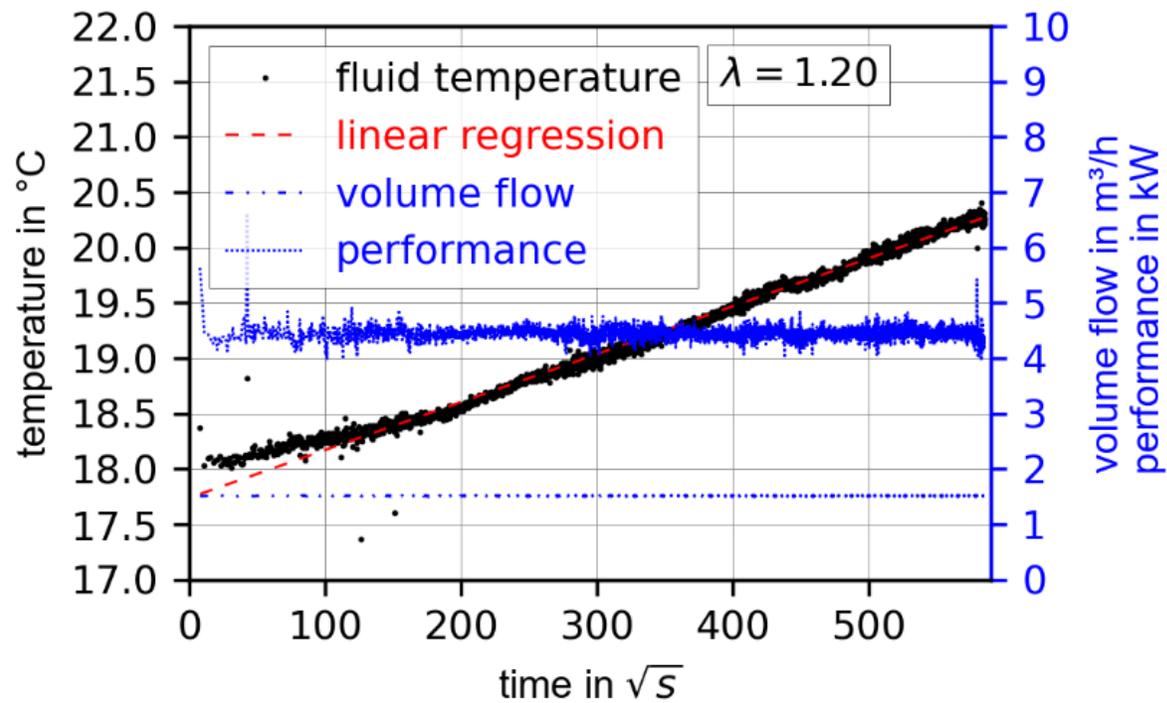
Quelle:  
 Koenigsdorff R., Feuerstein P., Köhler A.,  
 Thermal Response Tests an geothermischen  
 Flächensystemen. Vortrag am Symposium 10  
 Jahre Thermal Response Test in Deutschland,  
 Göttingen, Deutschland, 2009

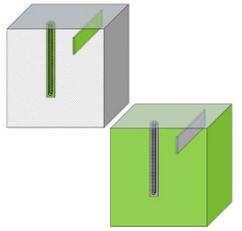


Literaturhinweis:  
 Van de Ven, A. Neth, F., Kainzlsperger, M.,  
 Koenigsdorff, R.: Thermal Response Tests  
 an Erdwärmekollektoren, Geothermische  
 Energie, Heft 104, Februar 2023

## Versuch der TRT-Auswertung mittels Infinite Plane Source

→ Beschränkung auf die ersten 10-15 Stunden des TRT





## **Erdwärmesonden**

- EWS-felder mit verfüllten Bohrlöchern berechenbar, wenn komplett im Grundwasserstrom
- Erweiterung auf geschichteten Untergrund (mit & ohne Konvektion) in Vorbereitung

## **gTAB (Bodenabsorber)**

- Anwendung der konsistenten Modellbildung auf den Bodenabsorber prinzipiell möglich
- Analytisches Widerstandsmodell steht, muss aber noch verifiziert werden
- Umpumpversuche zeigen verhältnismäßig hohe ungestörte Temperatur am Absorber → gute Voraussetzung für effizienten Betrieb
- Die Auswertung des TRT-Ergebnisses muss noch an die spezielle Einbausituation des Absorbers angepasst werden

# Vielen Dank für die Aufmerksamkeit!

Gefördert durch:



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



## 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

Institut für Angewandte Geowissenschaften (AGW)

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



Qualitätssteigerung  
oberflächennaher Geothermiesysteme

[www.qewsplus.de](http://www.qewsplus.de)

Adinda Van de Ven  
Hochschule Biberach  
Institut für Gebäude- und Energiesysteme  
Karlstraße 11  
88400 Biberach an der Riß  
Tel.: +49 7351 582 263  
vanden@hochschule-bc.de