

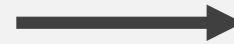
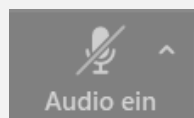
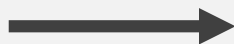
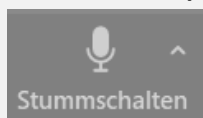
Herzlich Willkommen zur Online-Workshopreihe „Nachhaltige Wärmeversorgung mittels Wärmepumpe: Anwendung – Qualitätssicherung - Quartiersversorgung“

heutiges Forschungsprojekt:
„QEWSplus –

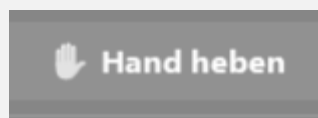
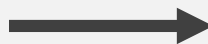
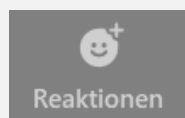


Qualitätssteigerung oberflächennaher Geothermiesysteme“

- 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

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.

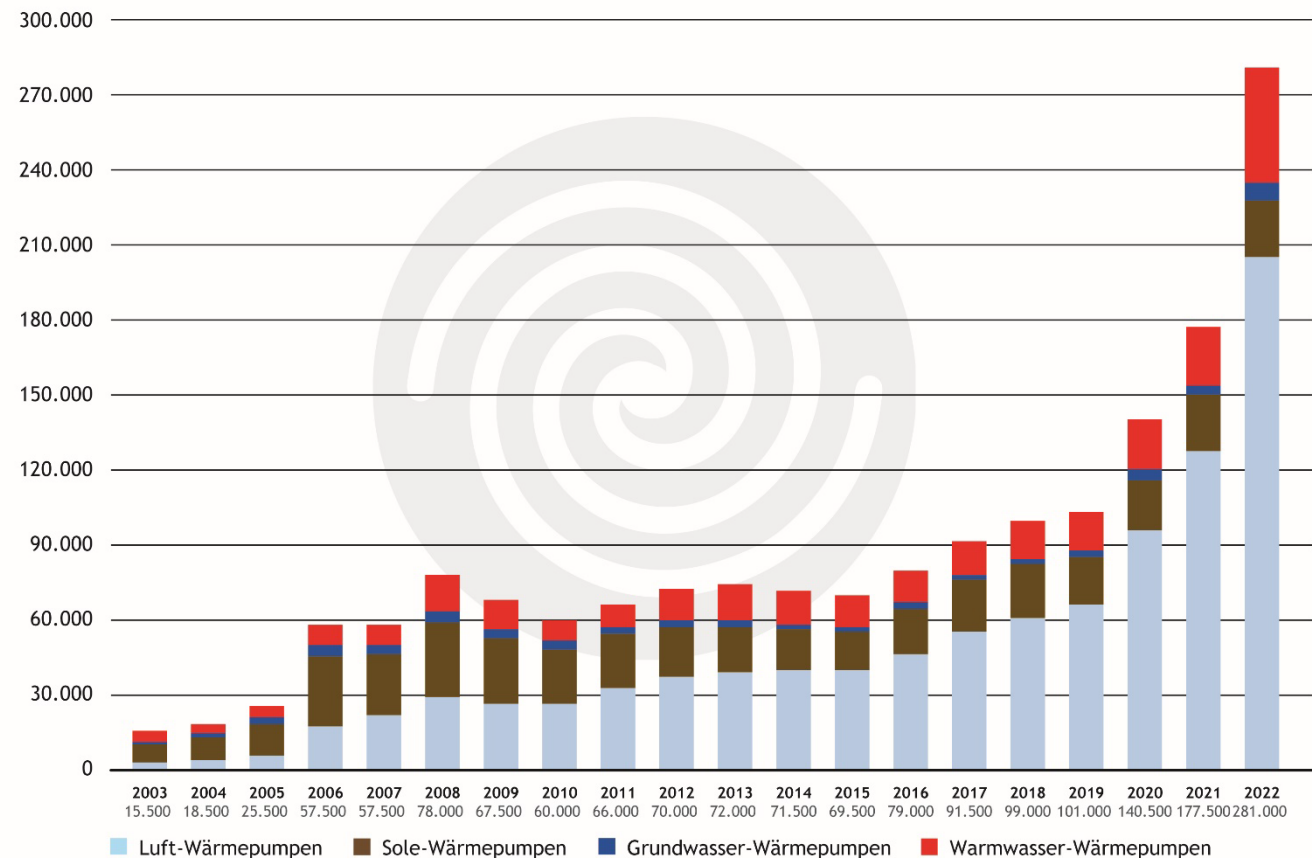
Marktentwicklung Wärmepumpen & ONG

↑↑ **Wärmepumpen boomen**

	2021	2022
Heizungs-WP:	+28 %	+53 %
Geothermie-WP:	+10 %	+14 %

Ziel: + 500.000 WP/a

Absatzentwicklung Wärmepumpen in Deutschland 2003-2022
Nach Wärmepumpentypen



Quelle: BWP/BDH-Absatzstatistik

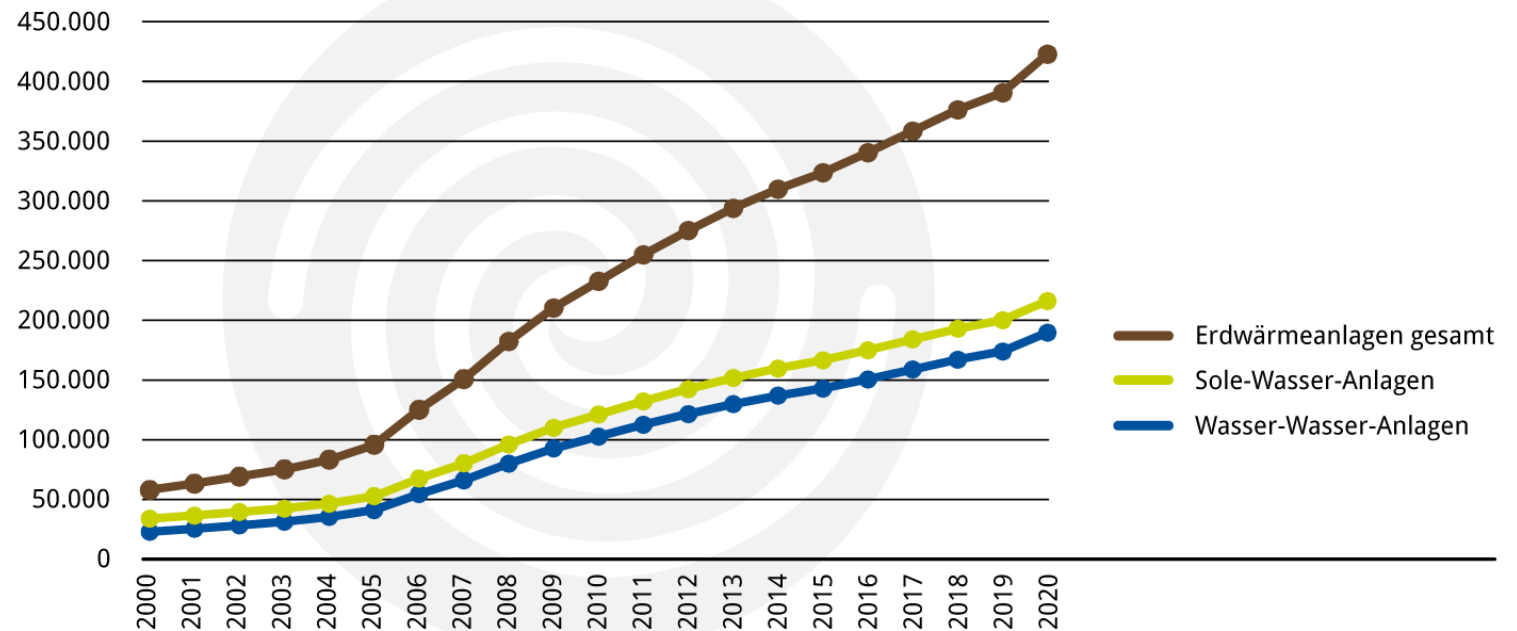
© Hochschule Biberach



Bestandsentwicklung Wärmepumpen & ONG

Gebäudebestand in D:
ca. 21 Mio. Gebäude

Oberflächennahe Geothermieprojekte
in Deutschland (Anzahl Wärmepumpen 2000–2020)



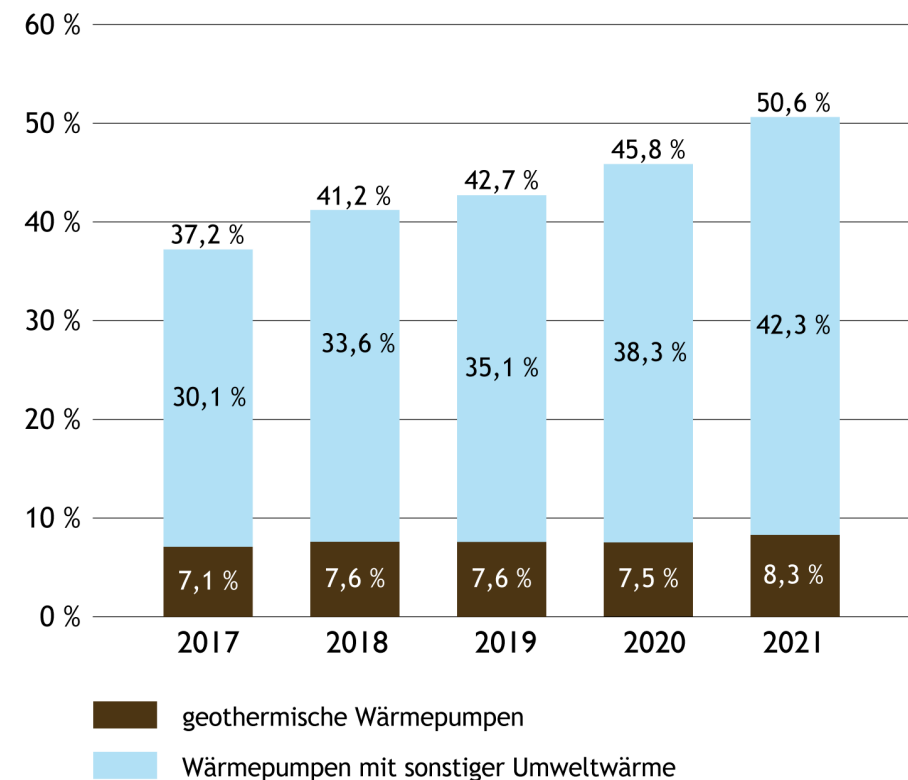
Quelle: BWP-Branchenstudie 2021

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

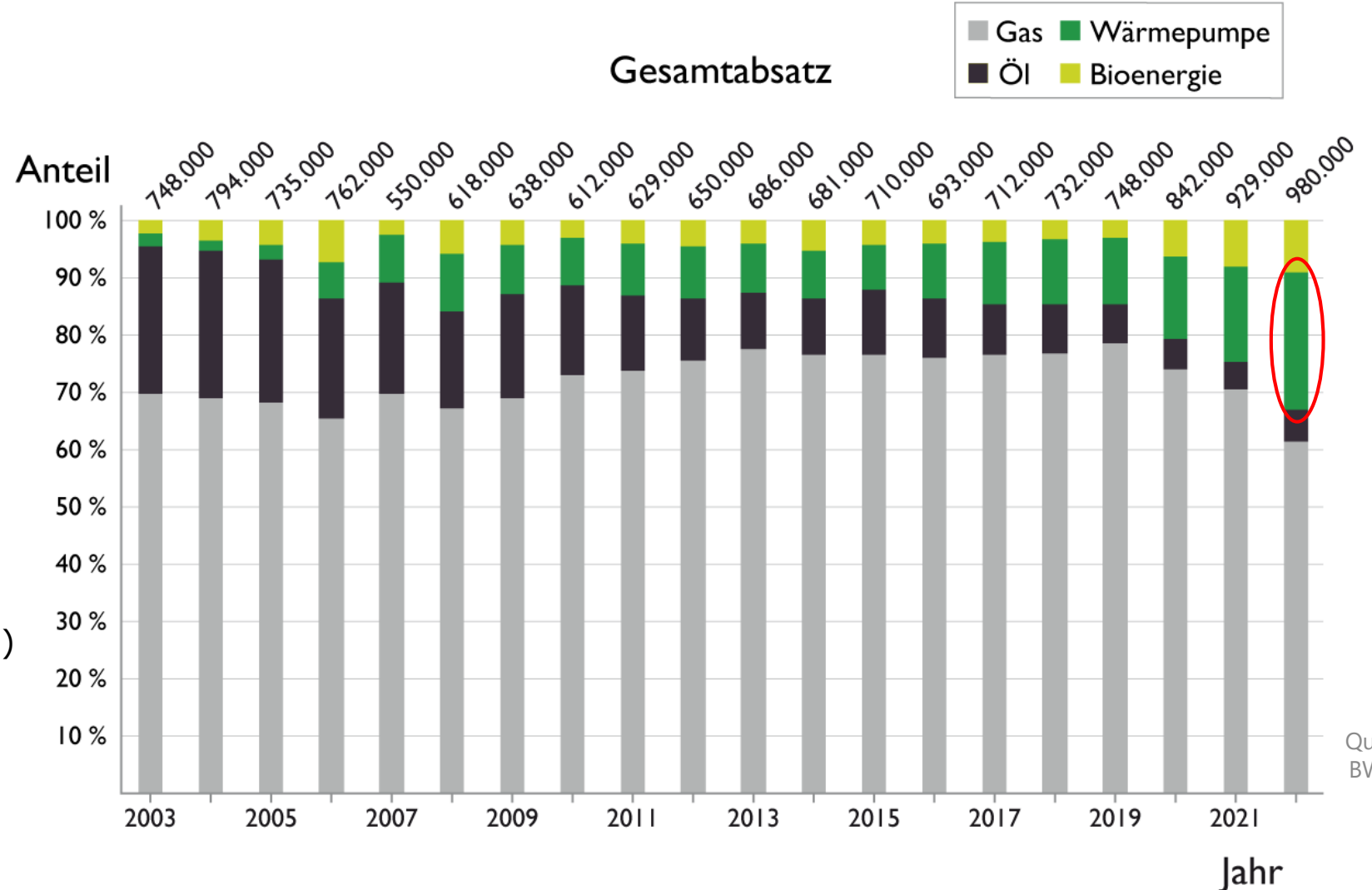
Wärmepumpen im Vergleich zu anderen Heizungsarten

Marktentwicklung Wärmepumpen

Gesamtmarkt
(Bestand + Neubau):

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

Ziel: Vervielfachung!



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

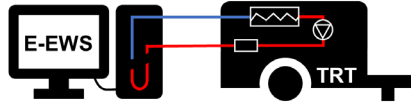
- Steigerung der Verbreitung von oberflächennahen Geothermiesystemen
- Steigerung der Bekanntheit, Attraktivität und Akzeptanz der oberflächennahen Geothermie

Ziele

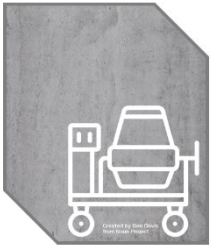
- Qualitätssteigerung durch eine gesamtheitliche Betrachtung von der Planungsphase, über die Ausführung bis hin zur Inbetriebnahme
- Vermeiden von Rechtstreitigkeiten und Schadensfällen
- Ökonomische und ökologische Optimierung von oberflächennahen Geothermiesystemen



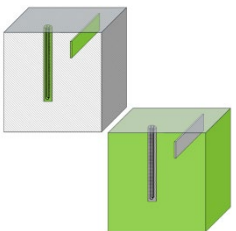
TP 1: Erweiterte thermische Testmethoden



TP 2: Weiterentwicklung des TRT-Prüfgerätes



TP 3: Qualitätsanforderungen an Erdwärmesonden-Verfüllbaustoffe



TP 4: Multifunktionale Modellierung von oberflächennahen Geothermiesystemen

Federführung

HBC.
HOCHSCHULE
BIBERACH
UNIVERSITY
OF APPLIED SCIENCES

 **Fraunhofer**
ISE

ZAE BAYERN

solites

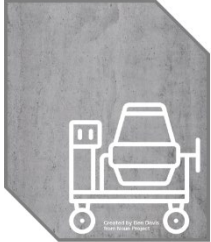
HBC.
HOCHSCHULE
BIBERACH
UNIVERSITY
OF APPLIED SCIENCES



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



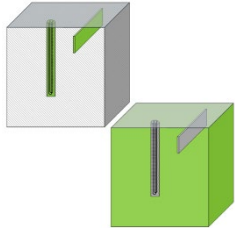
TP 3: Qualitätsanforderungen an Erdwärmesonden- Verfüllbaustoffe

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

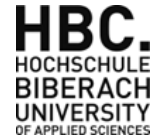
Vielen Dank für die Aufmerksamkeit!

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 | 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

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

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
 λ - 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)

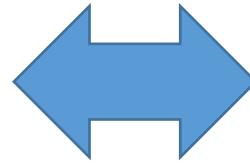
Flexible Betriebsmöglichkeiten mit drei Wärmepumpen und vier Sonden

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 Geothermieranlage

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

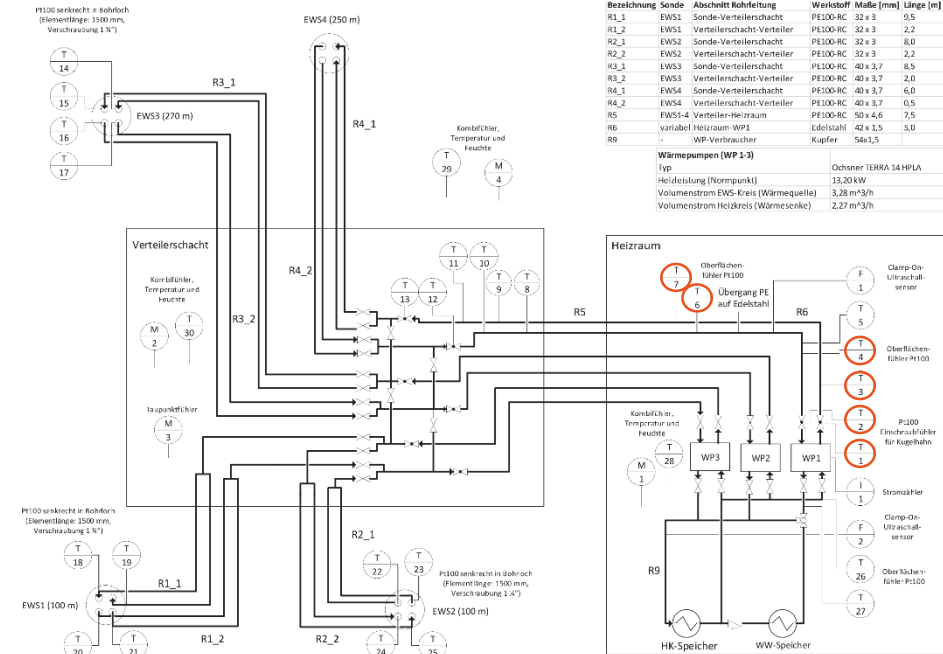
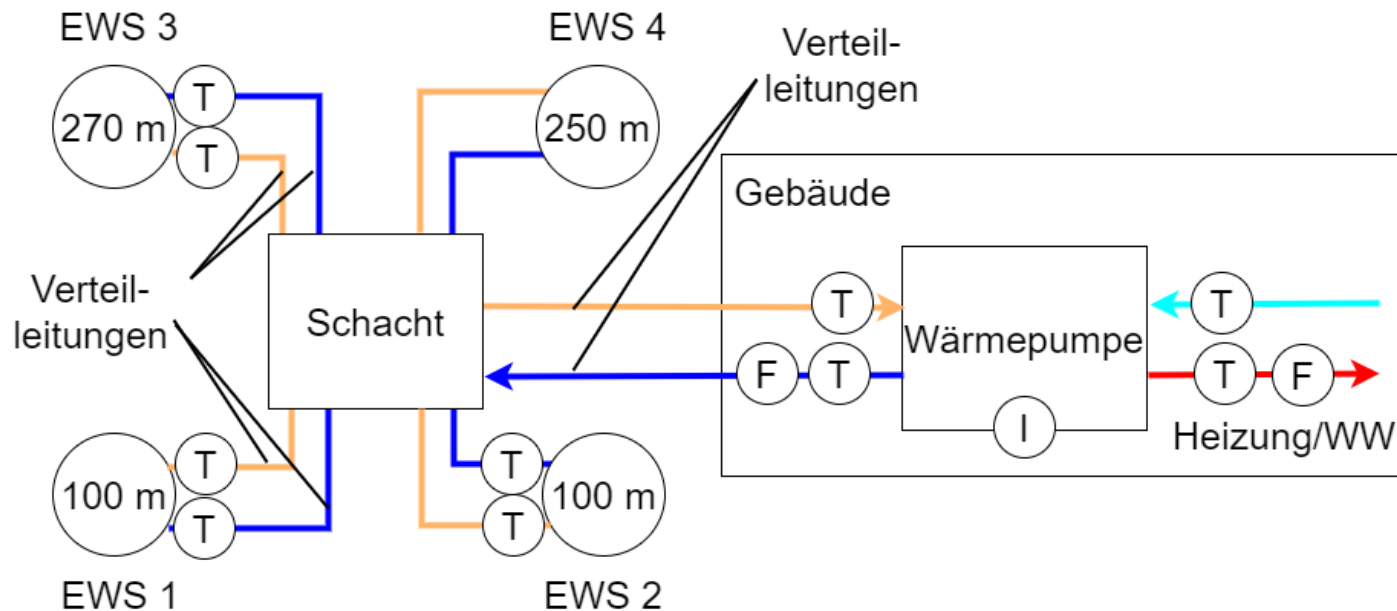
- Qualitätskontrolle und Funktionsnachweis bei der Abnahme
- Qualitätsnachweis der gesamten Geothermieranlage für den Anlagenersteller
und den Auftraggeber bzw. späteren Anlagenbetreiber



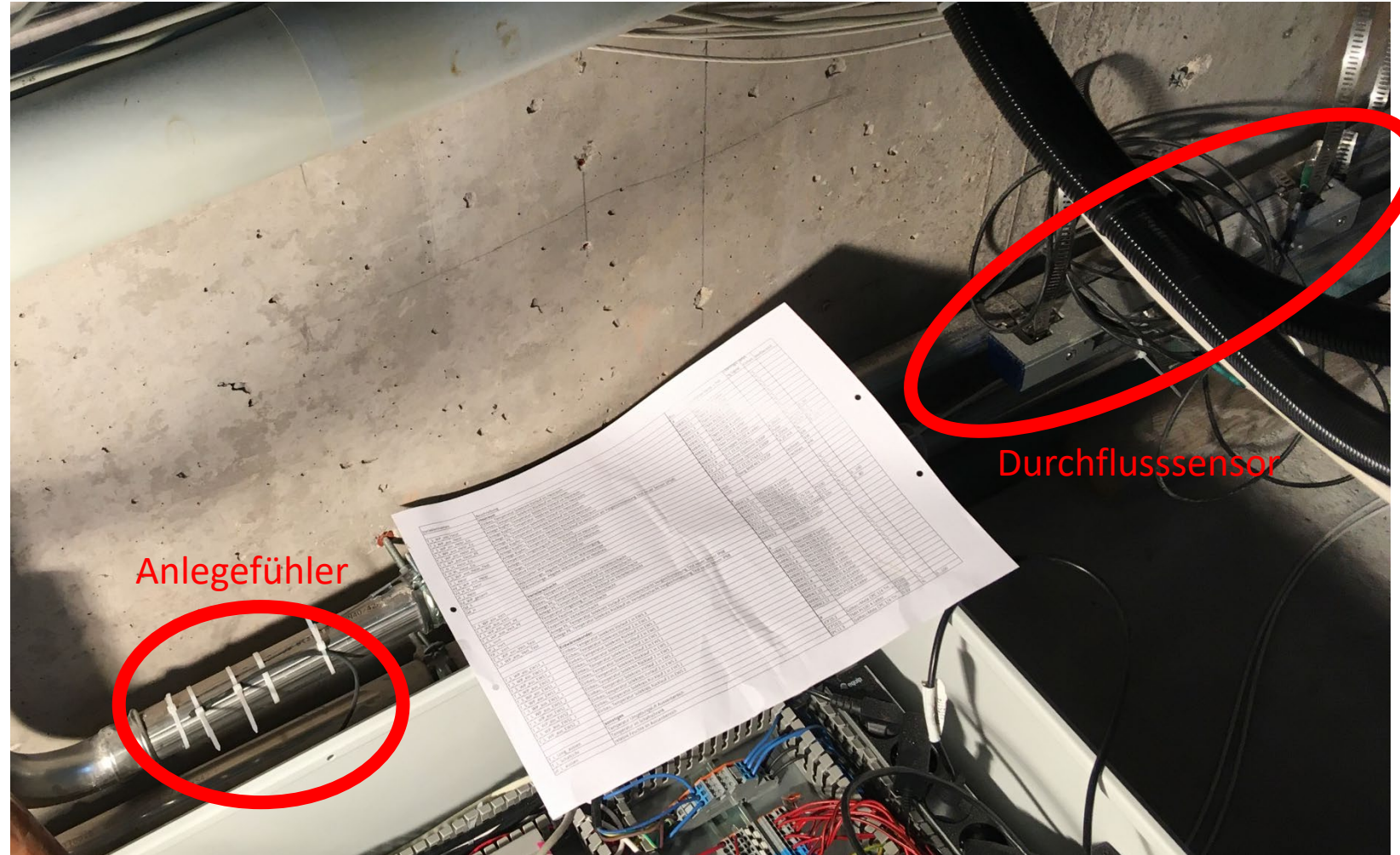


Aufbau der untersuchten Anlage in Neuweiler:

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







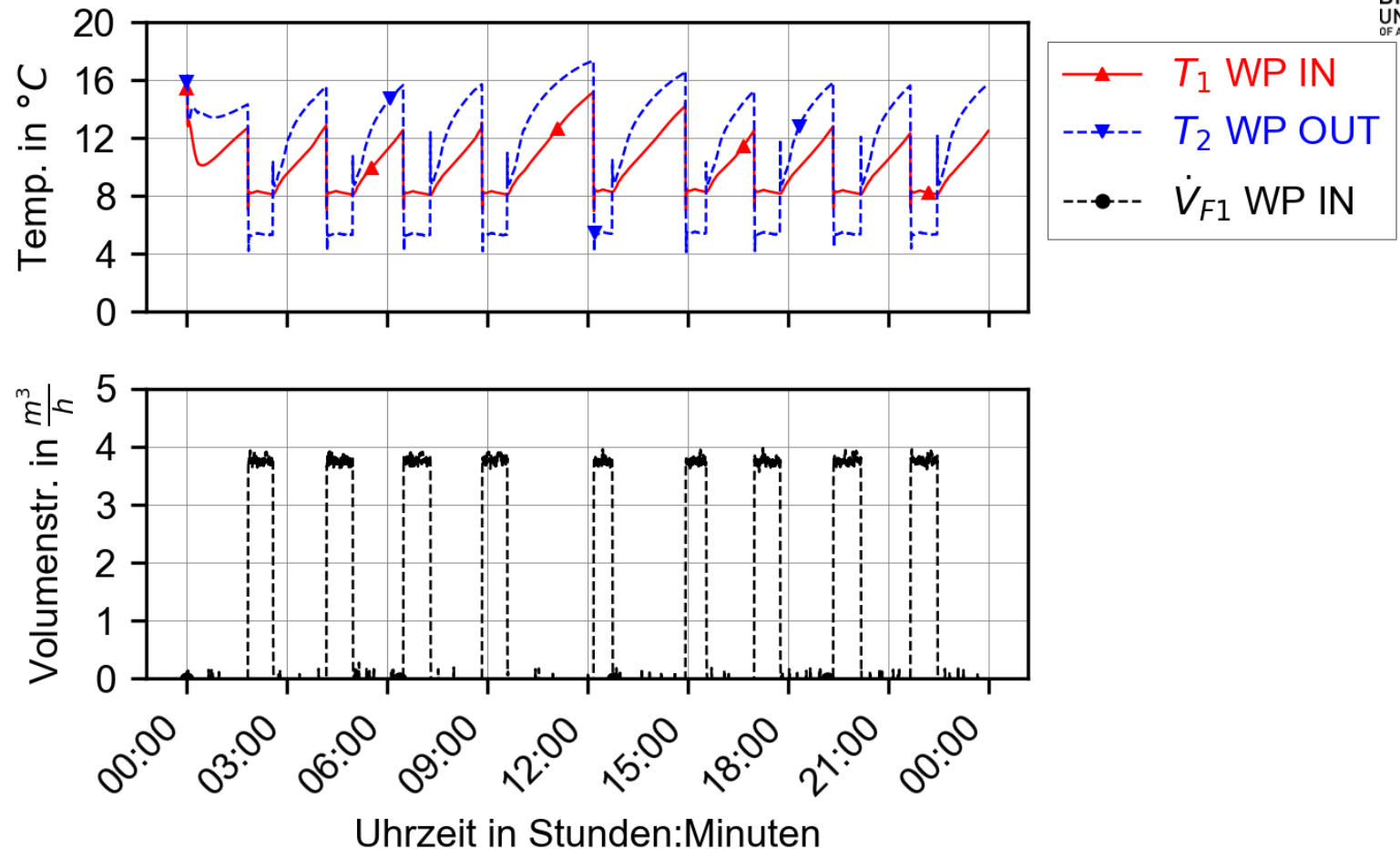
Anlegefühler

Durchflusssensor



Betrachtung der Messdaten am 02.01.2023:

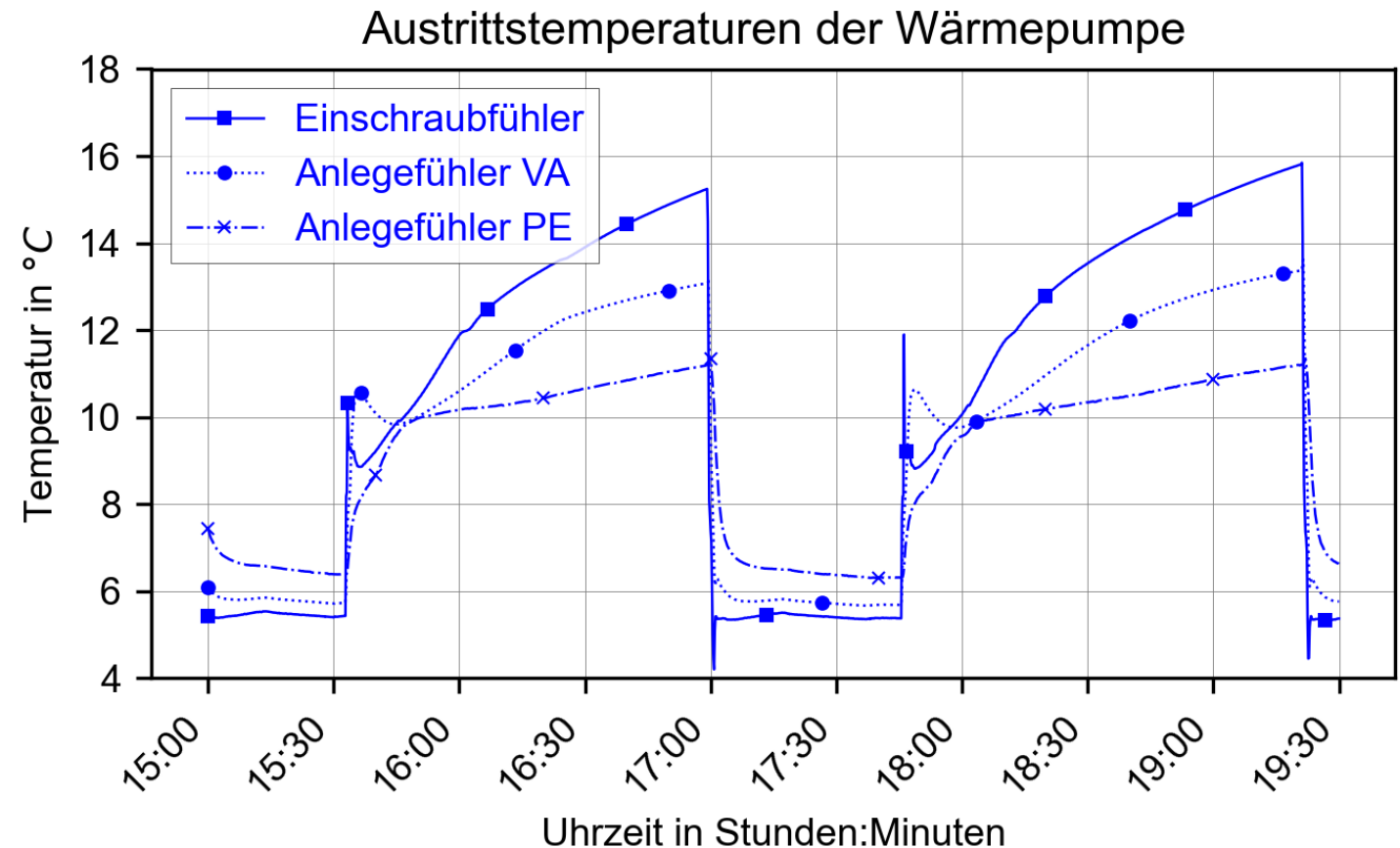
- WP startet mehrmals am Tag
- Volumenstrom im Betrieb der WP bei ca. 3,7 m³/h
- Spreizung liegt bei ca. 2,9 K
→ ca. 12.6 kW geoth. Leistung
- Während die WP ausgeschaltet ist, gleicht sich die Fühlertemperatur wieder der Raumtemperatur an





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

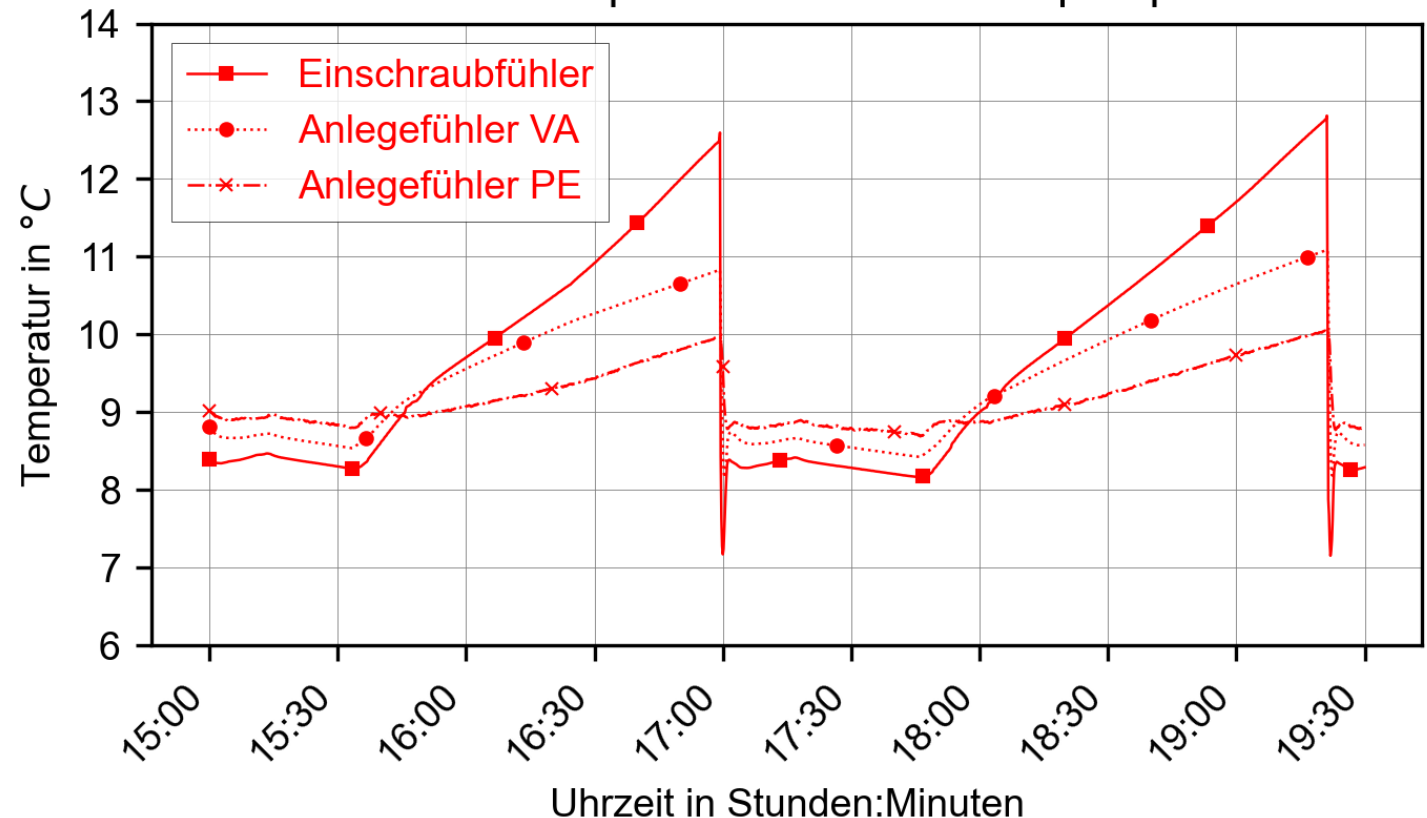




Betrachtung der Messdaten am
02.01.2023 von 15:30 bis
19:30 Uhr:

- 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



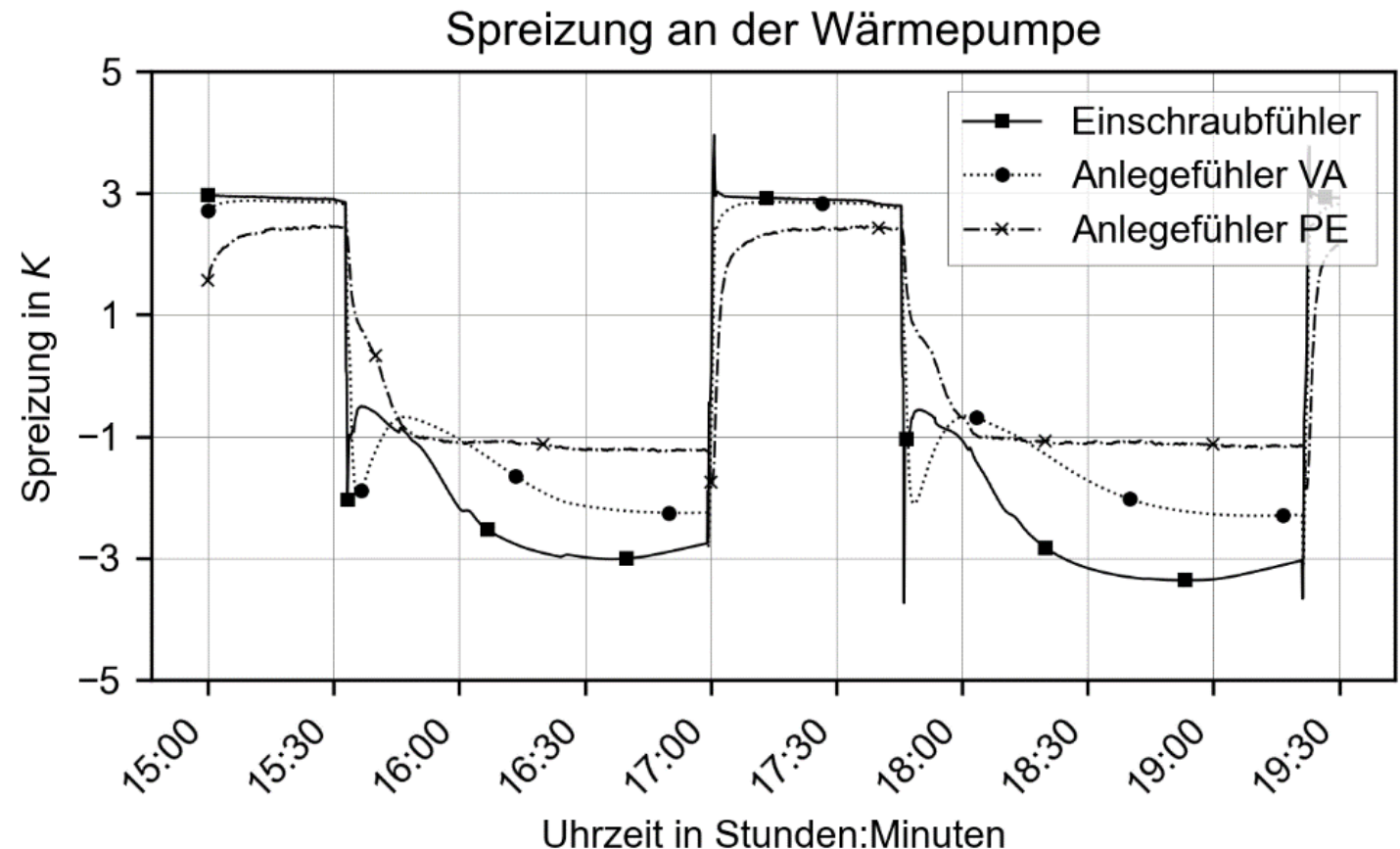


Betrachtung der Messdaten am
02.01.2023 von 15:30 bis
19:30 Uhr:

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

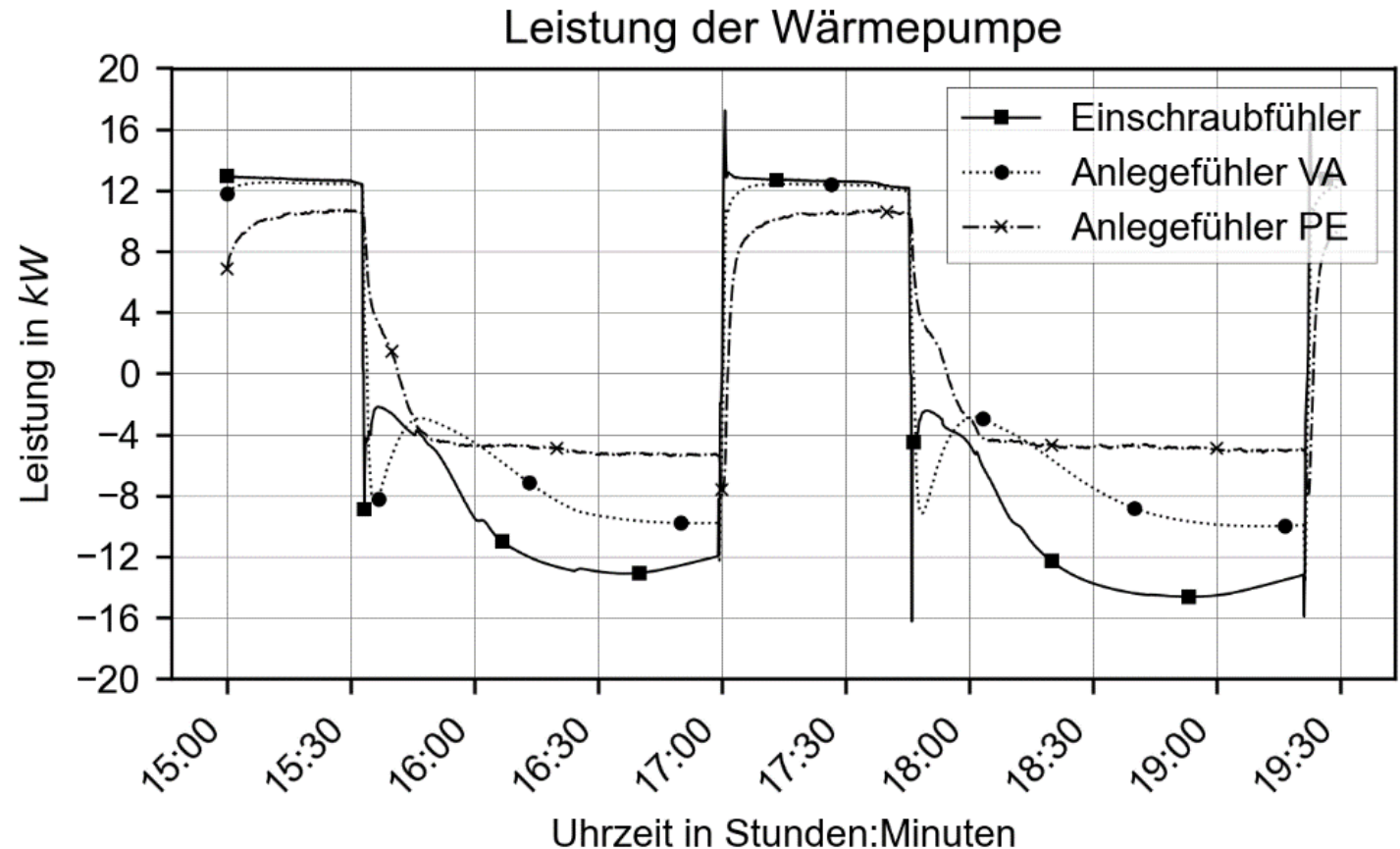




Betrachtung der Messdaten am
02.01.2023 von 15:30 bis
19:30 Uhr:

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.



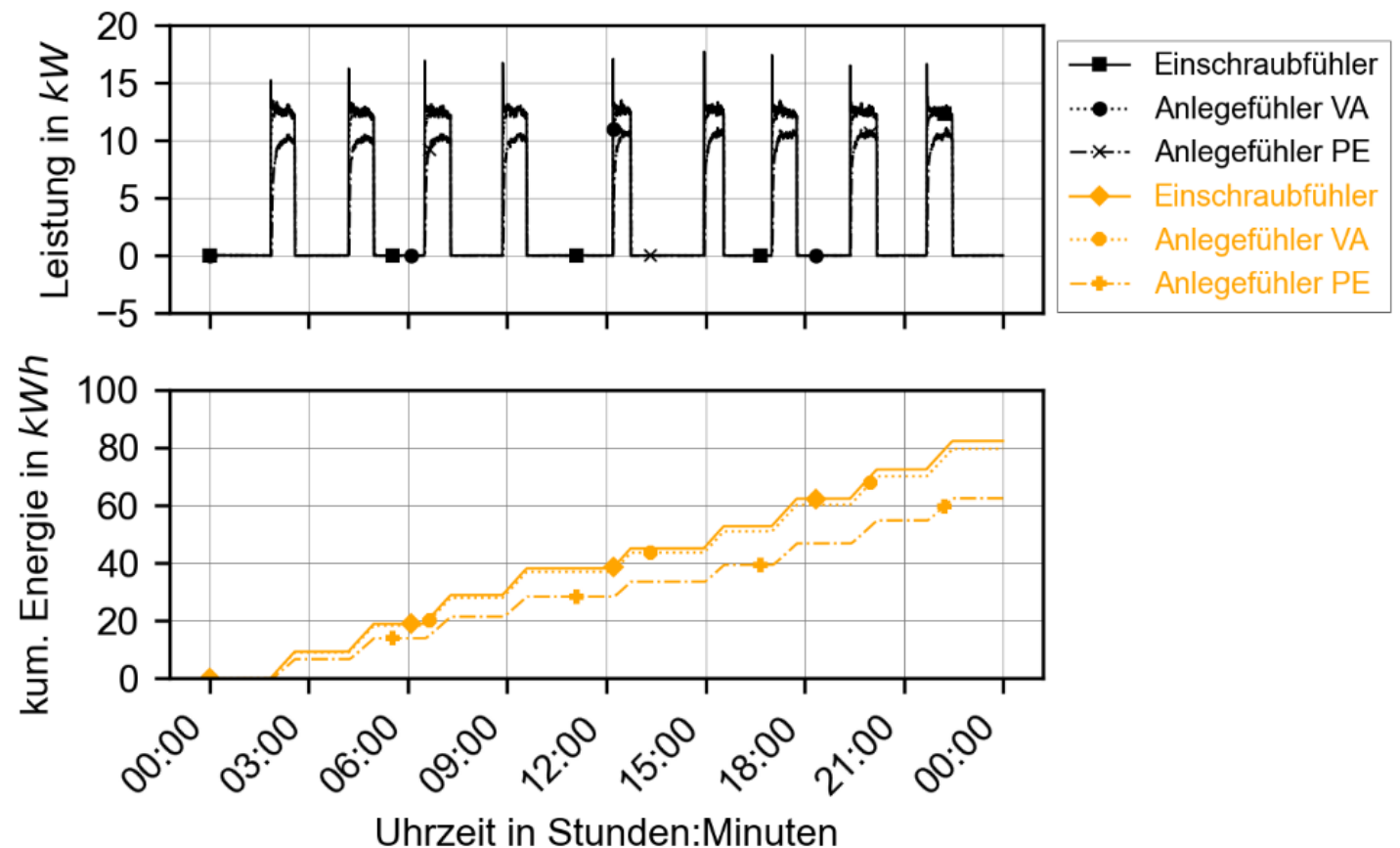
Vergleich kumulierte Energie I



Betrachtung der geoth.
Entzugsleistungen und
kumulierten Energiemengen am
02.01.2023:

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

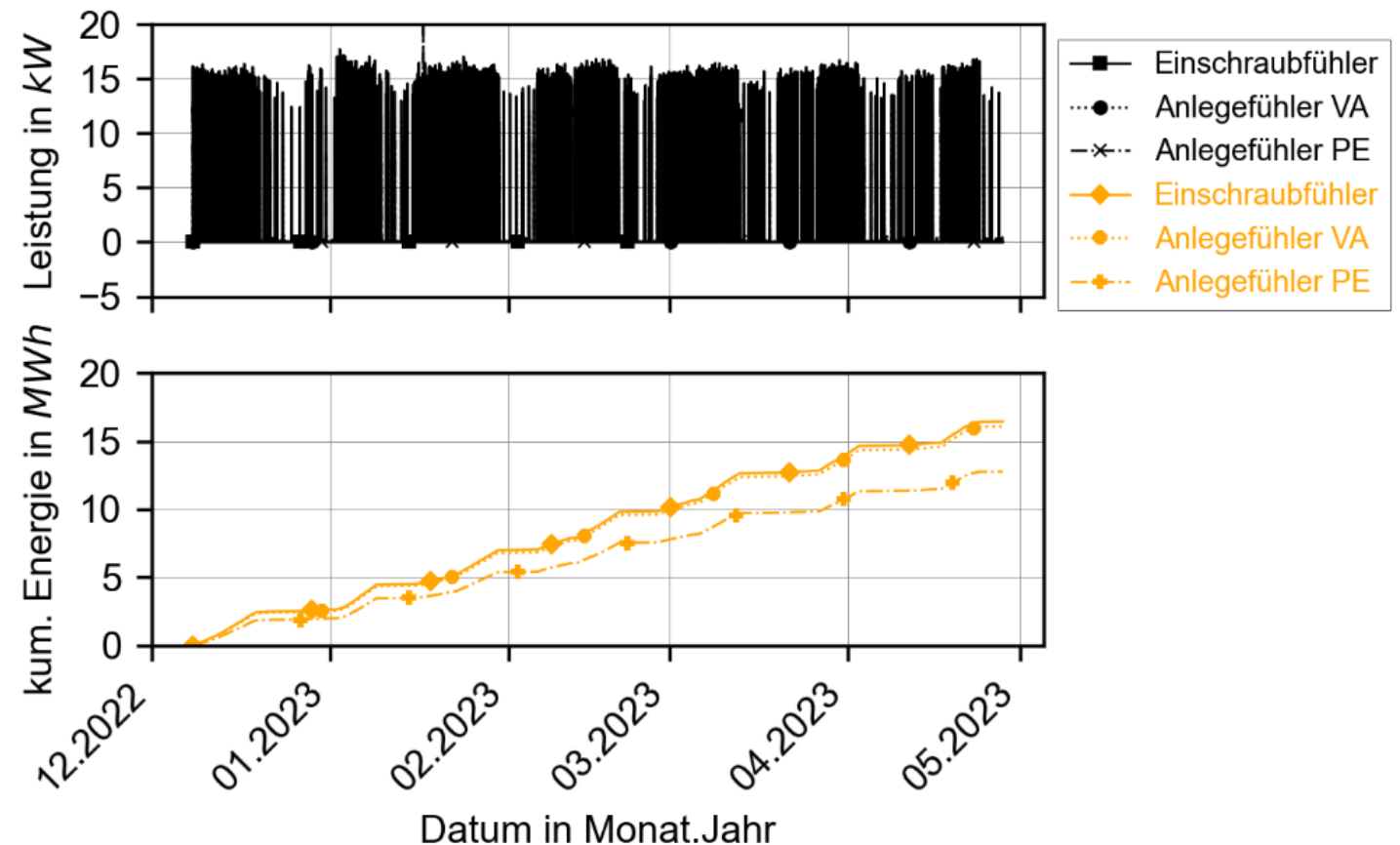
- Einschraubfühler 82,4 kWh
- Anlegefühler VA 79,6 kWh
→ -3,4%
- Anlegefühler PE 62,4 kWh
→ -24,3%





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
 λ - 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⁻¹ K⁻¹]
Volumetrische Wärmekapazität ρc_p [MJ m⁻³ K⁻¹]

- Maß für die Speicherung von Wärme

Wärmeleitfähigkeit λ [W m⁻¹K⁻¹]

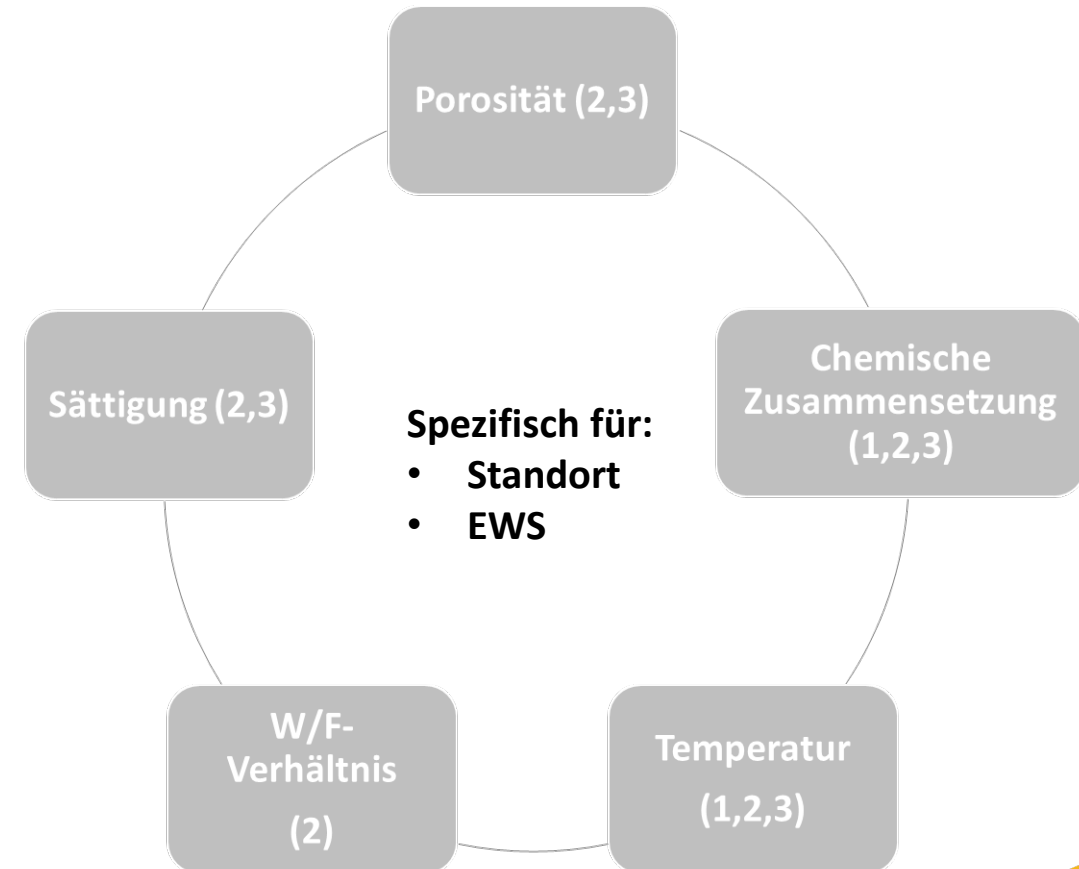
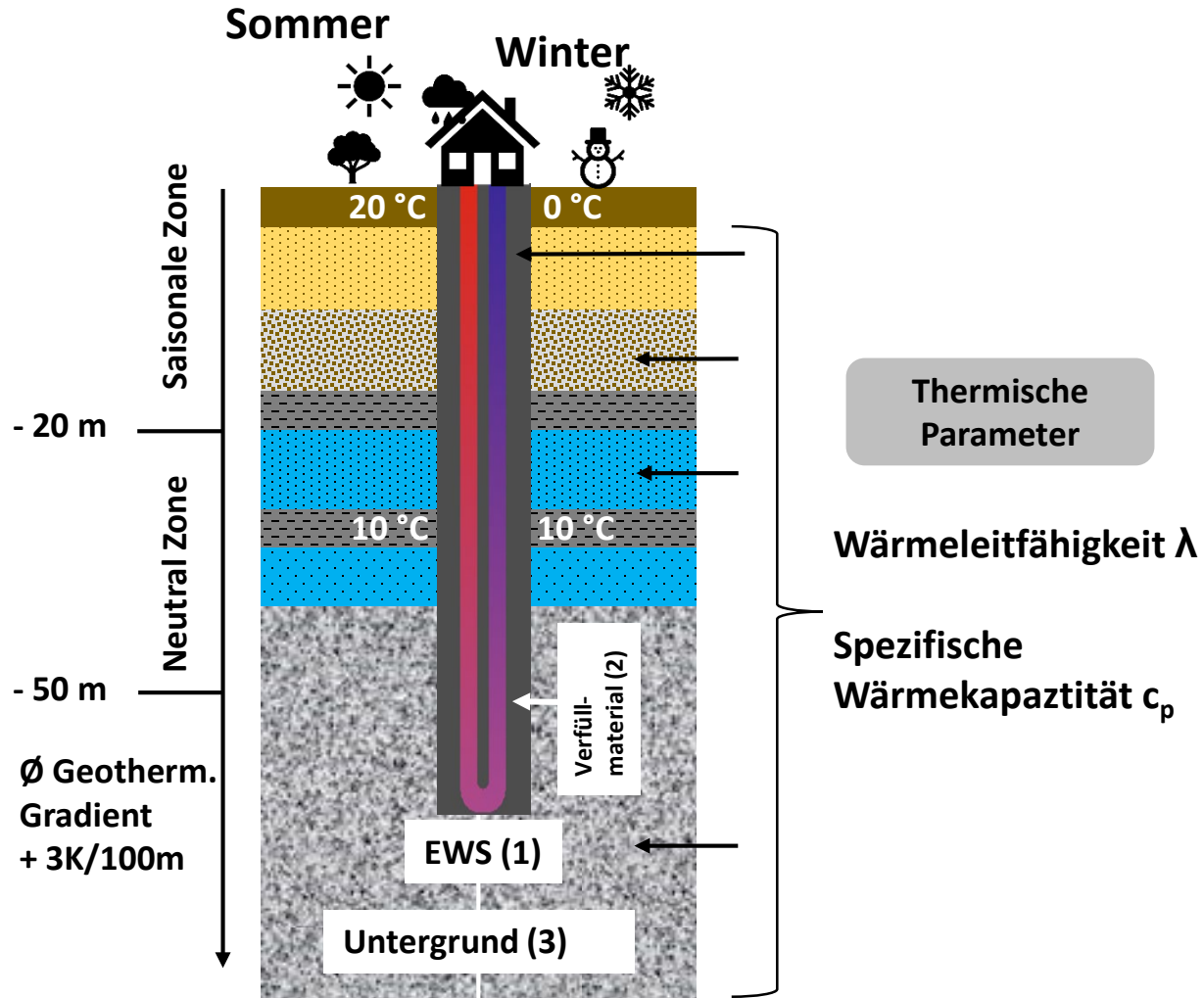
- Maß für die Ausbreitung eines Wärmestroms innerhalb eines Materials

- 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



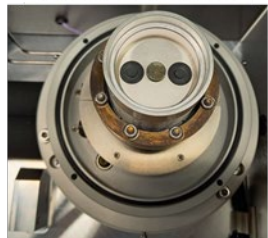


Spezifische Wärmekapazität c_p [kJ kg⁻¹ K⁻¹]

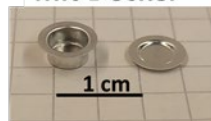
Differenzstrom Kalorimeter



Probenkammer



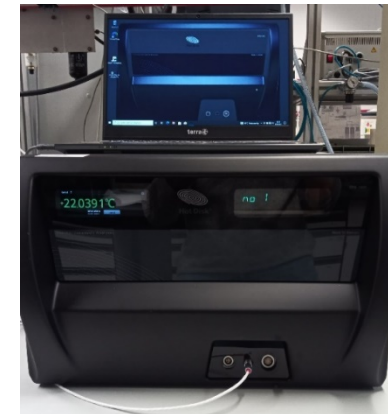
Probentiegel
mit Deckel



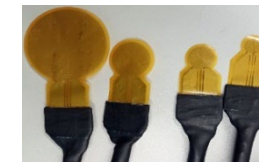
- DIN EN ISO 11357-4
- Saphir-Vergleichsmethode
- Temperaturabhängige c_p -Daten (-10 °C bis 40 °C)

Wärmeleitfähigkeit λ [W m⁻¹ K⁻¹]

Hot Disk TPS1500



Isomet 2104



Messsonden



Klimakammer

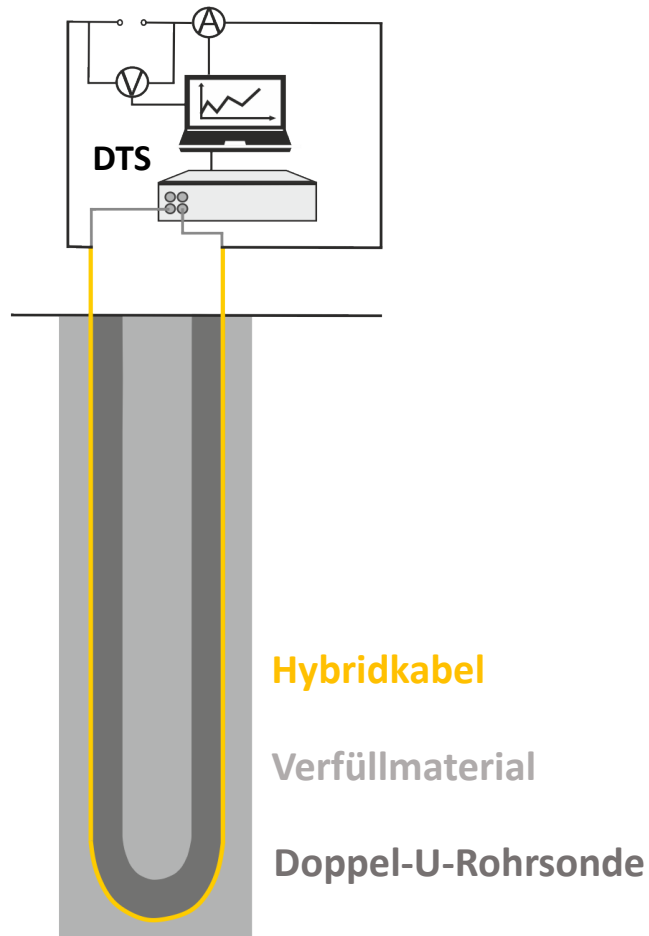


Messsonde

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



ETRT Aufbau

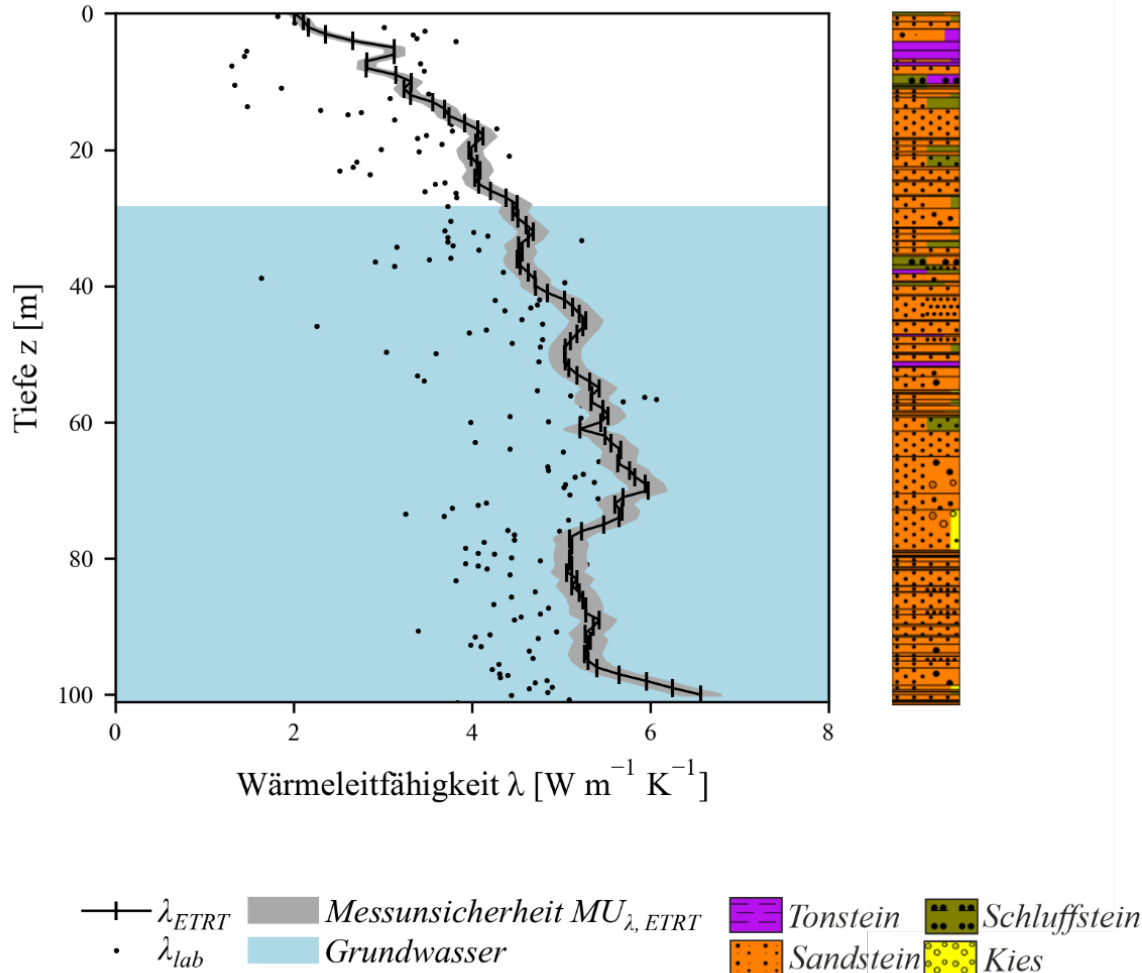


- Bestimmung der effektiven Wärmeleitfähigkeit in-situ
- Mit Glasfaserkabel tiefenorientiert

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





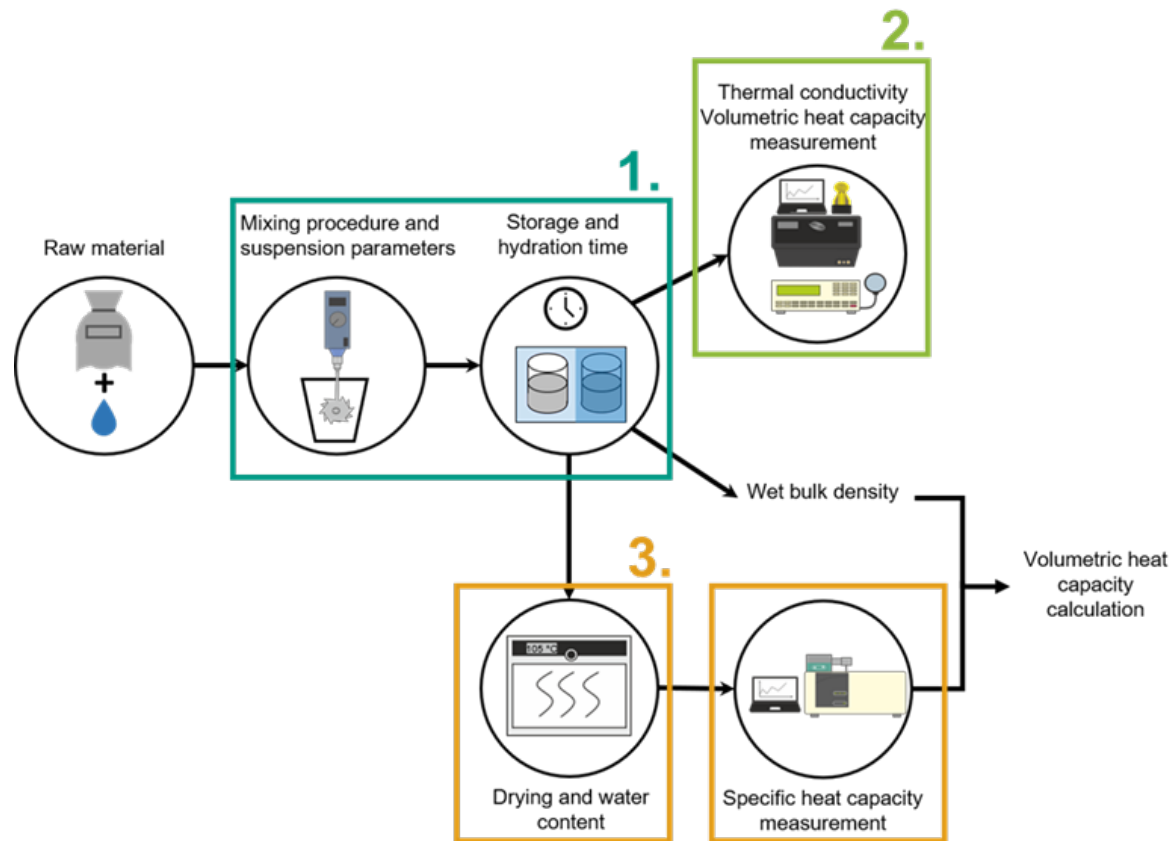
Wärmeleitfähigkeit [$\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$]

- 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 [$\text{kJ Kg}^{-1} \text{K}^{-1}$]
- c_p (-10 bis 40 °C): 0,68 - 0,87 [$\text{kJ Kg}^{-1} \text{K}^{-1}$]



Ermittlung der Einflussparameter für c_p und λ 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)



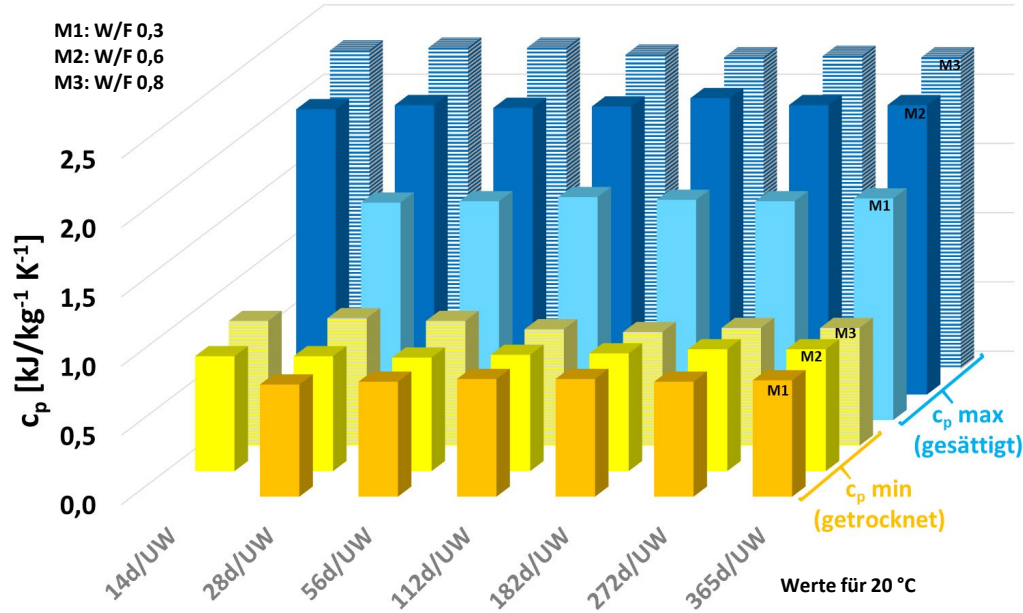
Standardmethode

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



Vergleichbarkeit von Ergebnissen => Erstellen einer Datenbank

Labor – Ergebnisbeispiel (Spezifische Wärmekapazität c_p von Verfüllbaustoffen)

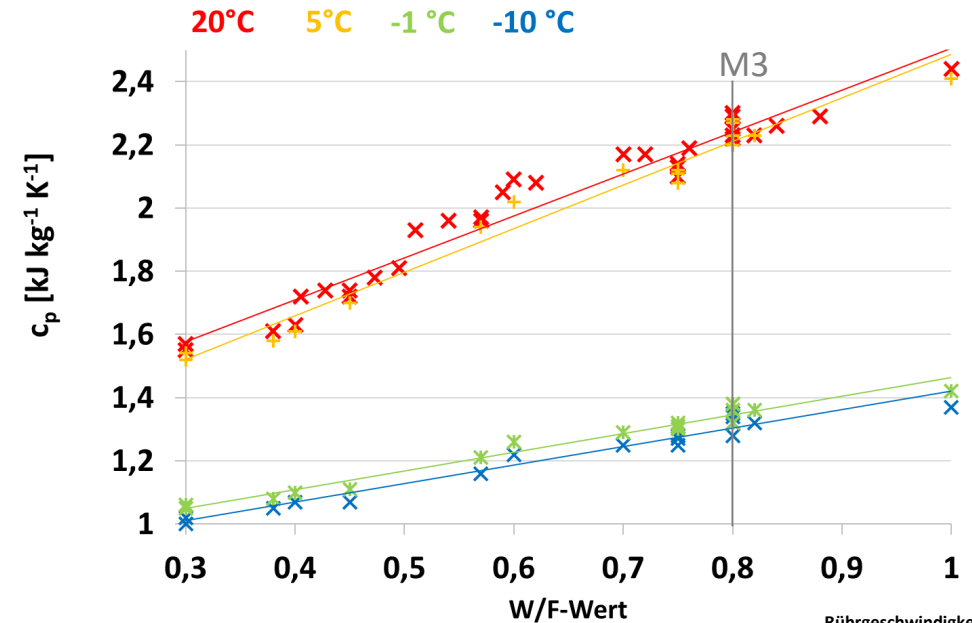


Geringer Einfluss:

- Hydratationszeit (> 14d)
- Lagerung (Sättigung \approx 100%)

Einfluss auf c_p -Wert:

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



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

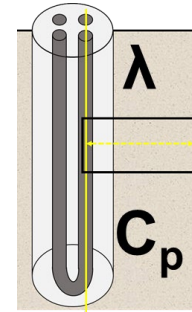
Einfluss auf c_p -Wert:

- Temperatur
- W/F-Wert (Wassergehalt)

c_p Wasser (20 °C): 4,18 [kJ/kg $^{\circ}$ K $^{-1}$]
 c_p Eis (-1 °C): 2,10 [kJ/kg $^{\circ}$ K $^{-1}$]



Thermische Parameter für das System Erdwärmesonde / Untergrund



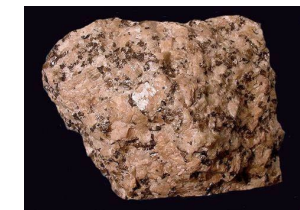
- Erstellen einer Datenbank für am deutschen Markt erhältliche Verfüllbaustoffe

- 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
ISE

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

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:



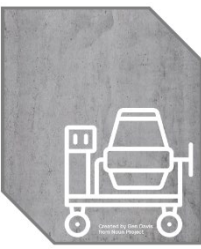
ZAE BAYERN

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:

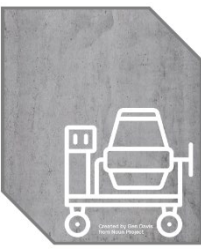
Realitätsnahe
Kombination
von Unter-
suchungs-
aspekten von
Filtrations-
effekten

TP 3.4:

Analyse der
Verfüll-
qualität von
EWS in
einem realen
Untergrund

TP 3.5:

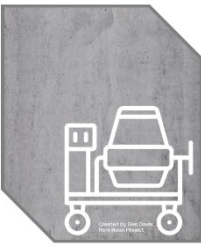
Neues
Verfüllmess-
konzept für
EWS



TP 3.1:

Filtrations-
verhalten
von EWS-
Verfüll-
baustoffen

- Weiterentwicklung des Filtrationsversuchstand (QEWSSII)
- 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



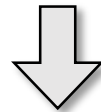
Messung des Druckverlaufs in der Verfüllung realer EWS-Bohrungen

- Sandstein
- Tonstein
- Granit

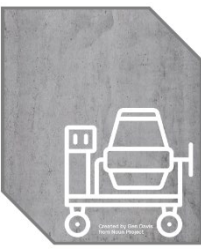
Nachbildung eines Bohrlochs im Versuchsstand

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

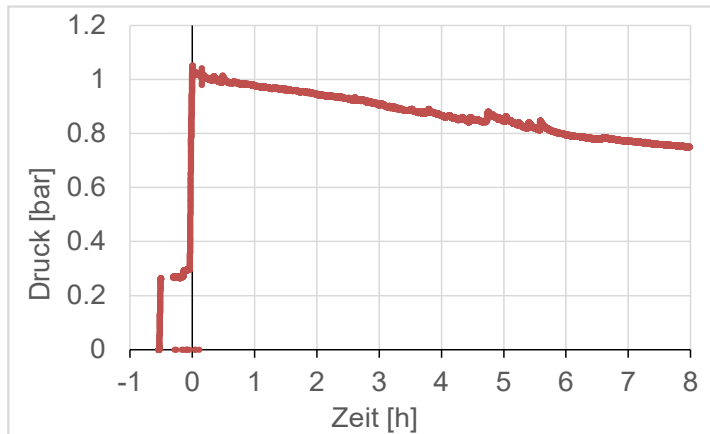
Vergleich und Erklärung der gemessenen Druckkurven



Rückschluss auf die Vorgänge im Untergrund

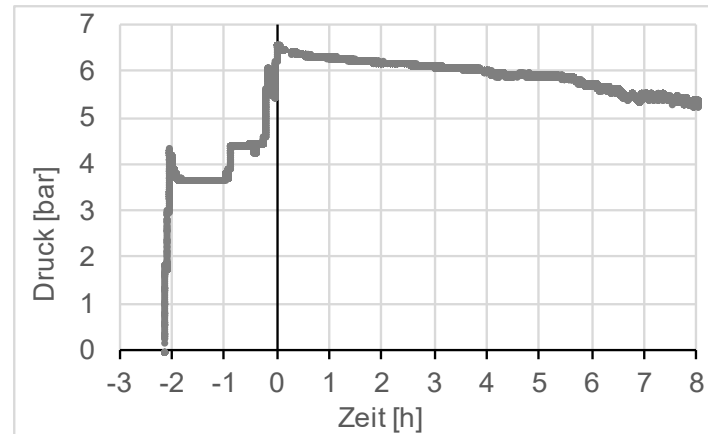


Verfüllung im PVC-Rohr



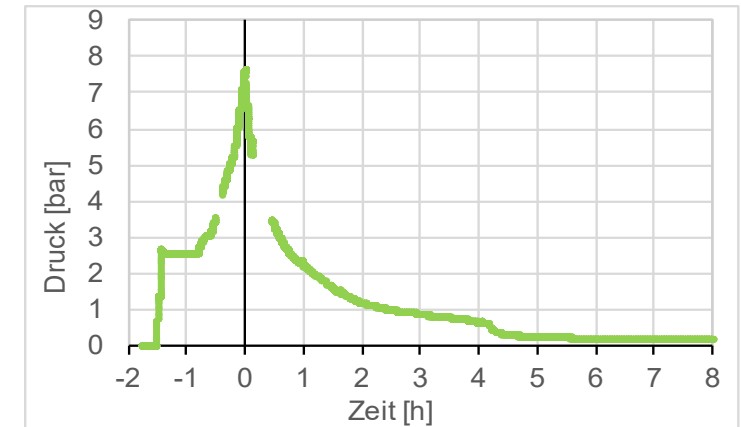
Sensortiefe: 5,50 m uGOK
Suspensionsdichte: 1,94 g/cm³

im Tonstein / Mergel



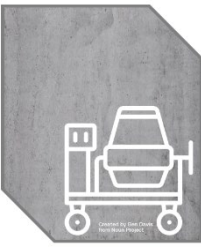
Sensortiefe: 47 m uGOK
Suspensionsdichte: 1,57 g/cm³

im Sandstein



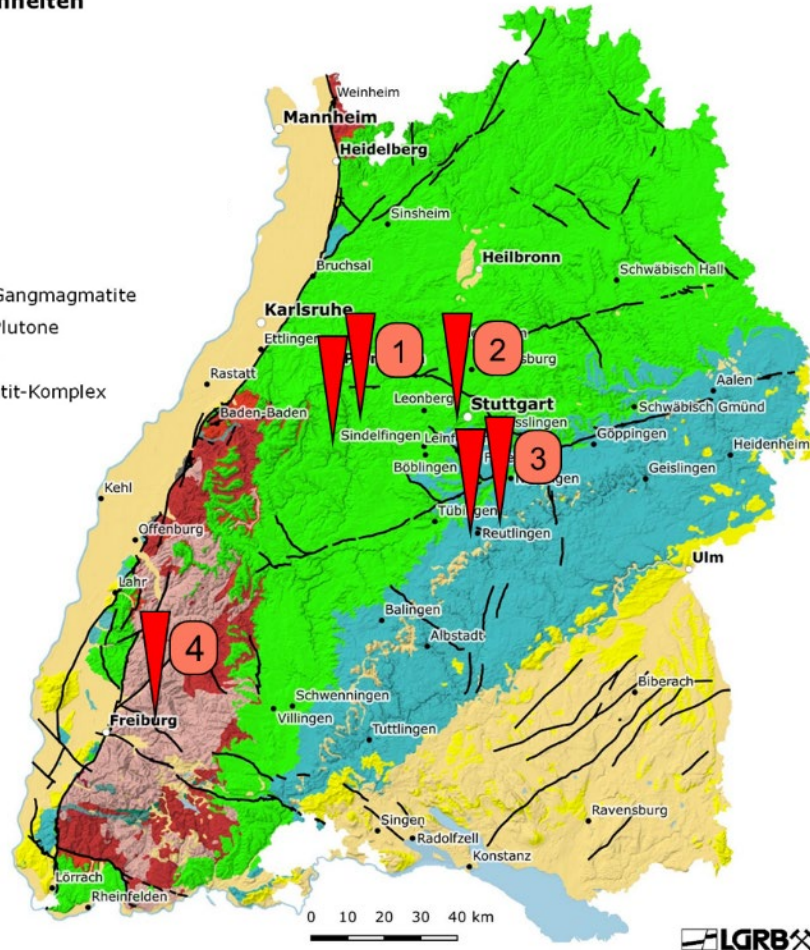
Sensortiefe: 44 m uGOK
Suspensionsdichte: 1,94 g/cm³

Relativdruckmessungen: 0 bar bedeutet Atmosphärendruck



Geologische Einheiten

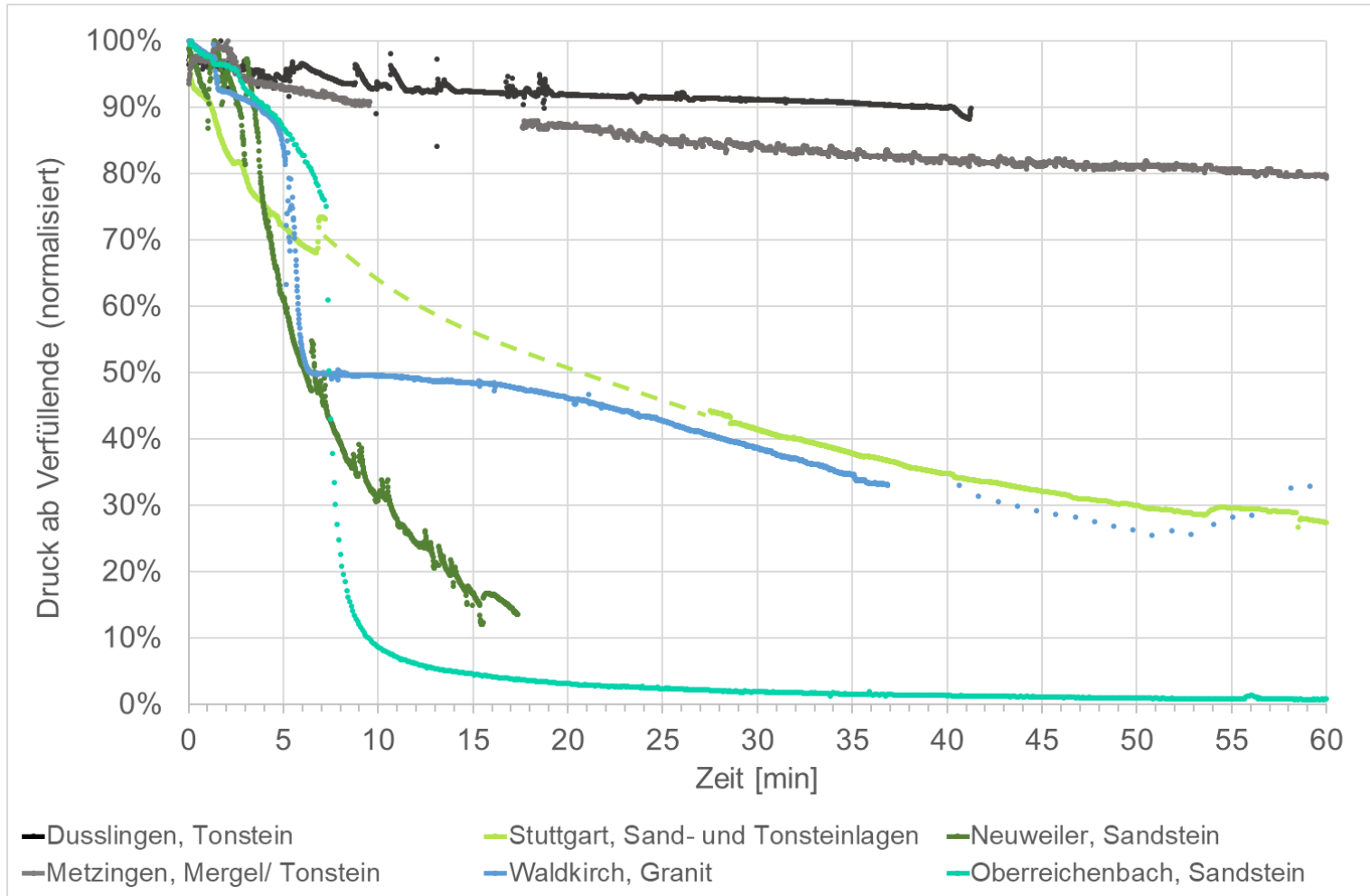
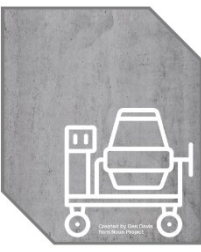
- Quartär
- Tertiär
- Mesozoikum
- Jura
- Trias
- Perm
- Karbon
- Devon
- Variskische Gangmagmatite
- Variskische Plutone
- Alte Schiefer
- Gneis-Migmatit-Komplex



Druckmessungen in unterschiedlichen Geologien:

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



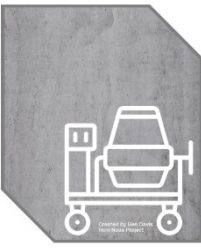


wenig bis kaum wasser-
durchlässige Formation

wasserdurchlässige
Formation



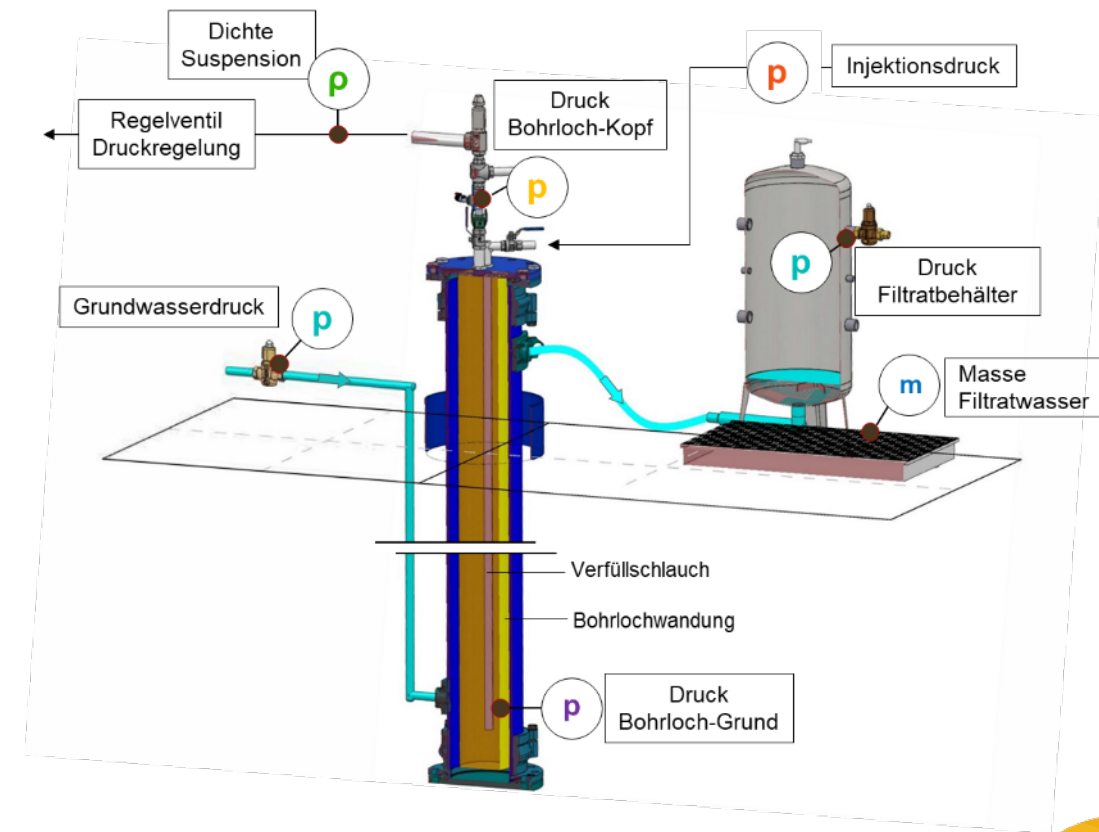
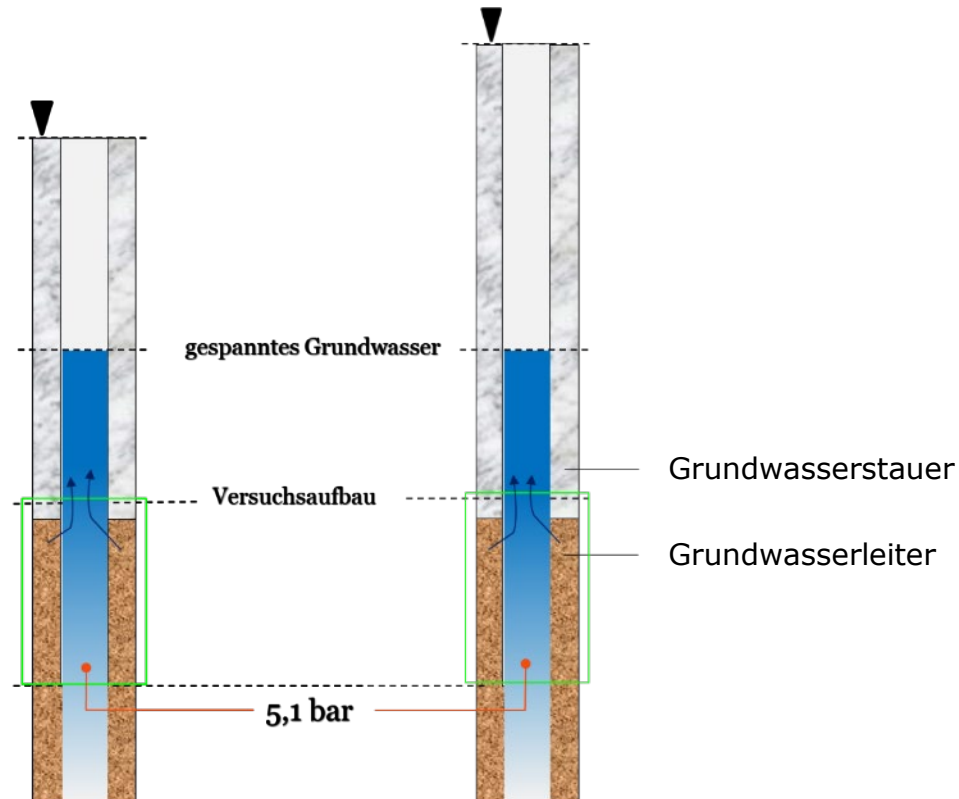
Filtrationsstand Nachbildung eines tiefen Bohrlochabschnitts

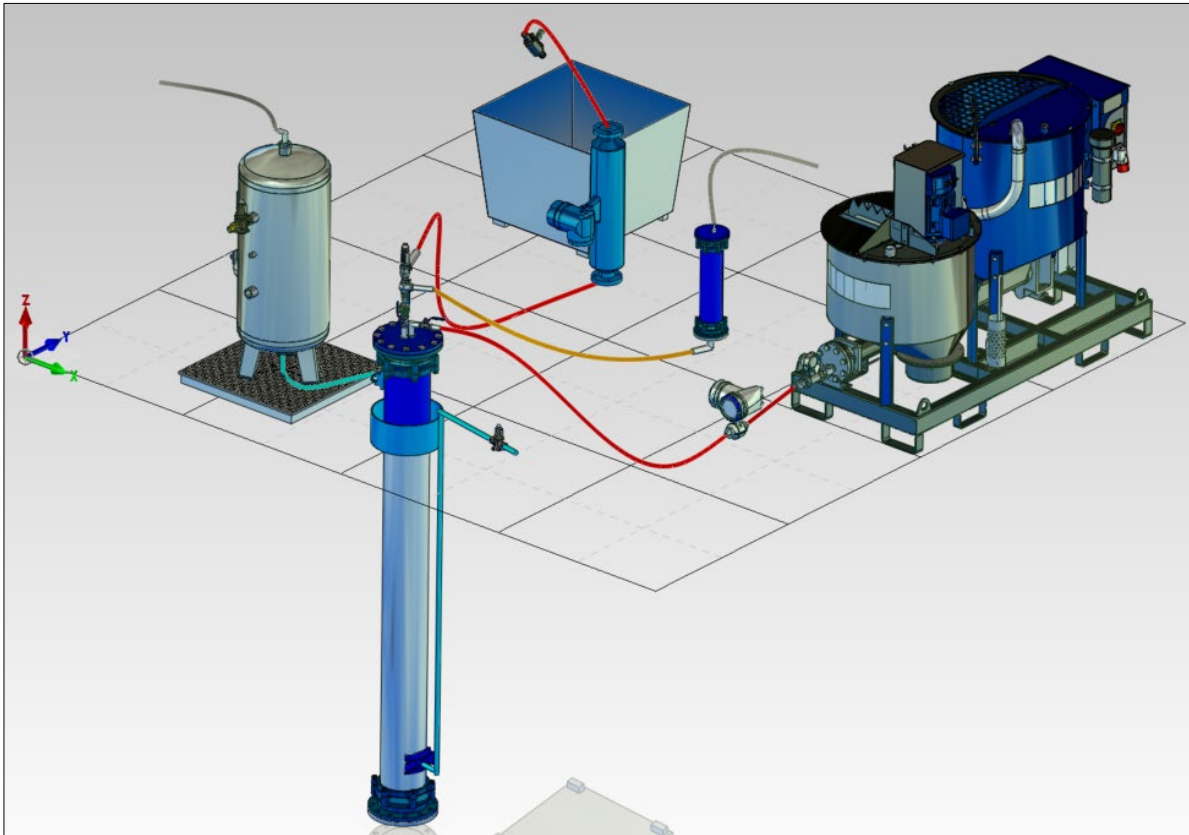
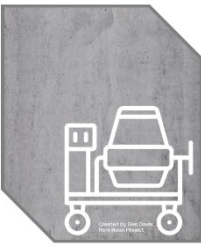


solites

Dichte = $1,94 \text{ g/cm}^3$
=> Tiefe Drucksensor 26,8 m

Dichte = $1,52 \text{ g/cm}^3$
=> Tiefe Drucksensor 34,2 m





Versuchsstand

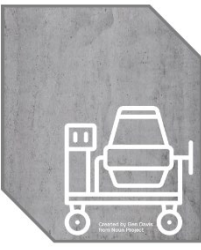


Filtrationsversuch

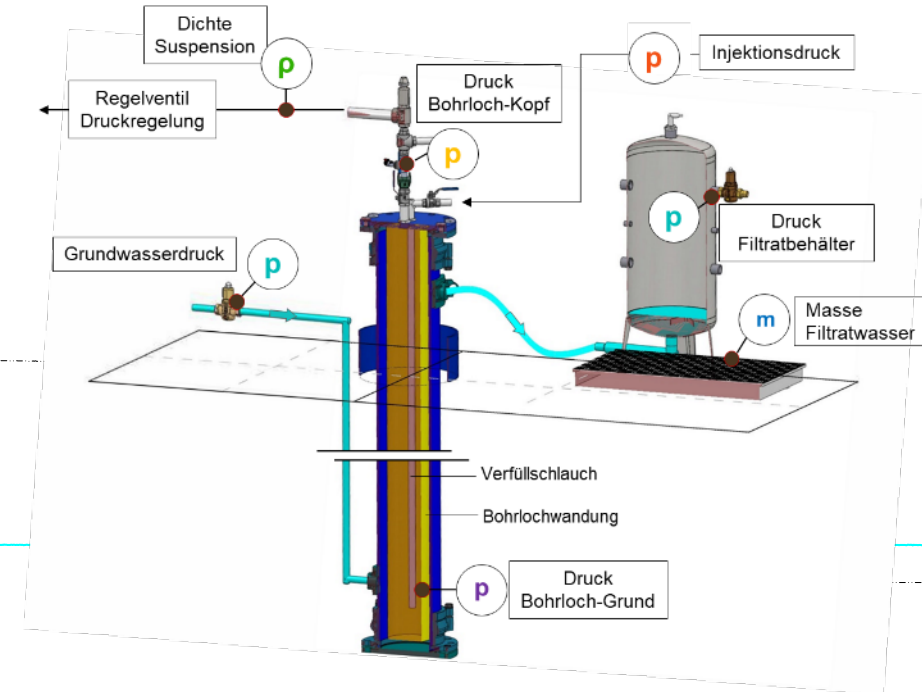
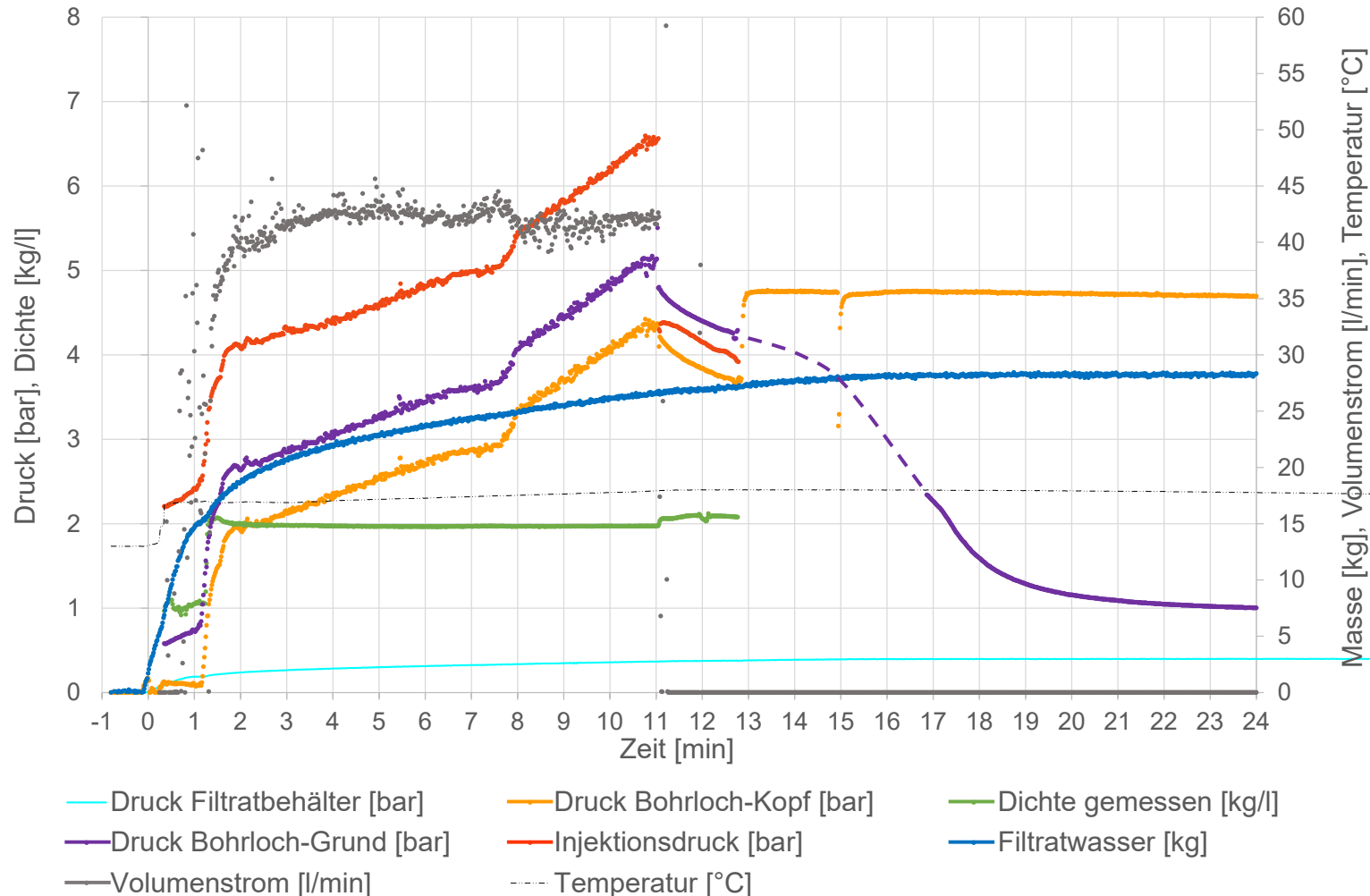


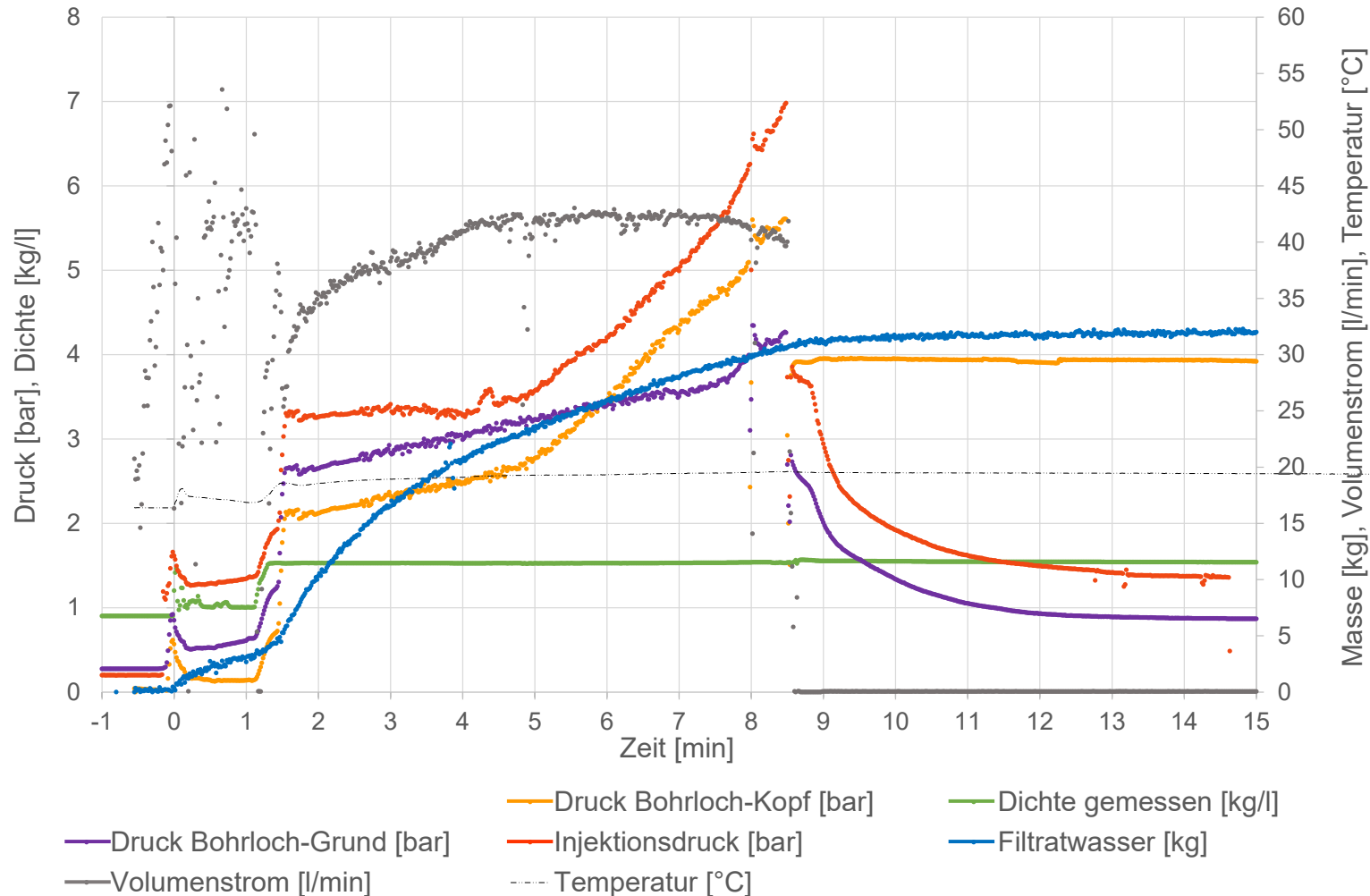
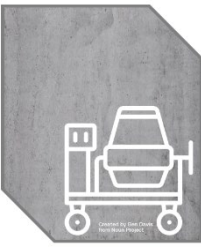
$$k_{f10} = 3,61 \pm 0,05 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}$$

Wasserdurchlässige
künstliche Formation

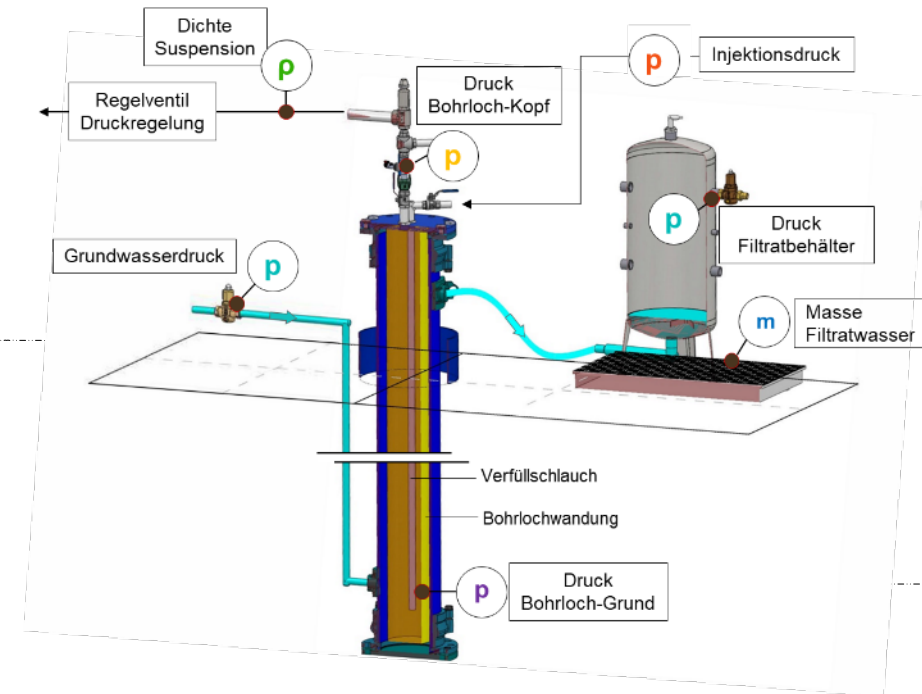


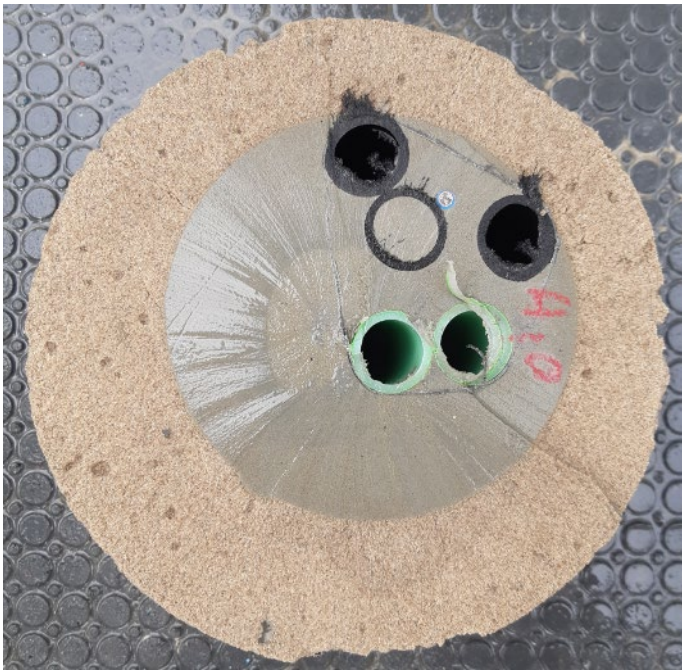
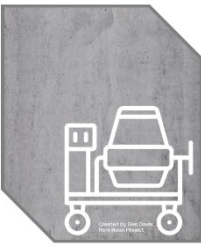
Beispiel Messdaten Baustoff mit
Wasser/Feststoff-Verhältnis: **0,3**





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

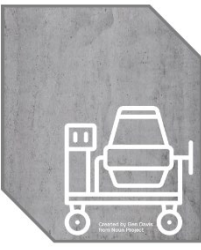




Horizontalschnitt durch EWS mit umliegender künstlicher Sandformation



Abschnittsweise zerstörungsfreie Freilegung der Verfüllsäule



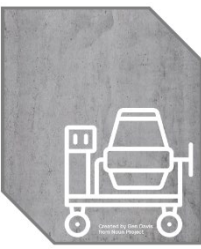
Sehr gute Verfüllqualität bei anliegendem Sondenrohr



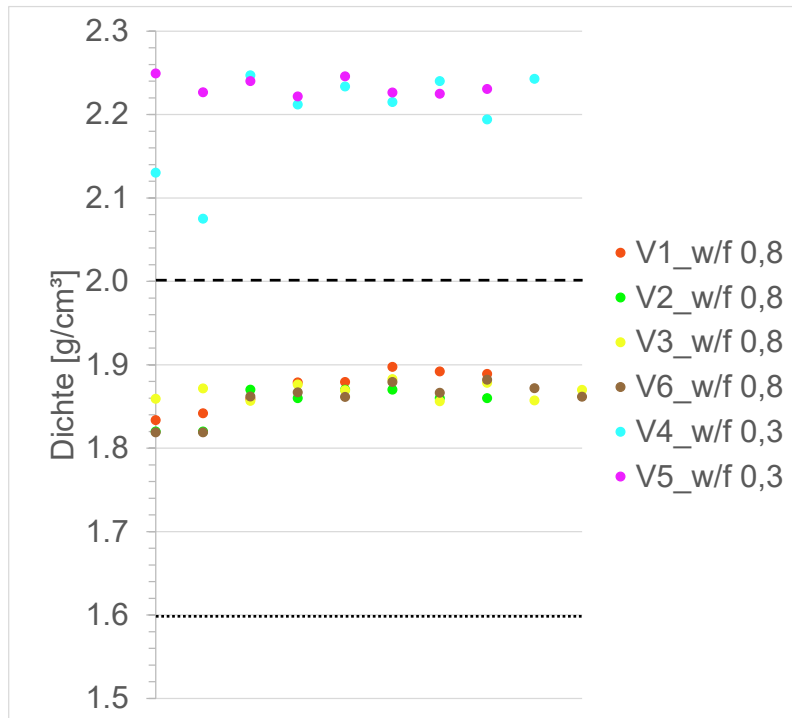
Filterkuchen und Strömungskanal des Verfüllbaustoffs mit W/F 0,3



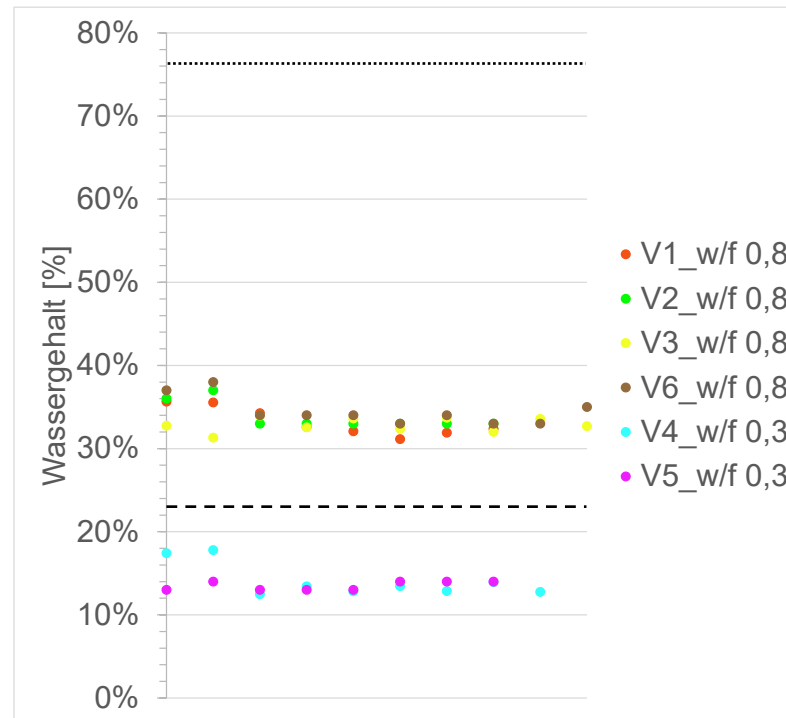
Filterkuchen und Strömungskanal des Verfüllbaustoffs mit W/F 0,8



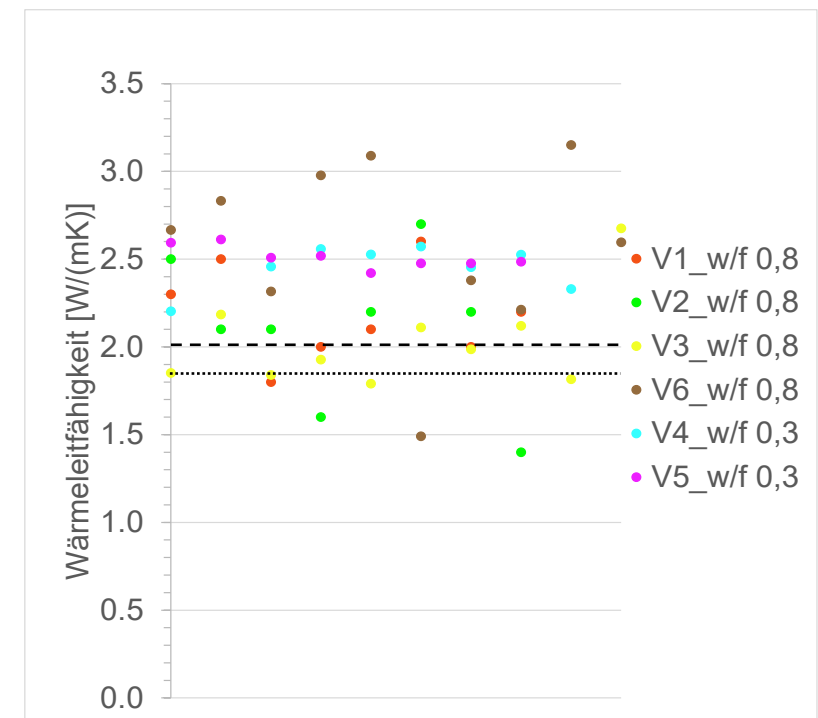
Dichte



Wassergehalt

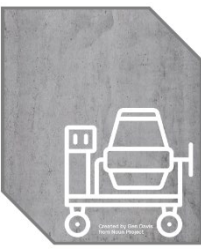


Wärmeleitfähigkeit



Referenzproben nicht filtriert

..... W/F 0,8
- - - - W/F 0,3

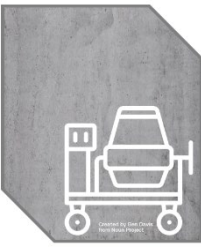


Beobachtete Auswirkungen der Filtration auf den Verfüllbaustoff:

- 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:

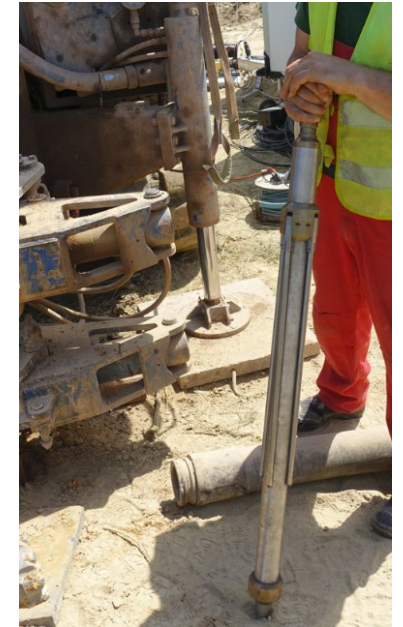
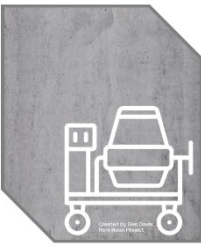
- Systemdurchlässigkeitsmessungen filtrierter Proben durch das ZAE Bayern in TP 3.3
- Übertragung auf reale Erdwärmesonden und Vergleich mit Filtrationsversuchen in TP 3.4



TP 3.4:

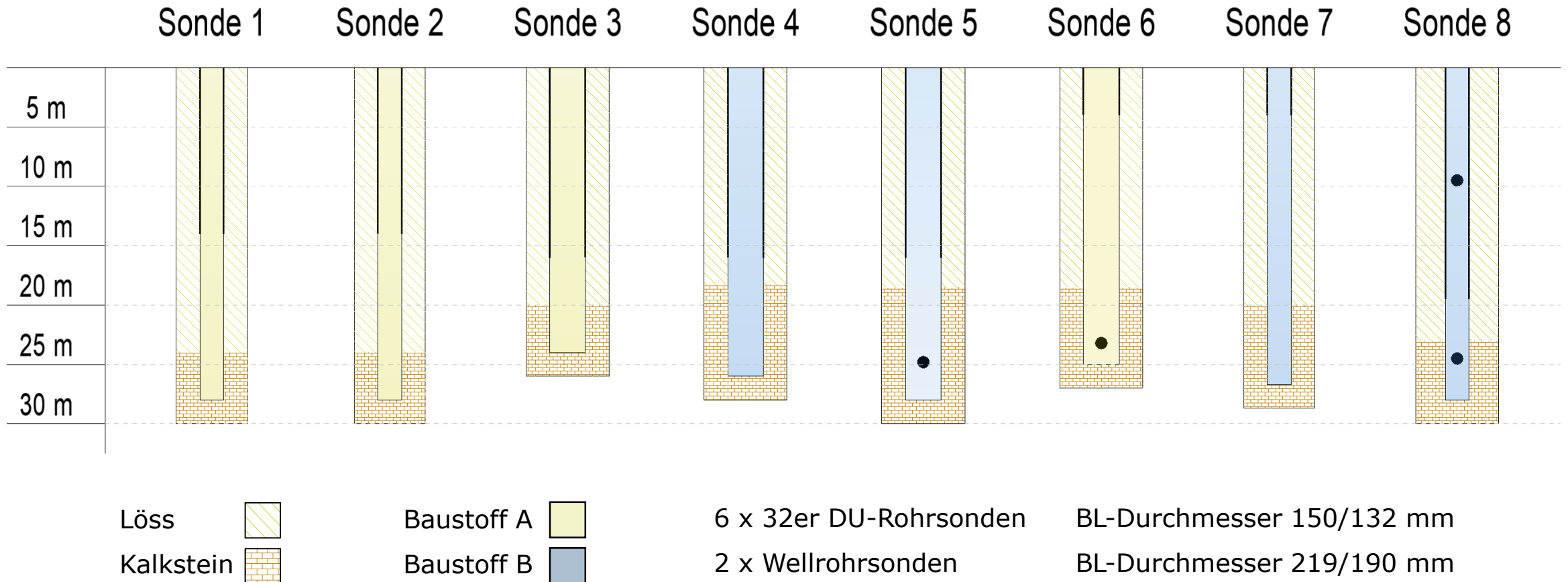
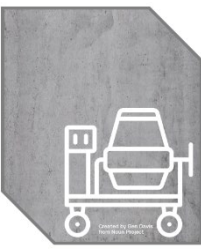
Analyse der
Verfüll-
qualität von
EWS in
einem realen
Untergrund

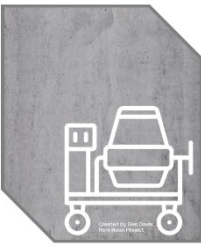
- Erstellung von acht Erdwärmesonden im Steinbruch
- Charakterisierung der Geologie und Bohrlochgeometrie
- Möglichst vollständige Freilegung und Analyse der Sonden
- Vergleich und Erweiterung der Erkenntnisse aus den Laboruntersuchungen auf reale Erdwärmesonden

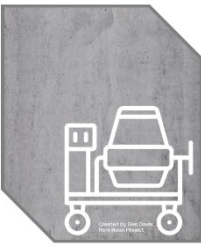


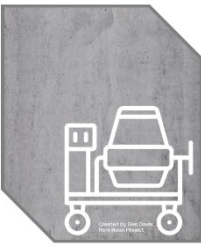
Geophysikalische
Bohrlochvermessung

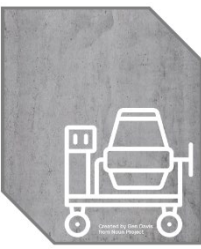
Bohrarbeiten im Steinbruch 06/2021 & 06/2022
EWS in ca. 20 m mächtiger Lössbedeckung, darunter Kalkstein





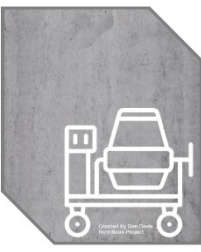






Optische Analyse und Laboranalyse Analog zu den Filtrationsversuchen





Optische Analyse und Laboranalyse Analog zu den Filtrationsversuchen

Sonde 1

Sonde 2

Sonde 3

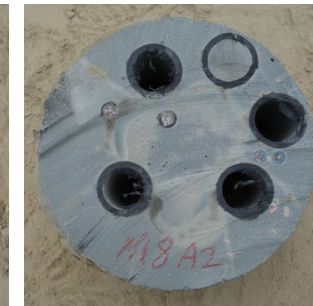
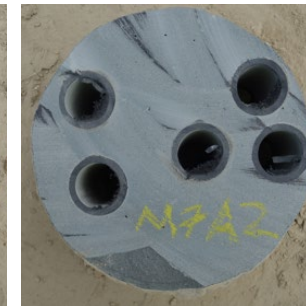
Sonde 4

Sonde 5

Sonde 6

Sonde 7

Sonde 8



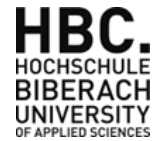
Vielen Dank für die Aufmerksamkeit

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
ISE

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

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

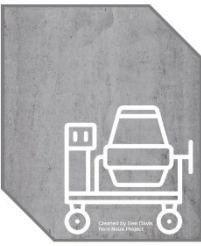
Fraunhofer
ISE

In Zusammenarbeit mit:



ZAE BAYERN

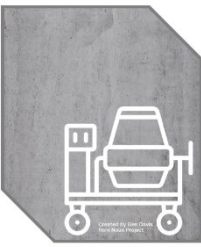
aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages



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.

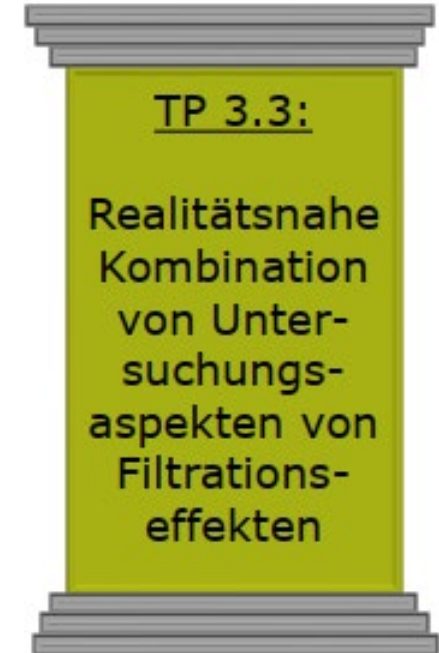
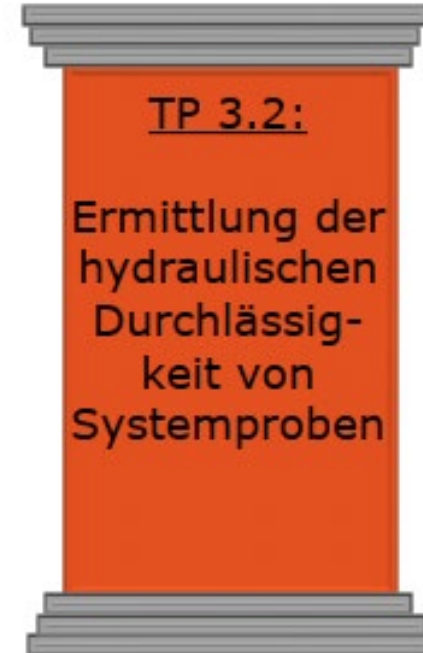
In diesen Unterlagen ist z. T. geistiges Eigentum Dritter in zitierender Weise wiedergegeben, weshalb eine unrechtmäßige Weiterverbreitung dieser Unterlagen neben ideellen auch finanzielle Schäden nach sich ziehen kann, für die der Verursacher haftbar gemacht wird.

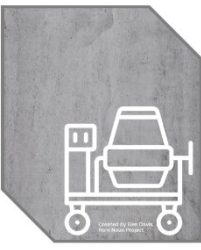
Eine Weitergabe an außenstehende Dritte in irgendeiner Form ist deshalb grundsätzlich nicht gestattet. Für die Teile dieses Dokuments, an denen die Verfasser selbst die Urheberrechte halten, werden auf Anfrage gerne weitergehende Nutzungsrechte (für Zwecke der Lehre und Forschung kostenlos) gewährt.



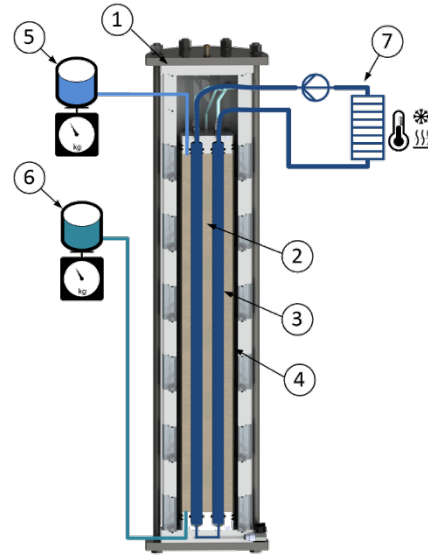
Inhalt TP3.2 & TP3.3

- 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





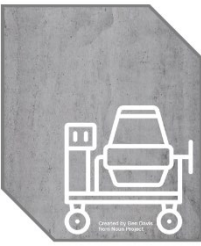
Systemprobe (1 m) mit
vier Sondenrohren und
zentralem
Hinterfüllschlauch

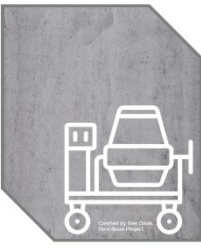


Schema der Systemtriaxialzelle:

- 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

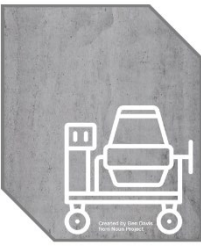


Herstellung der filtrierten Systemprobe



Filtrierte Systemprobe (links)
und Referenzprobe (rechts)

1. Ringversuch: Einbau Referenzprobe und und filtrierte Systemprobe



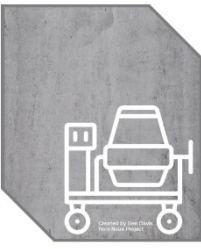
Unfiltrierte Referenzprobe



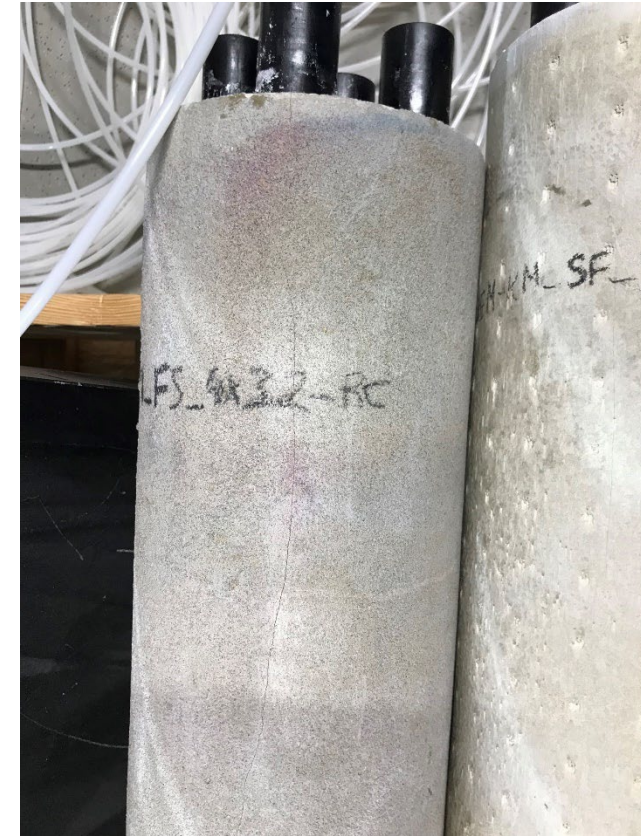
Filtrierte Systemprobe



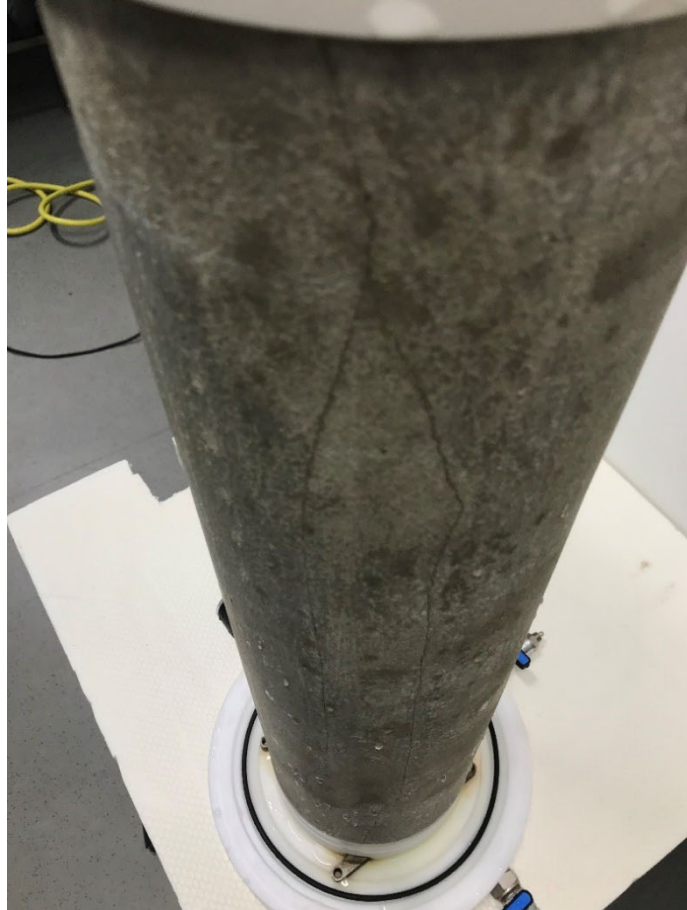
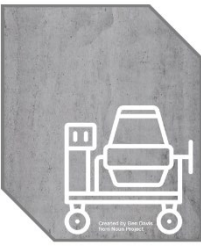
1. Ringversuch: Ausbau Referenzprobe und filtrierte Systemprobe



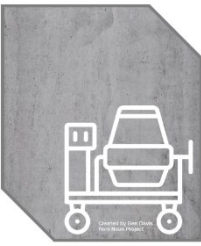
Fazit: Filtrierte Probe tendenziell etwas robuster und undurchlässiger, aber ähnliche Reaktionen auf Einflüsse. Beide Proben weisen Risse auf.



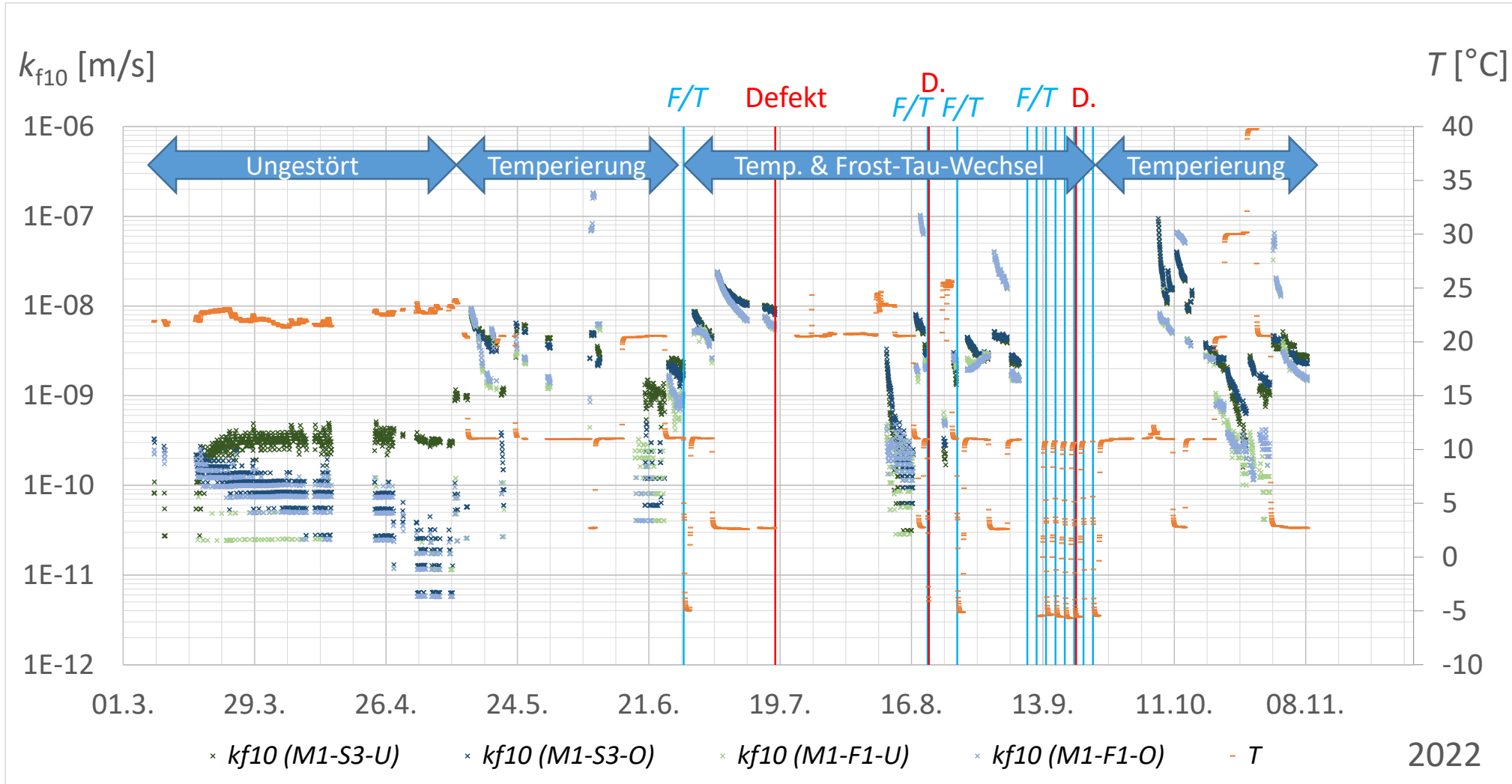
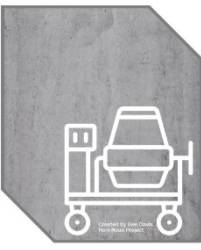
1. Ringversuch: Ausbau Probe 1

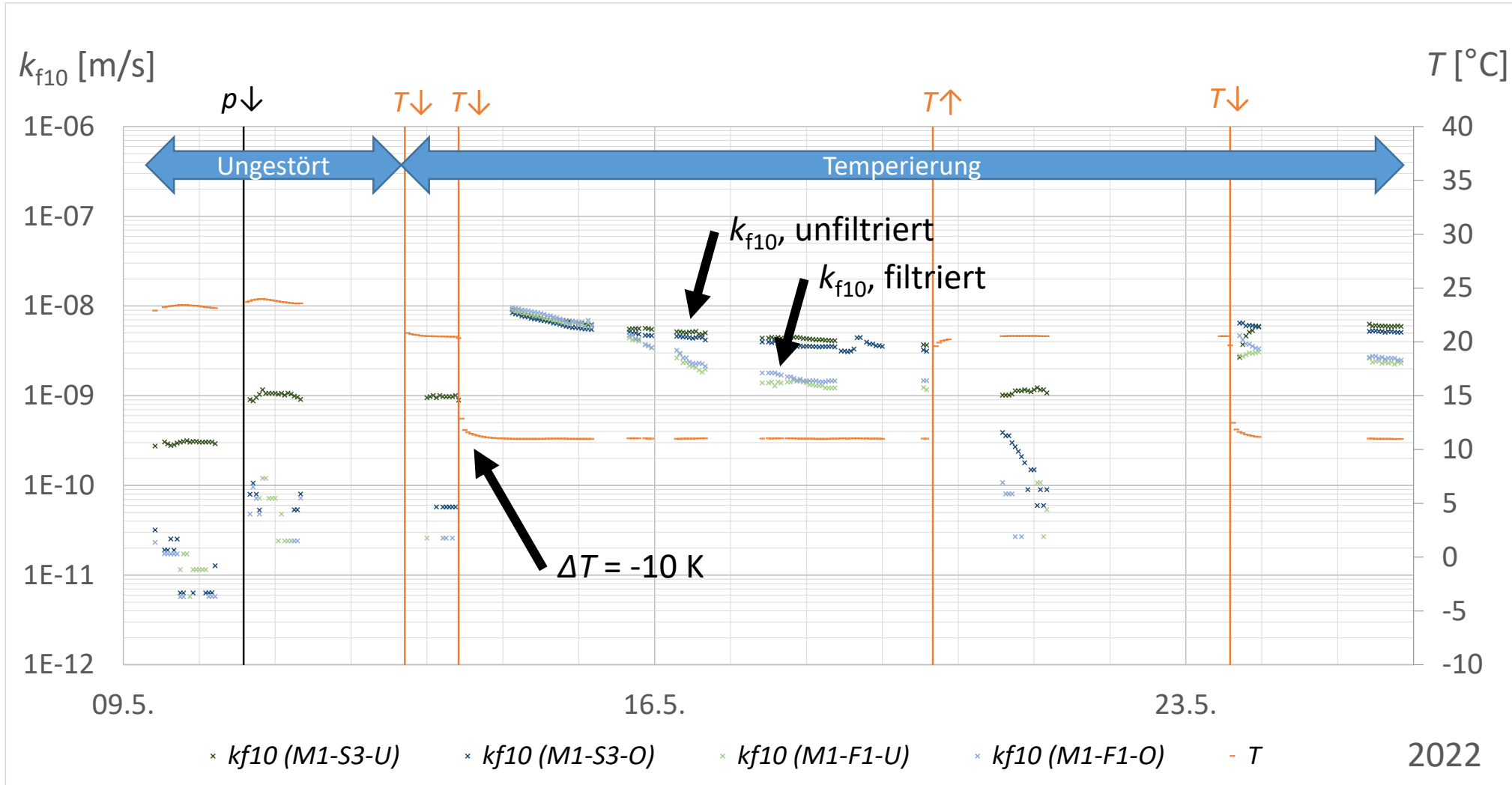
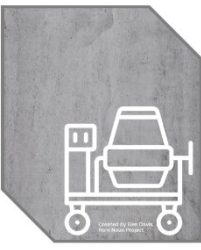


1. Ringversuch: Ausbau Probe 2

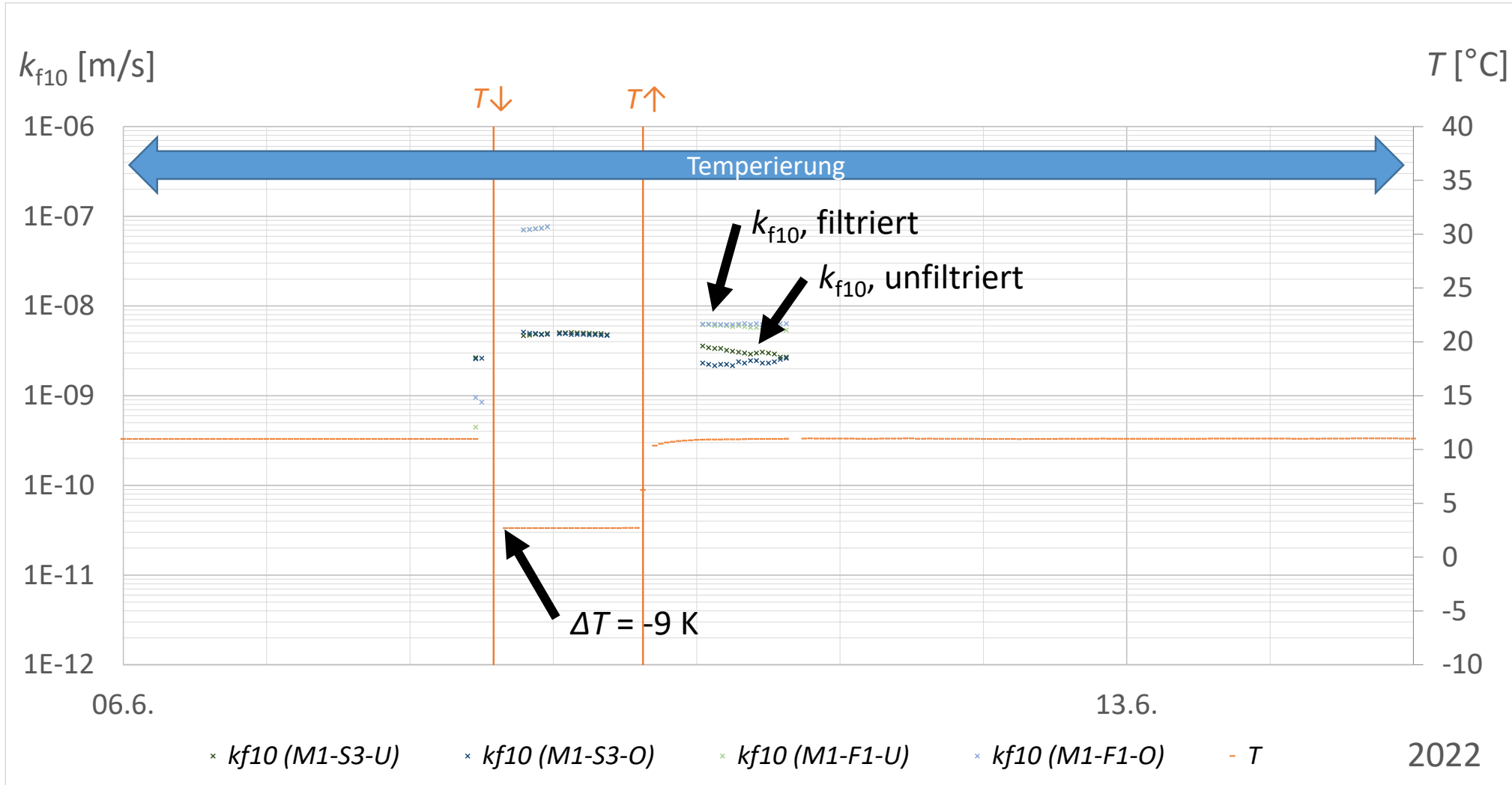
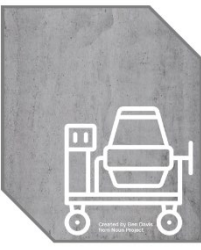


Gesamtübersicht des 1. Ringversuchs

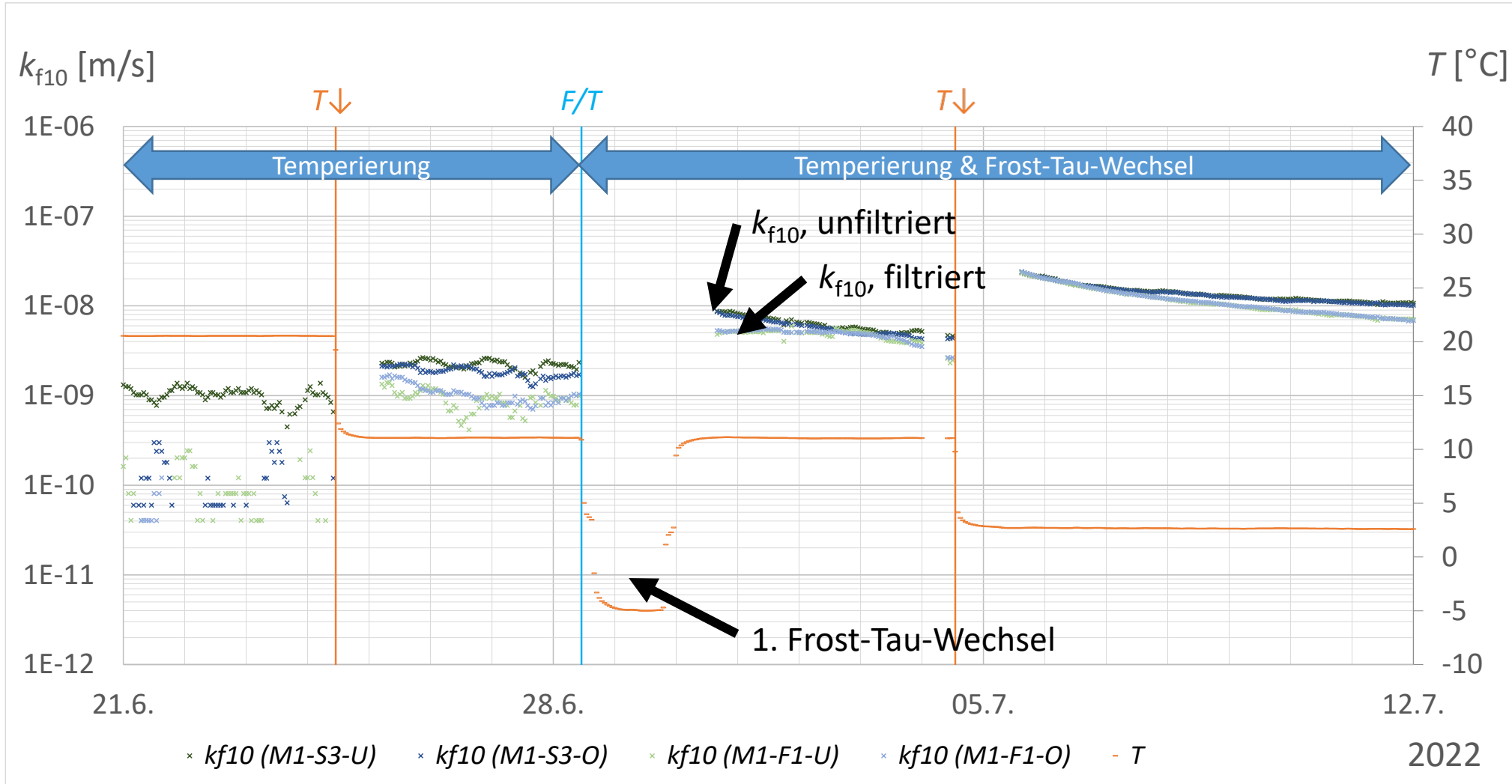
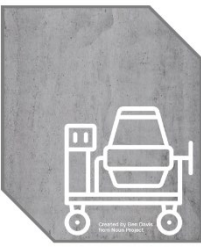




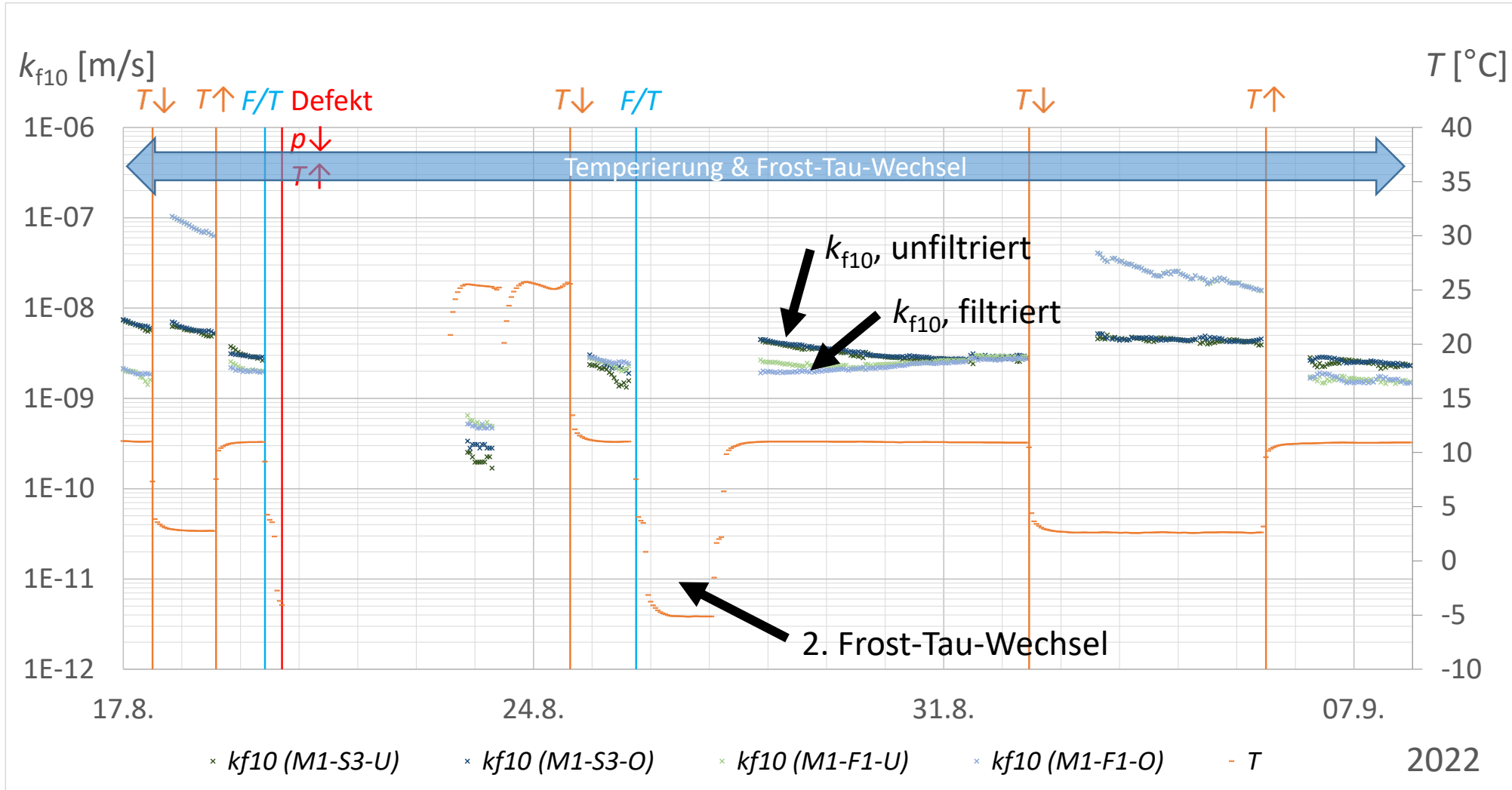
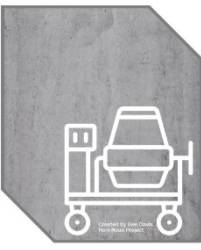
Erste Abkühlung auf 1 °C

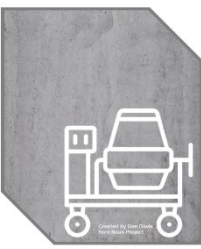


1. Frost-Tau-Wechsel

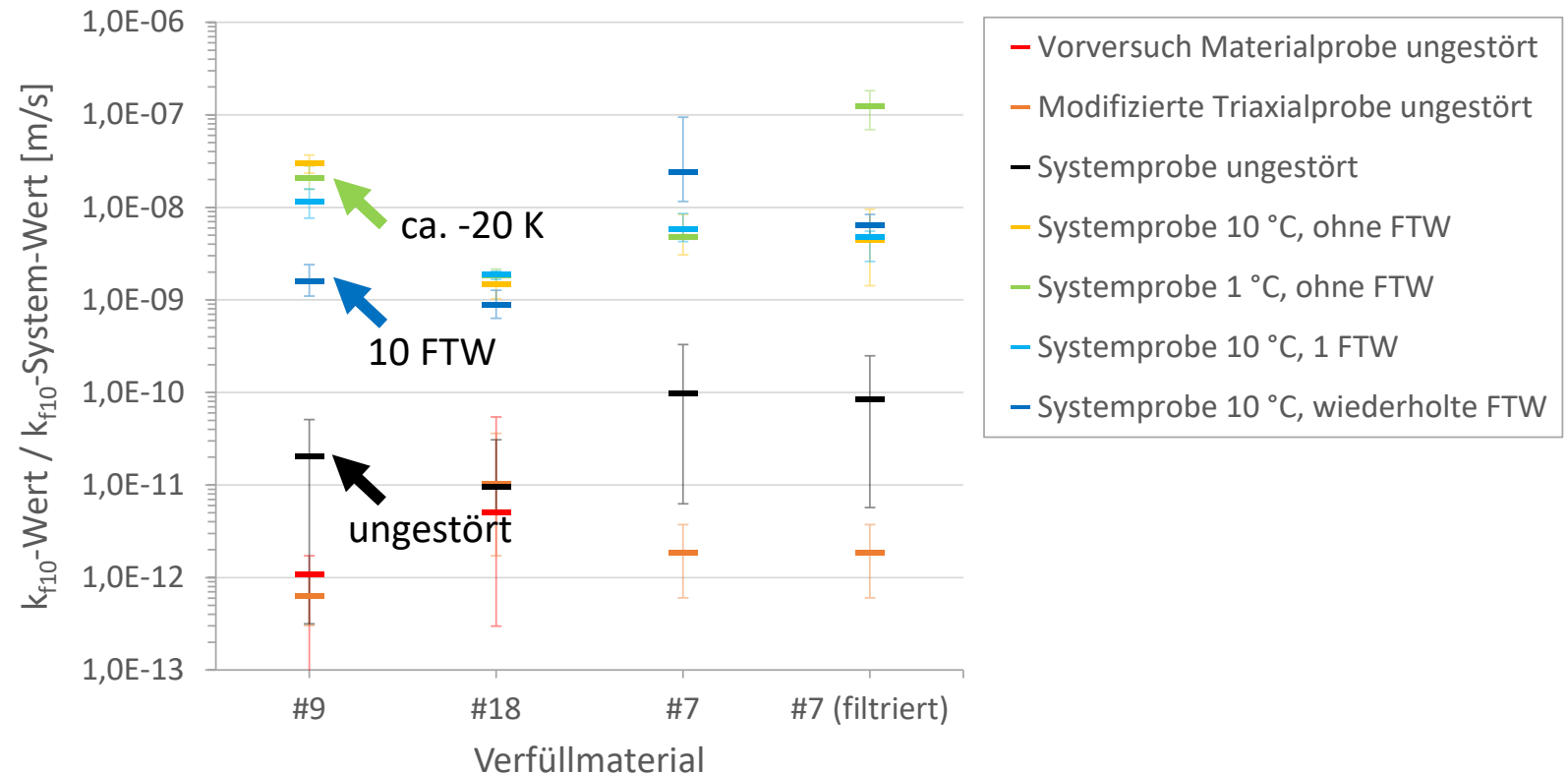


Defekt und 2. Frost-Tau-Wechsel

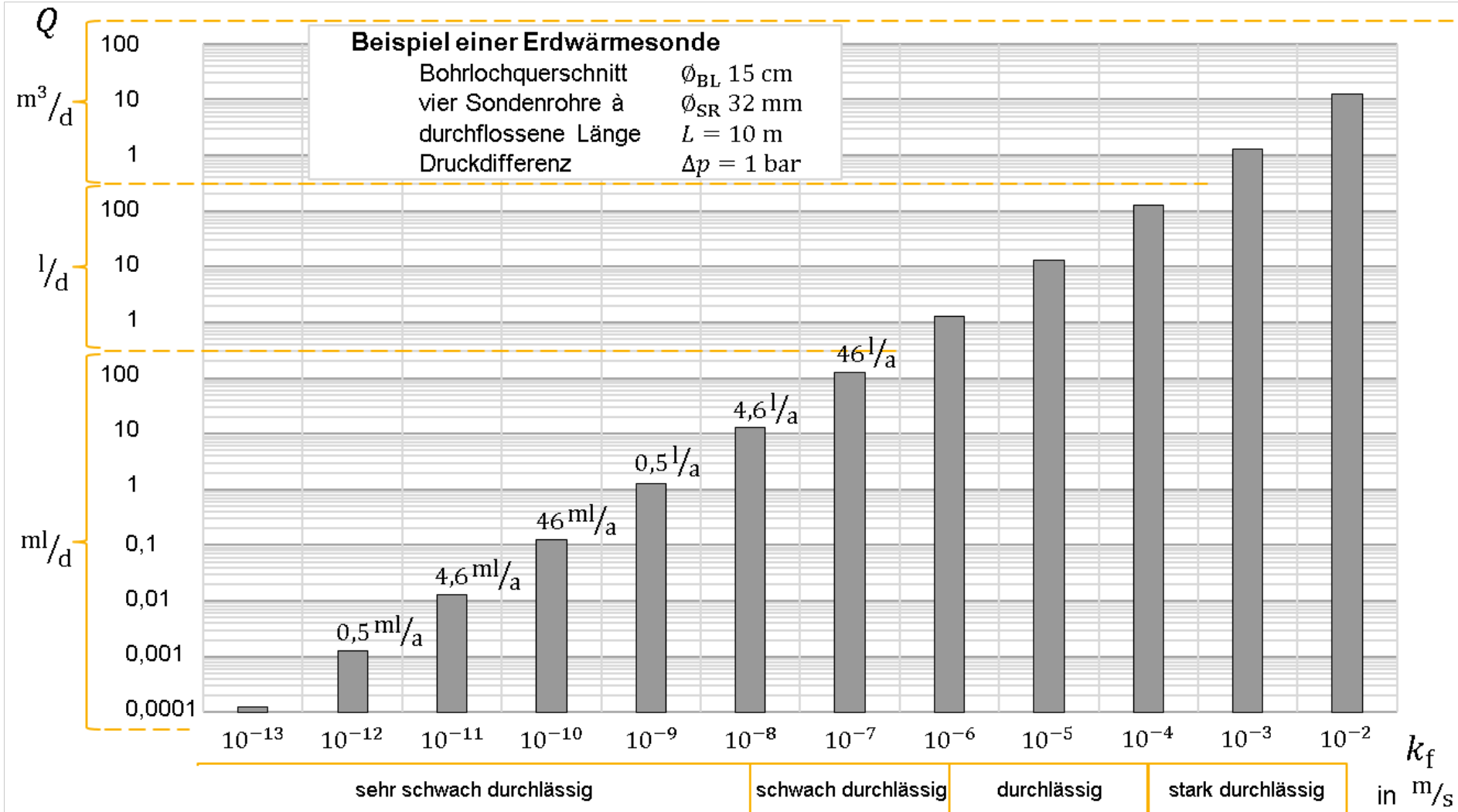
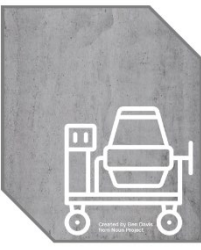


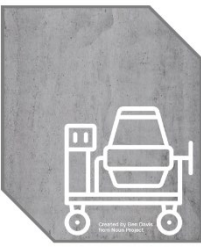


- Ungestörte Systemdurchlässigkeit $\leq 1 \cdot 10^{-10}$ m/s
- Bei stufenweiser Abkühlung von 20 °C auf 1 °C steigt der k_f um mehrere Zehnerpotenzen
- Dies lässt sich auf die thermische Kontraktion der Sondenrohre zurückführen
- Nach FTW sind vergleichsweise geringe zusätzliche Anstiege der hydraulischen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

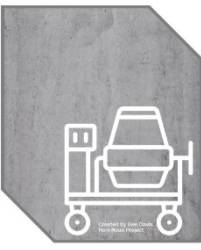


Rechenbeispiel für Volumenstrom





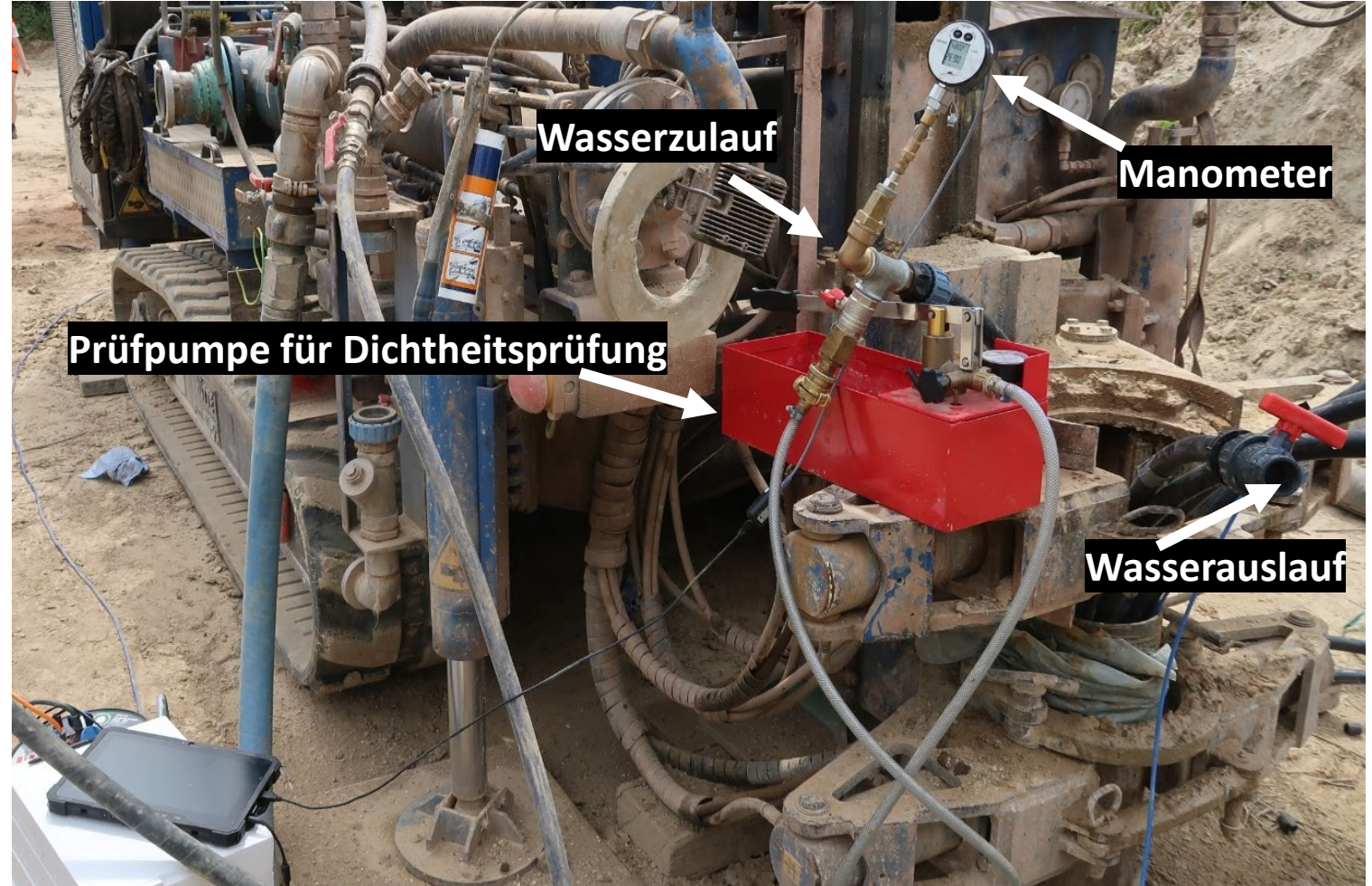
- Standortspezifische hydrogeologische Bedingungen (Wasserspiegel, Druckpotentiale)
- Untergrundtemperatur
- Bohrtiefe
- Suspensionsdichte
- Suspensionstemperatur beim Verfüllvorgang
- Hydratationswärme der Suspension
- Geschwindigkeit des Verfüllvorgangs (E-Modul von HDPE ist von der Belastung abhängig)
- 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)

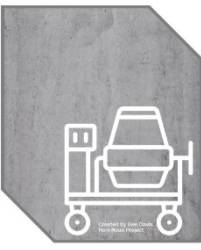


Befüllen der EWS

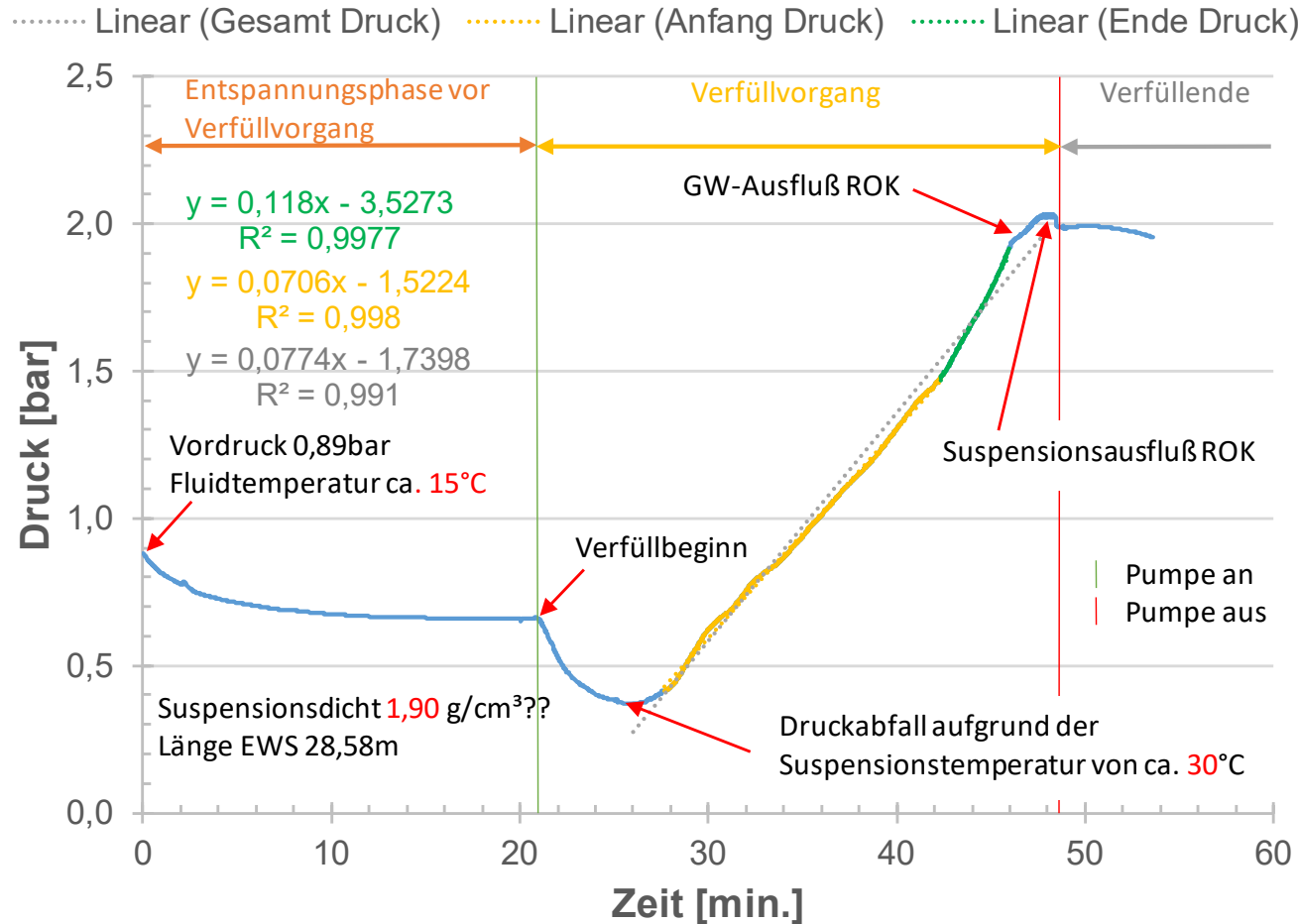


Entlüften der EWS

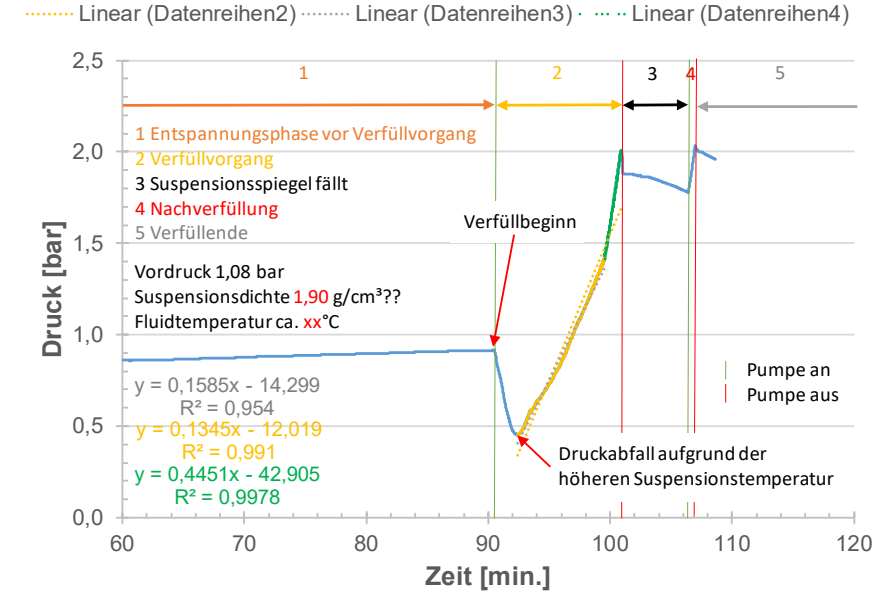




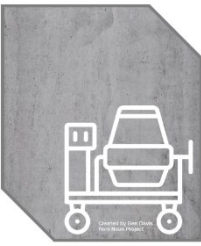
Bohrung 5



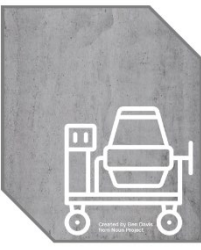
Bohrung 7



	EWS 5	EWS 7
Δp an Testsonde	1,7 bar	1,6 bar
Δp auf 99 m EWS	5,8 bar	6,2 bar
Δp auf 99 m korr.	7,6 bar	7,8 bar
Δp auf 99 m korr.	6,7 bar	5,6 bar
Δp 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^{a)} 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

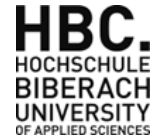
Danke für die Aufmerksamkeit!

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
ISE

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

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:

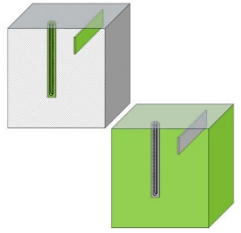
ZAE BAYERN

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.

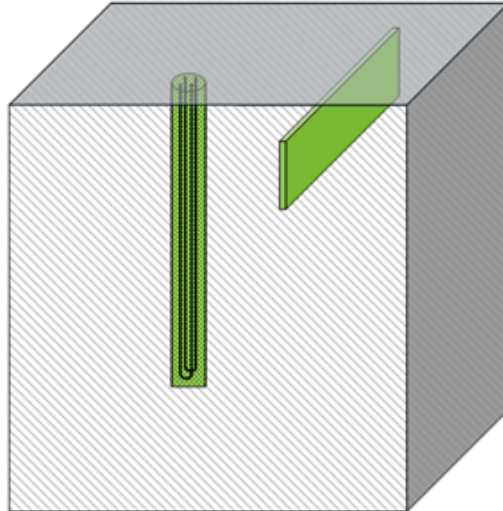
Eine Weitergabe an außenstehende Dritte in irgendeiner Form ist deshalb grundsätzlich nicht gestattet. Für die Teile dieses Dokuments, an denen die Verfasser selbst die Urheberrechte halten, werden auf Anfrage gerne weitergehende Nutzungsrechte (für Zwecke der Lehre und Forschung kostenlos) gewährt.



Vorgehen

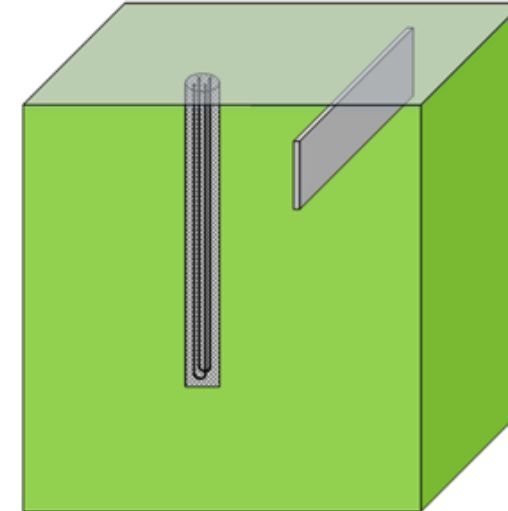
Unterteilung des Berechnungsgebiets & Anwendung analytischer Näherungsmodelle

- Quellensystem
(inkl. Einbausituation)

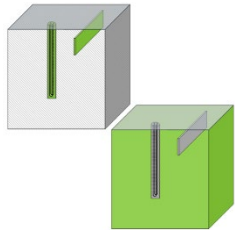


Analytische Widerstandsmodelle
& ggf. Kapazitäten

- Umliegender Untergrund
(inkl. Erdoberflächeneinfluss)



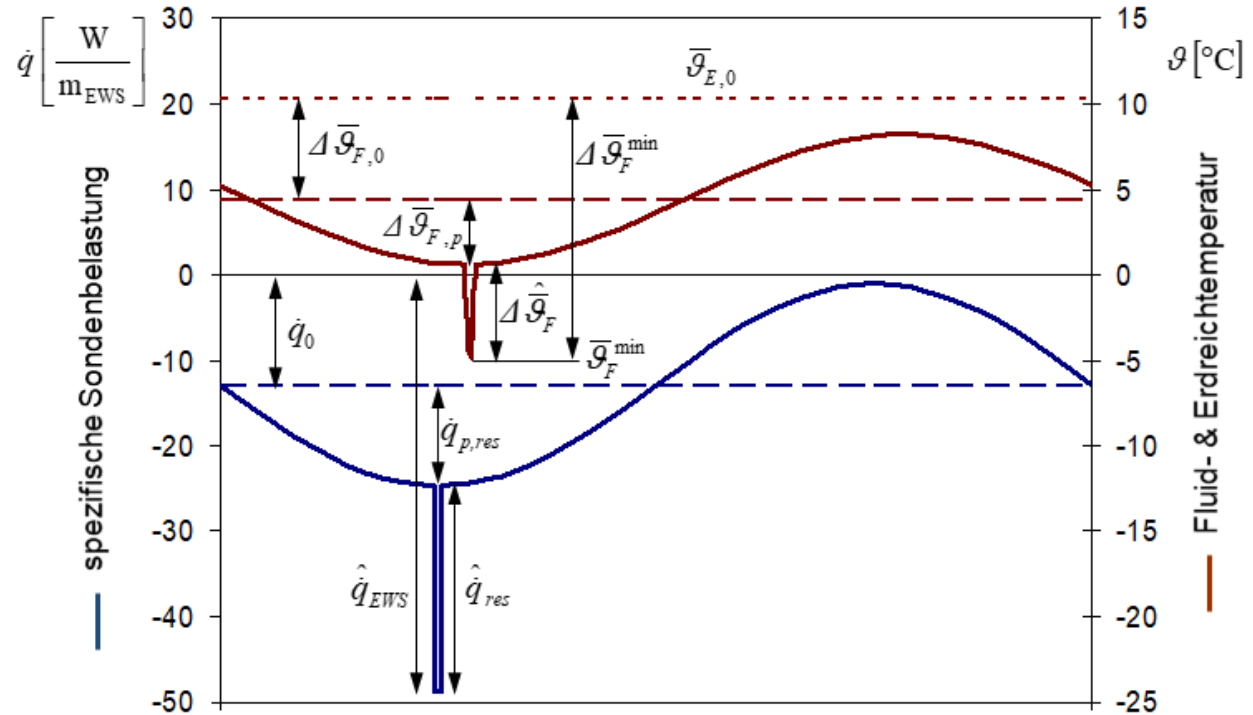
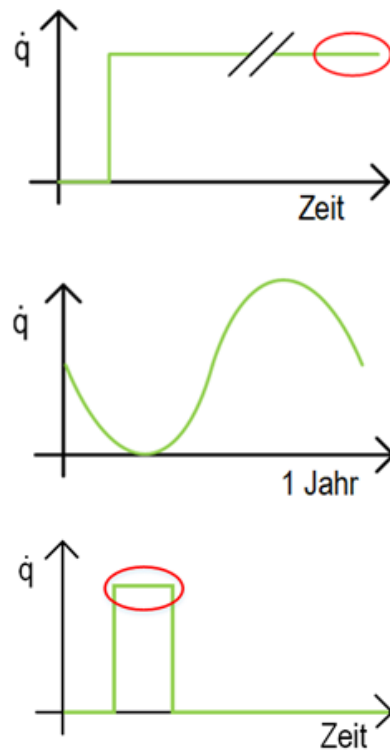
Erweiterungen analytischer Lösungen der
momentanen punktförmigen Wärmequelle



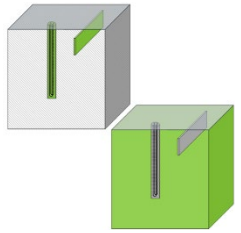
Vorgehen



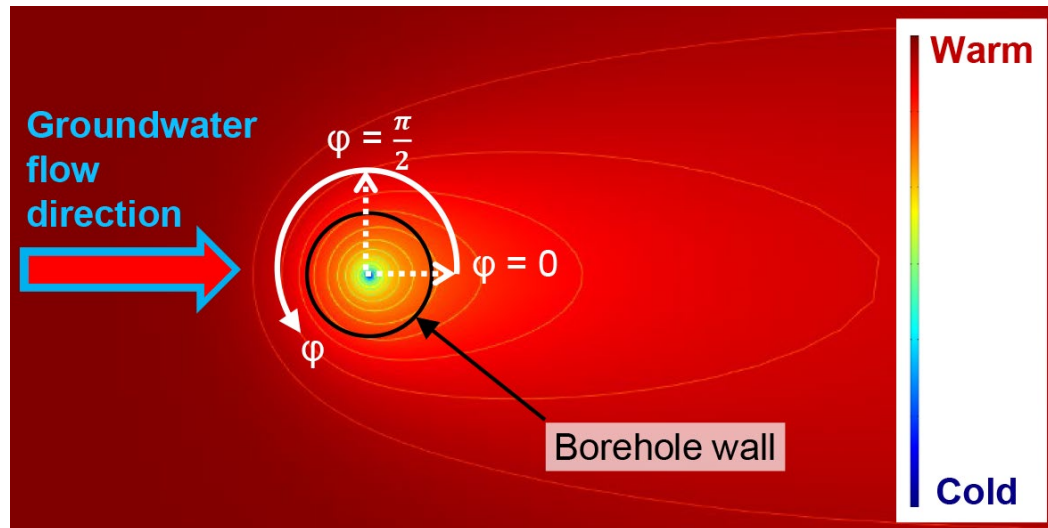
Das geothermische Lastprofil und die Temperaturreaktion



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



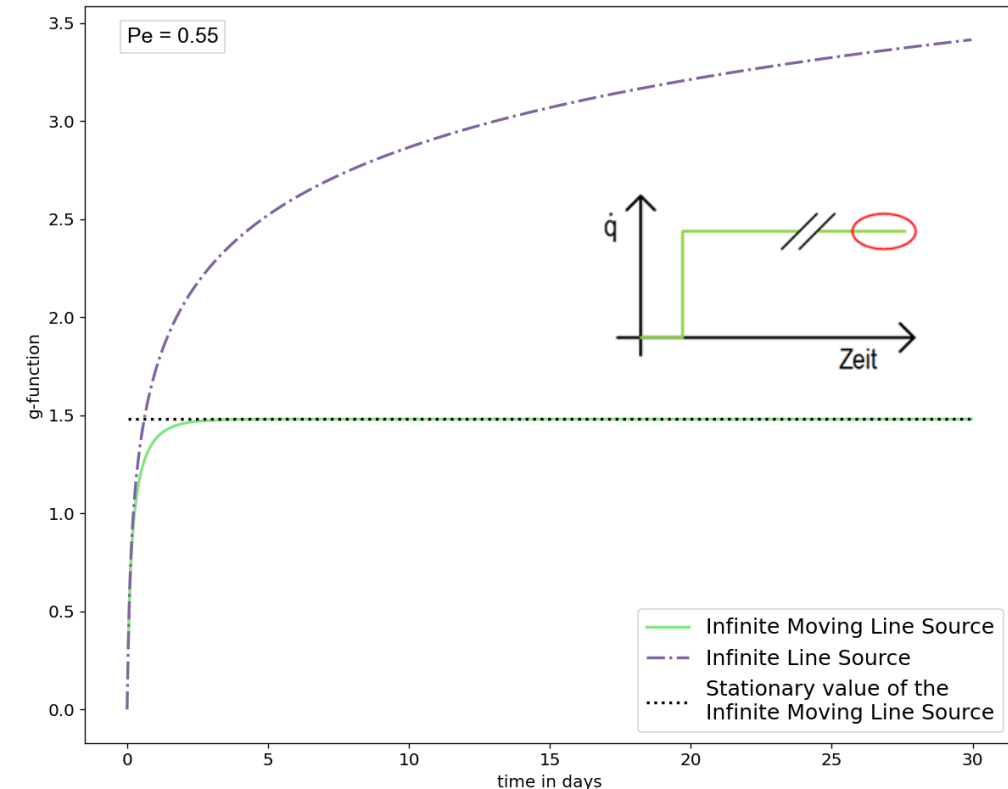
Die analytische Lösung der Infinite Moving Line Source

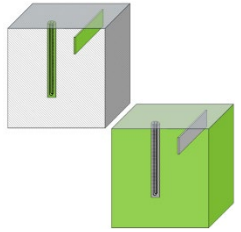


$$\Delta\vartheta = \frac{\dot{q}}{2 \pi \lambda_{eff}} \left\{ I_0 \left(\frac{Pe}{2} \right) K_0 \left(\frac{Pe}{2} \right) \right\}$$

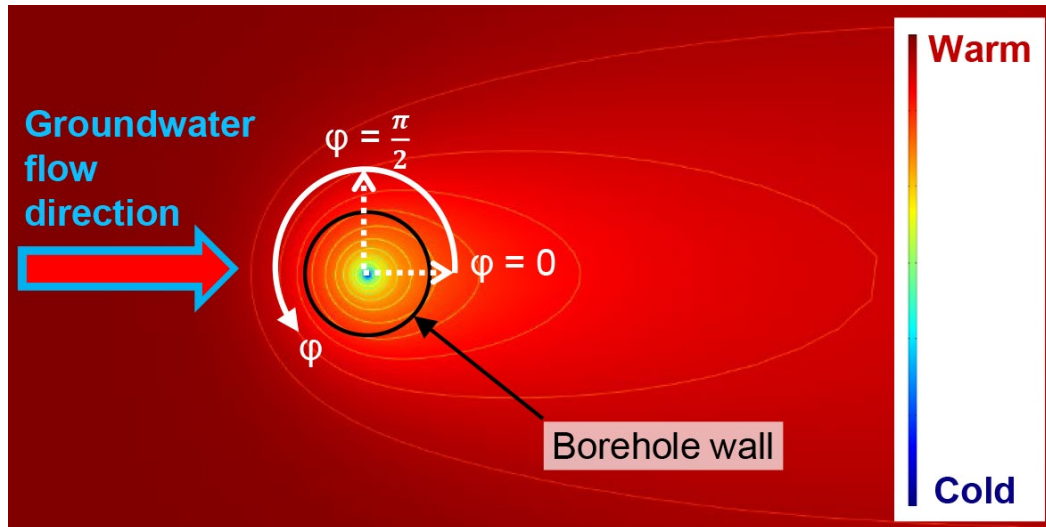
Quelle:

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>

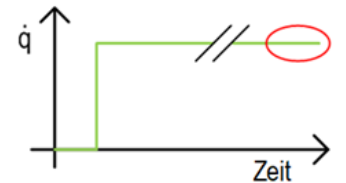
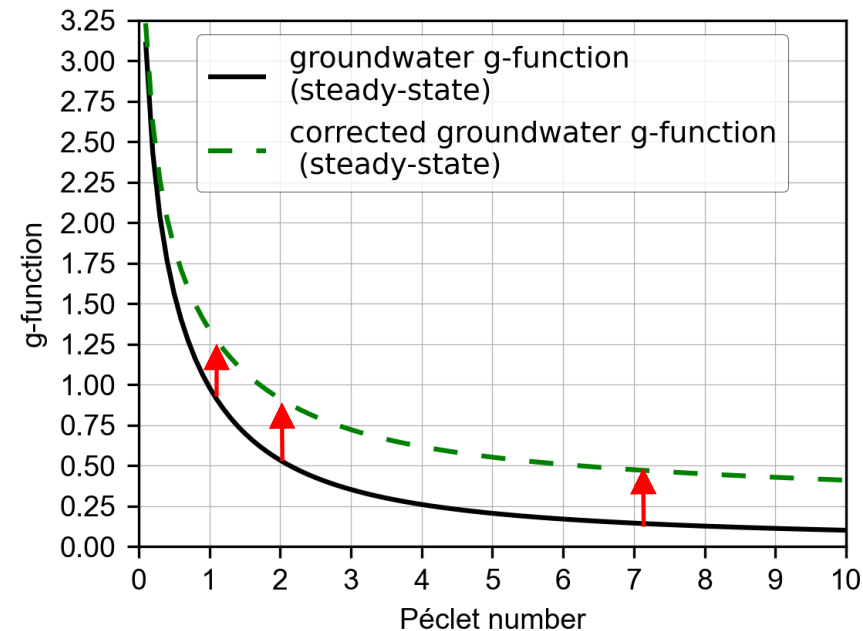




Korrektur analytische Lösung für Grundwasserfluss um Bohrlochverfüllung



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

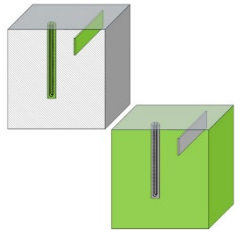


→ Korrektur am Bohrlochrand erforderlich

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"

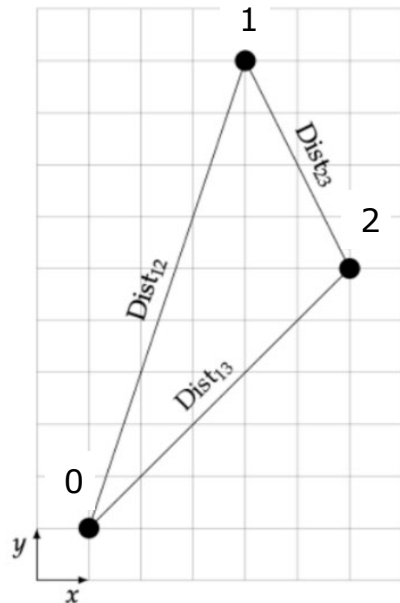
Geosciences 11, no. 10: 410. <https://doi.org/10.3390/geosciences11100410>



Vorgehen

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

Bis zu welcher Entfernung ist die Bohrlochverfüllungs-korrektur erforderlich?



Eingaben:

g_{einzel} + Einfluss:

Superposition:

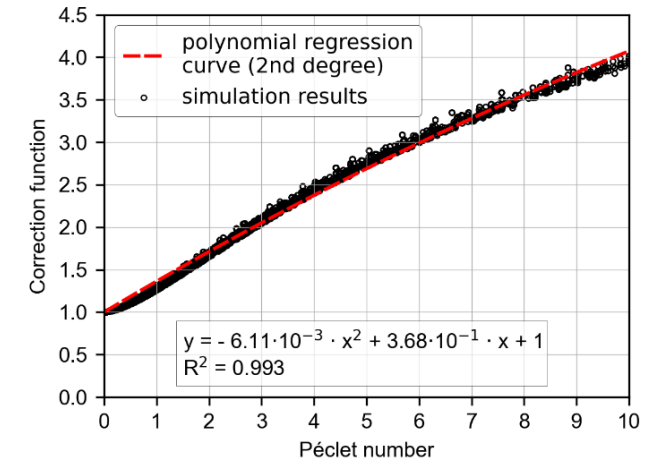
Endergebnis:

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

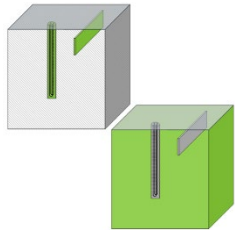
g_fls_matrix:
      0      1      2
0  6.417678  1.657575  2.098170
1  1.381313  6.600000  2.629540
2  1.234217  1.856146  6.948307

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

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

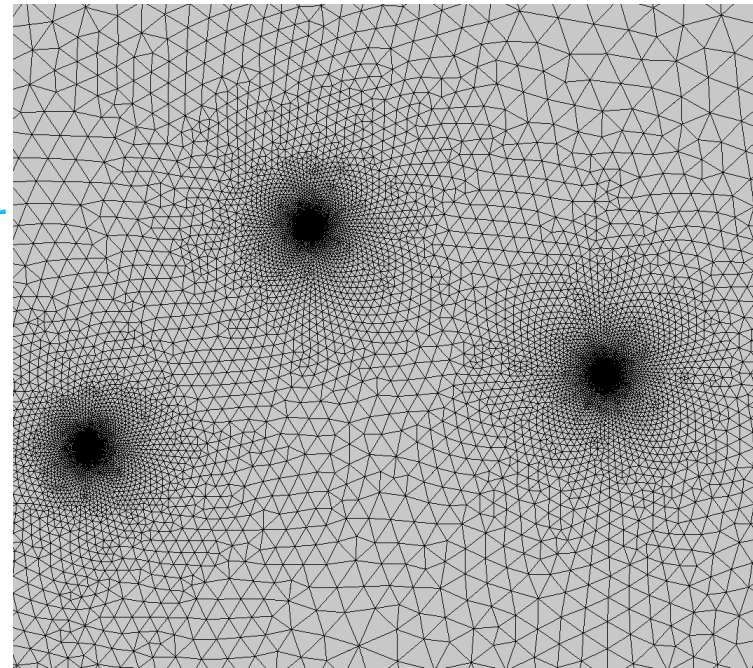


Quelle:
Van de Ven, A., Koenigsdorff, R., and Bayer, P.
2021. Enhanced Steady-State Solution of the
Infinite Moving Line Source Model for the Thermal
Design of Grouted Borehole Heat Exchangers with
Groundwater Advection, *Geosciences* 11, no. 10:
410.

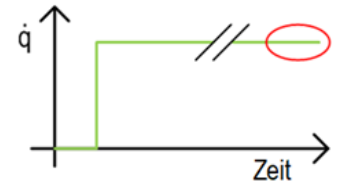
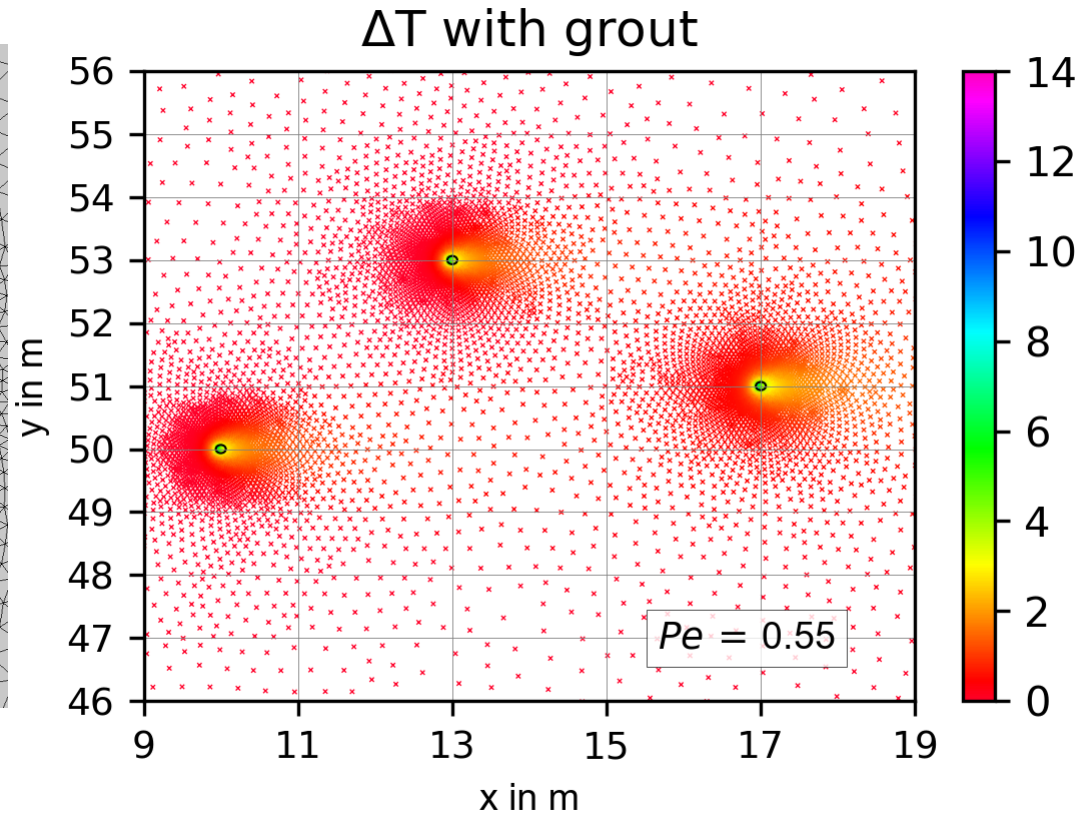


Numerische Simulation

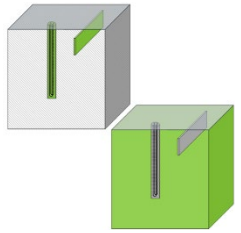
Groundwater
flow
direction



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



Simulationen mit COMSOL Multiphysics®

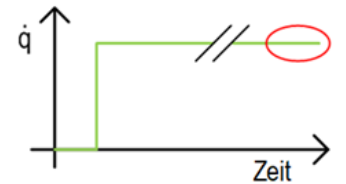
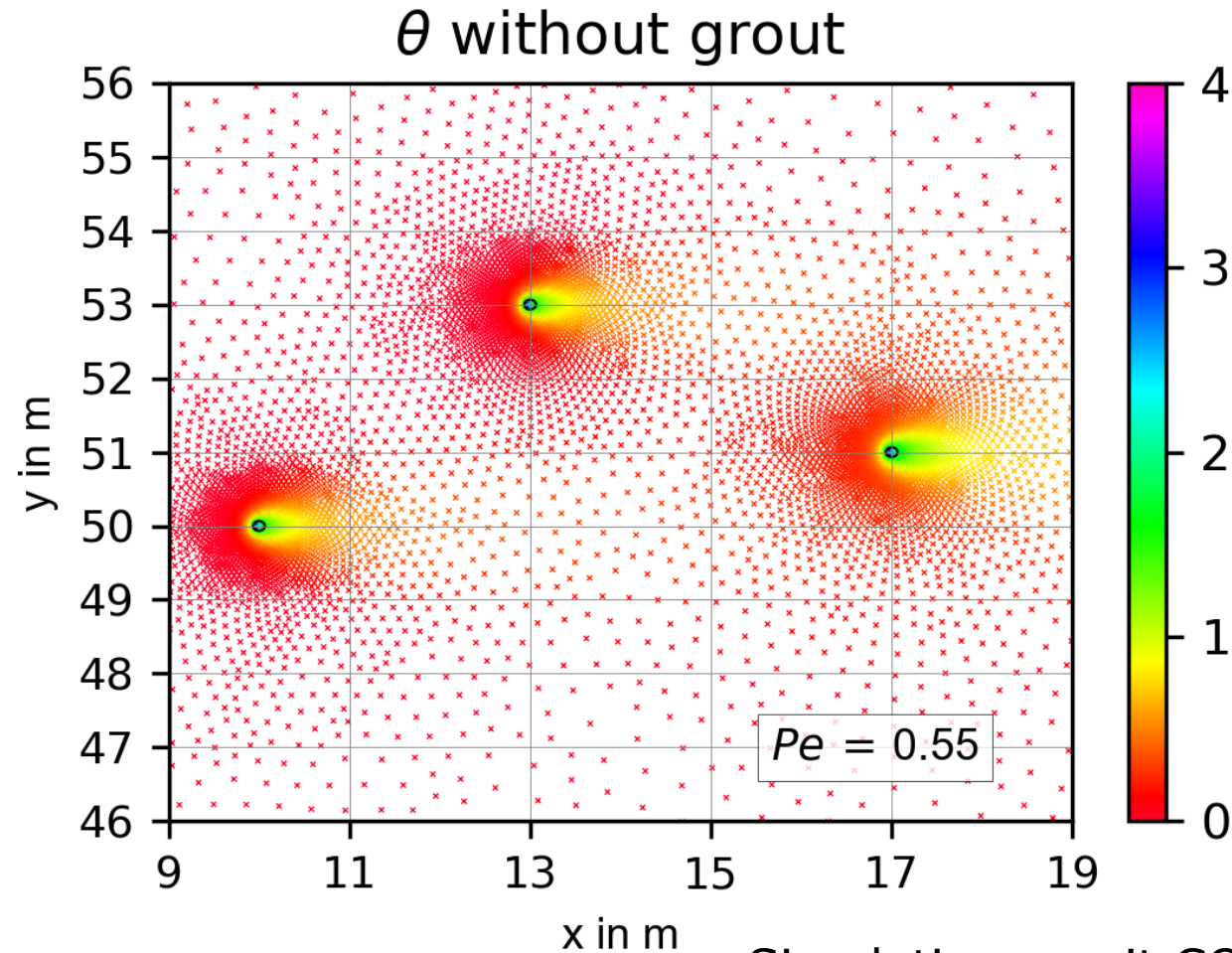


Temperaturfeld

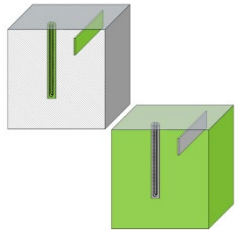
Bohrlöcher
unverfüllt



Groundwater
flow
direction



Simulationen mit COMSOL Multiphysics®

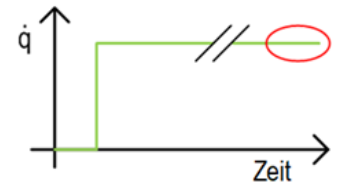
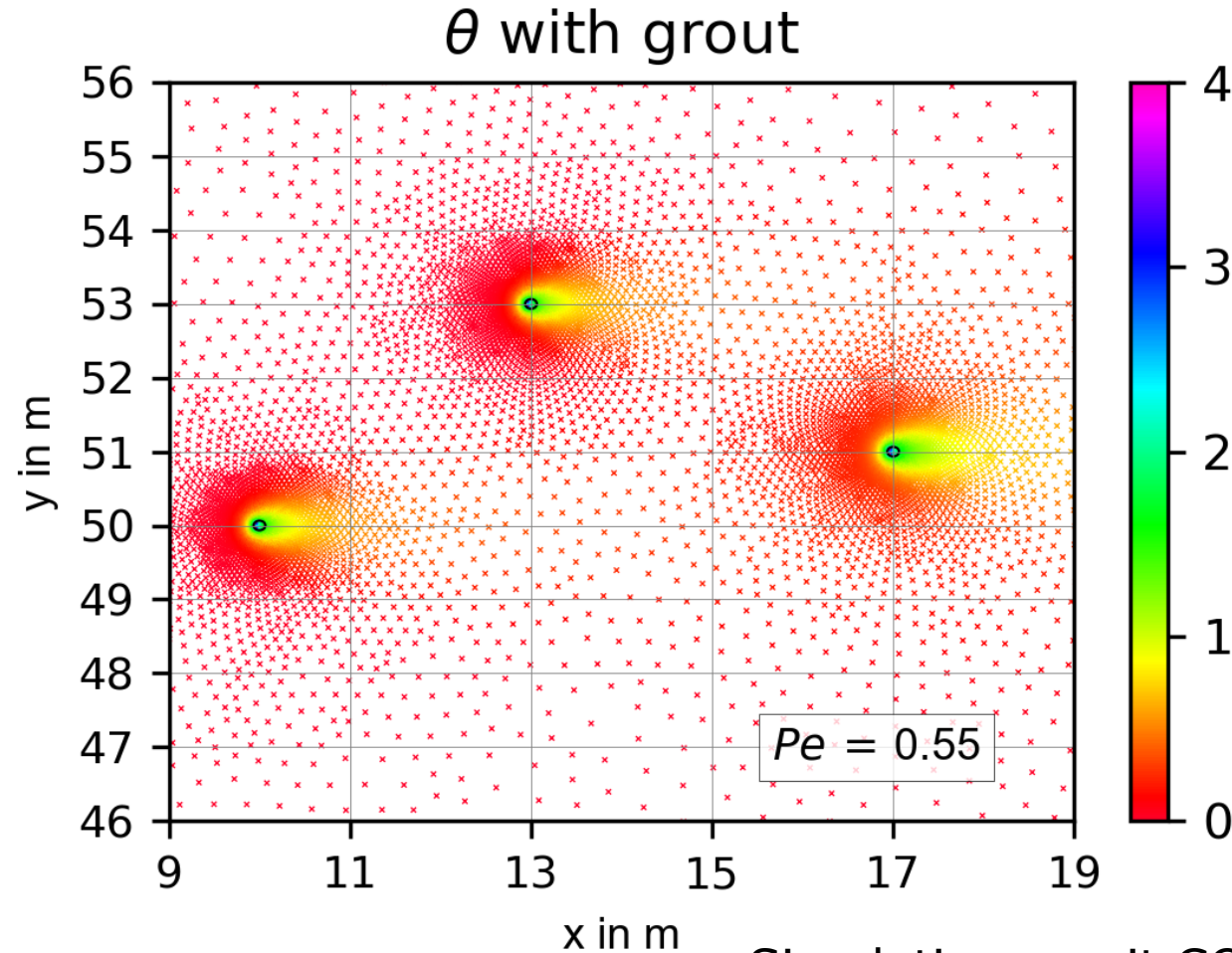


Temperaturfeld

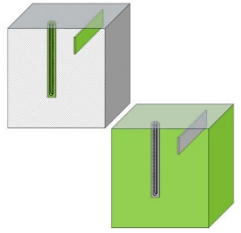
Bohrlöcher
verfüllt



Groundwater
flow
direction

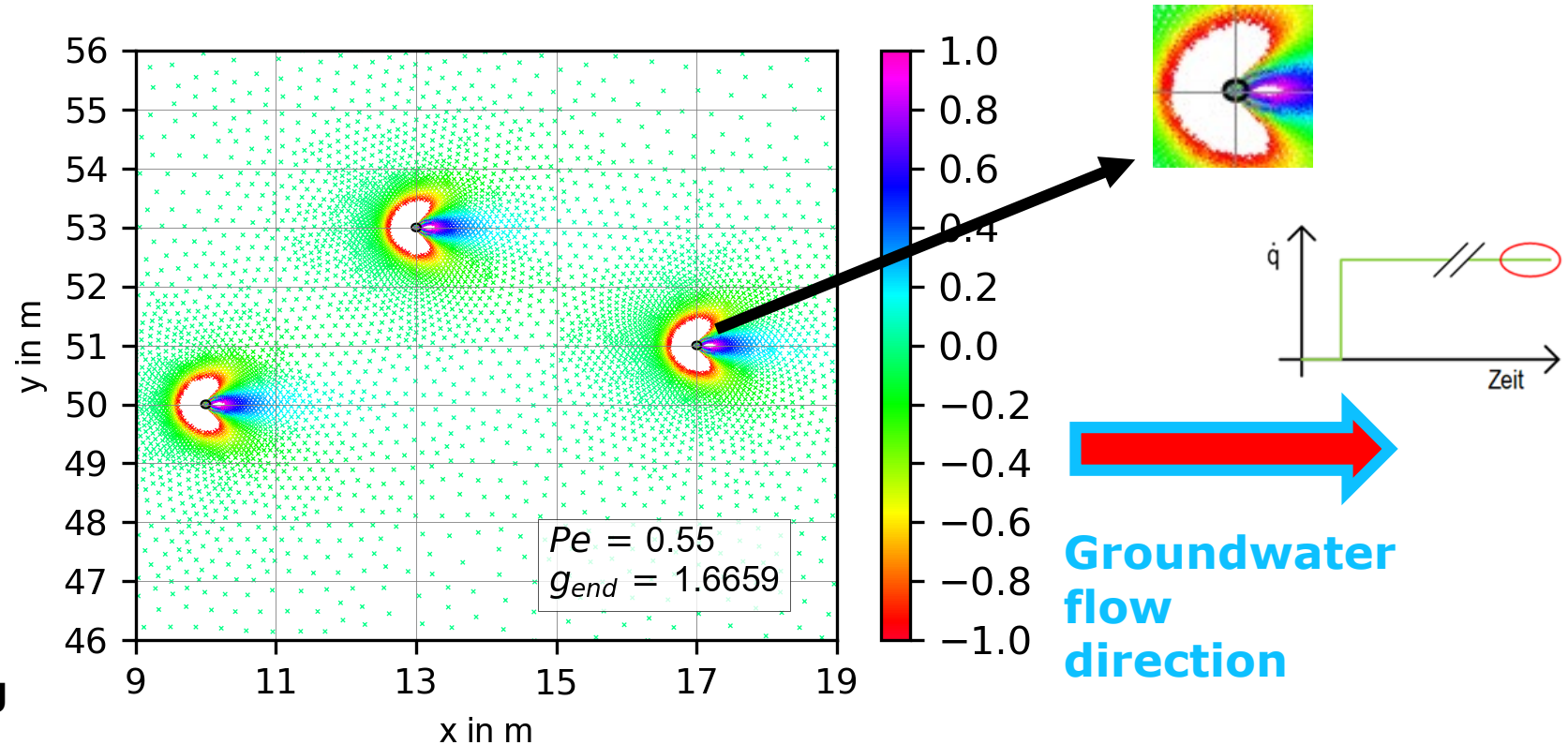


Simulationen mit COMSOL Multiphysics®



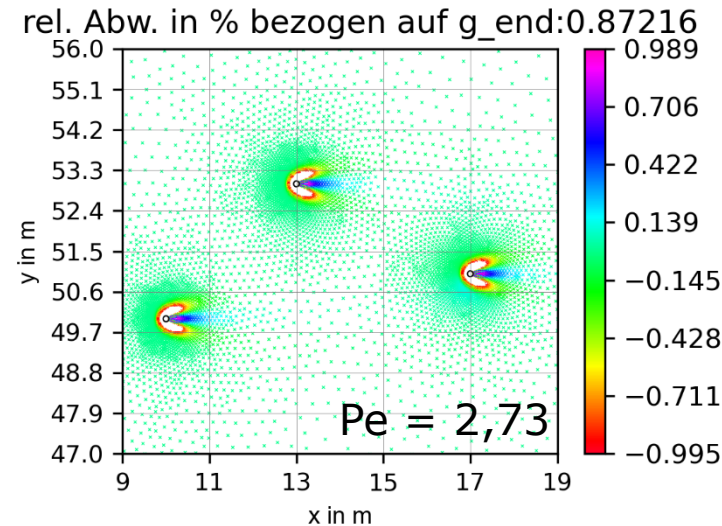
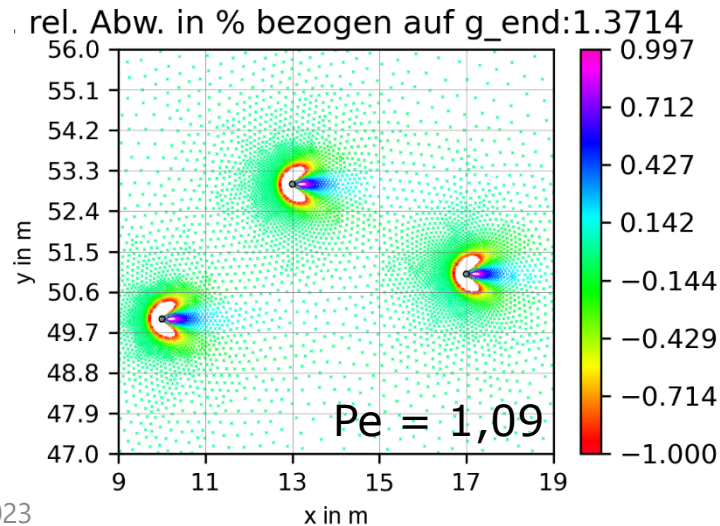
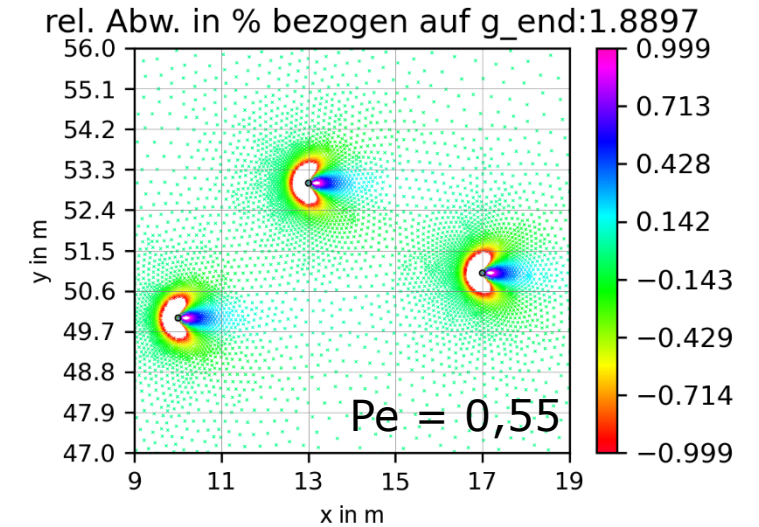
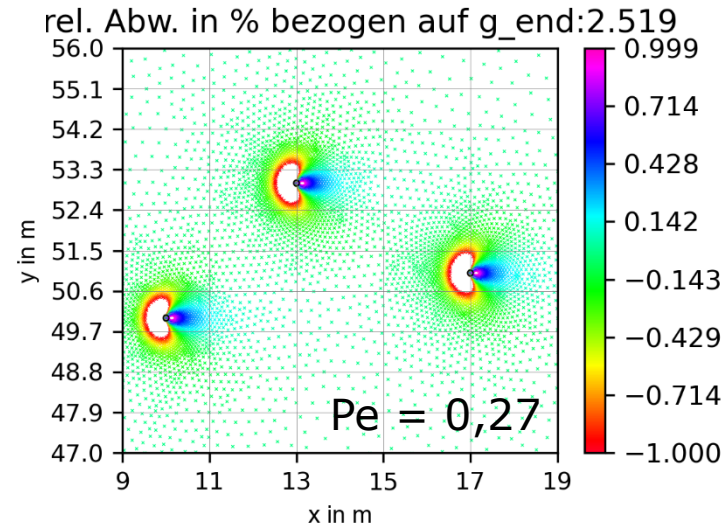
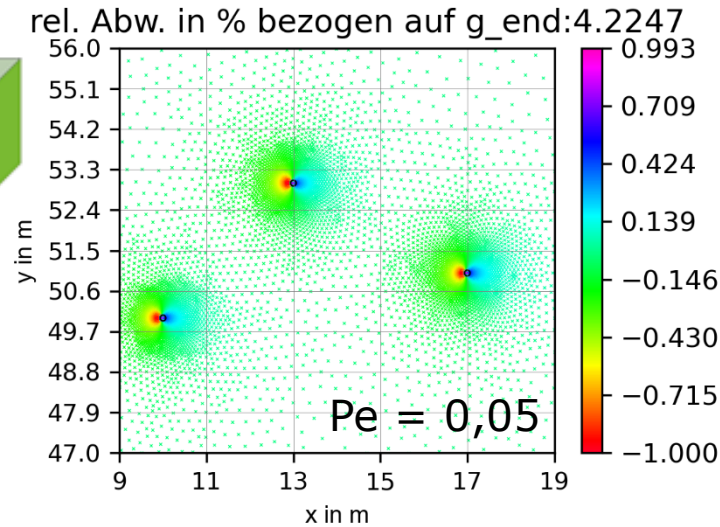
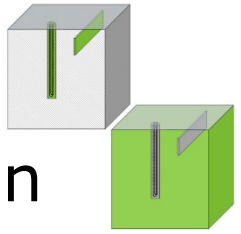
Relative Differenz Temperaturänderung mit & ohne Bohrlochverfüllung in %

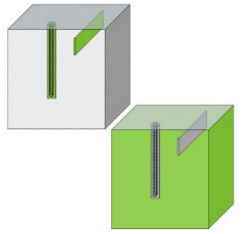
- Bohrlocheinfluss nur im Nahbereich (≈ 1 m)
- Analytische Lösung (Infinite Moving Line Source) hinreichend für Fernwirkung
- Korrektur am Bohrlochrand erforderlich
- **Analytisches Modell für EWS-Felder in Grundwasserströmung**



Simulationen mit COMSOL Multiphysics®

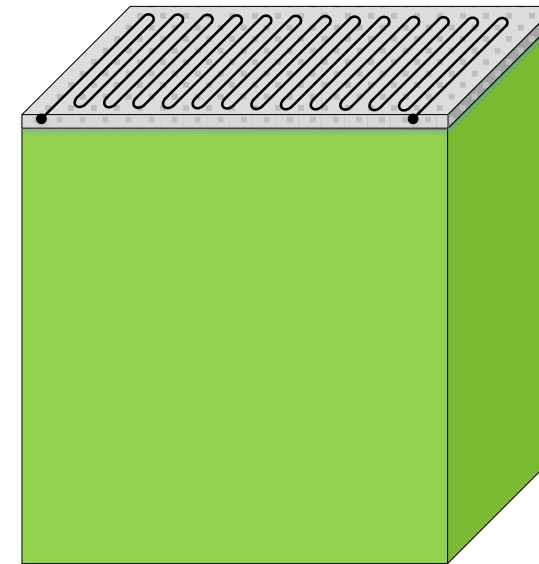
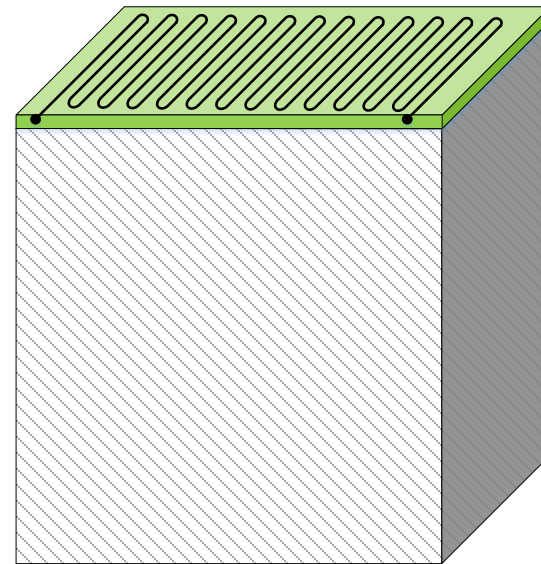
EWS-Feld mit und ohne Bohrloch- verfüllung - numerische Simulation: rel. Differenz für verschiedenen Pe-zahlen





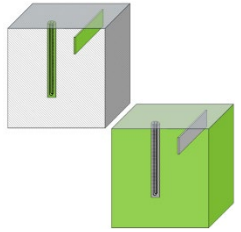
Vorgehen analog zu EWS und EWK: Unterteilung des Rechengebiets

Quellensystem Bodenabsorber



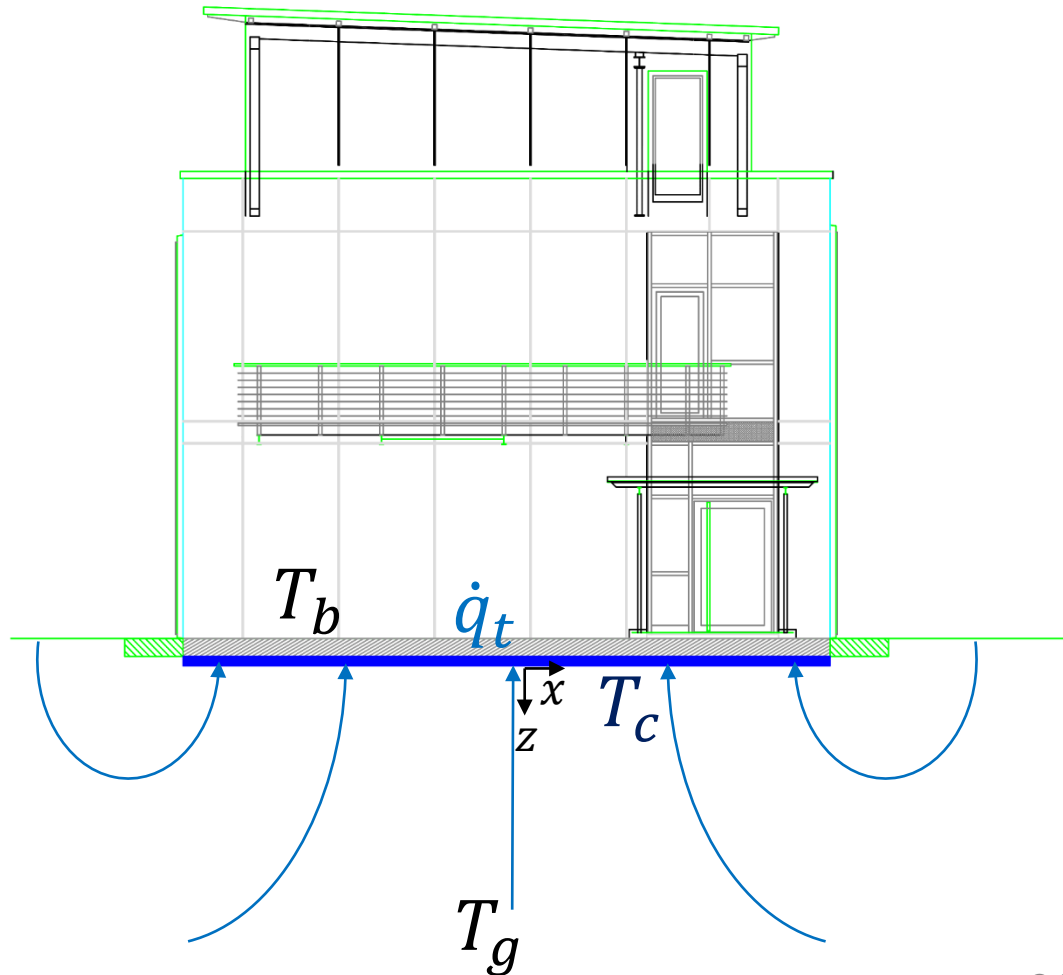
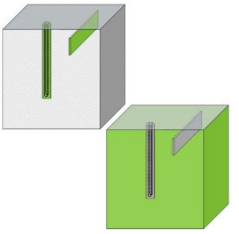
Angrenzender Untergrund

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

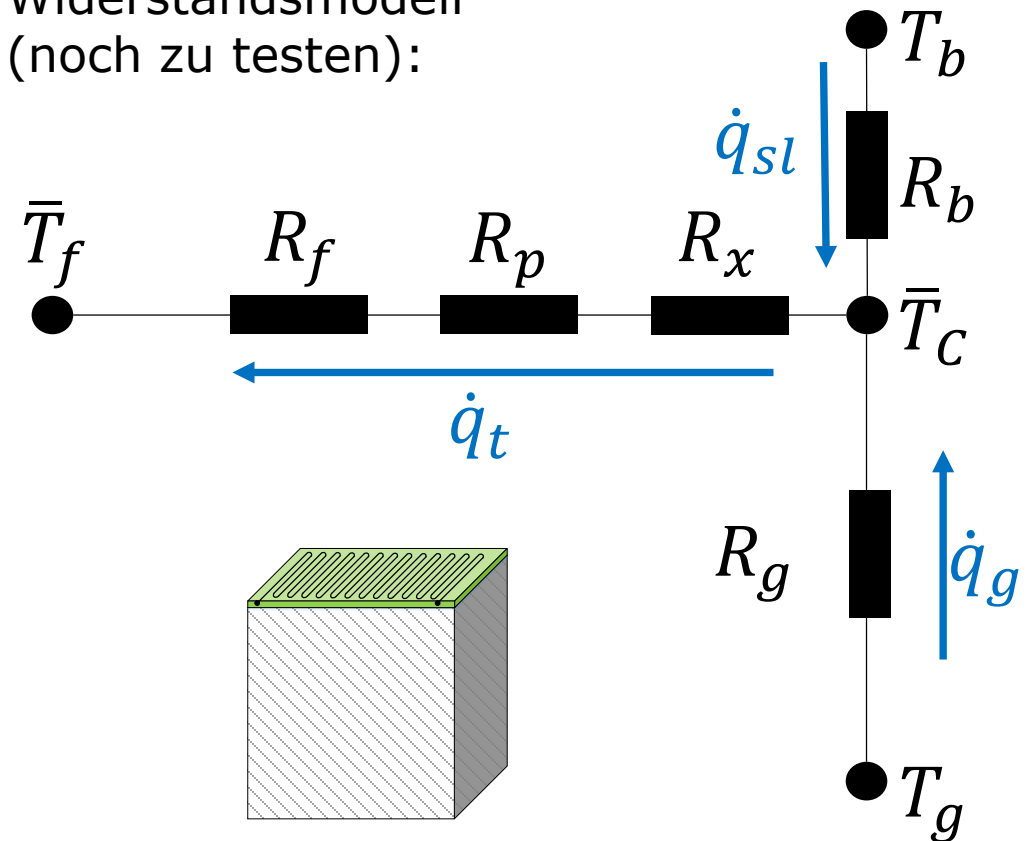


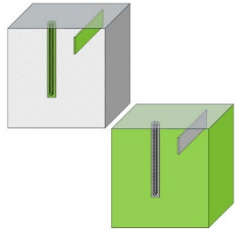
Durch den vorhandenen Bodenabsorber an der HBC ist nicht nur eine Validierung mittels Simulation, sondern auch durch Messungen möglich.

- 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 ($\text{TRT} \leftrightarrow \text{g-function}$) als auch dem Simulationsmodell



Erster Ansatz für das
Widerstandsmodell
(noch zu testen):

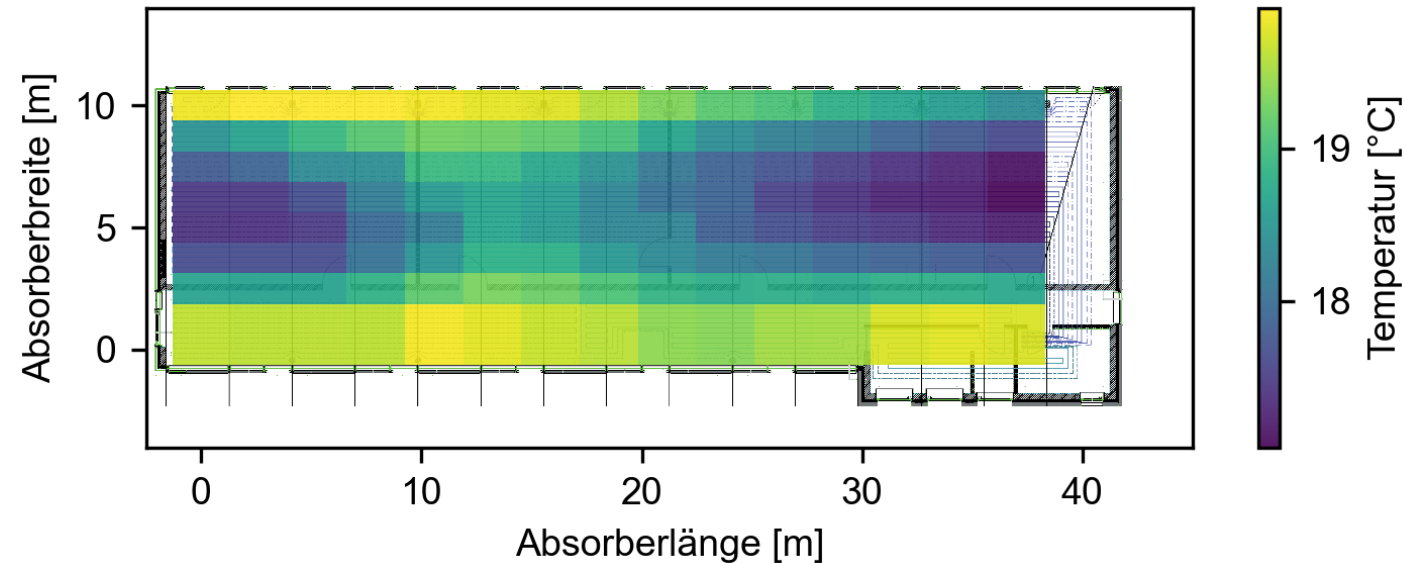
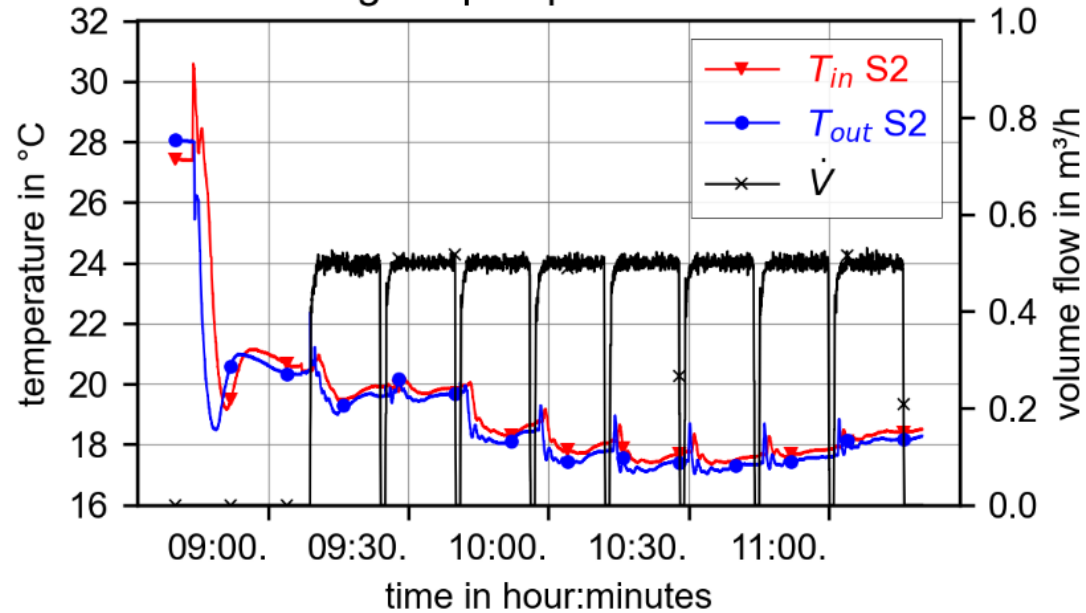


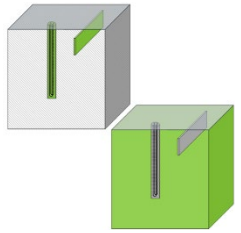


Ermittlung der ungestörten Temperatur des Bodenabsorbers:

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

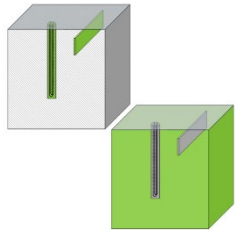


Versuch der Auswertung über IPS analog zum Vorgehen am EWK

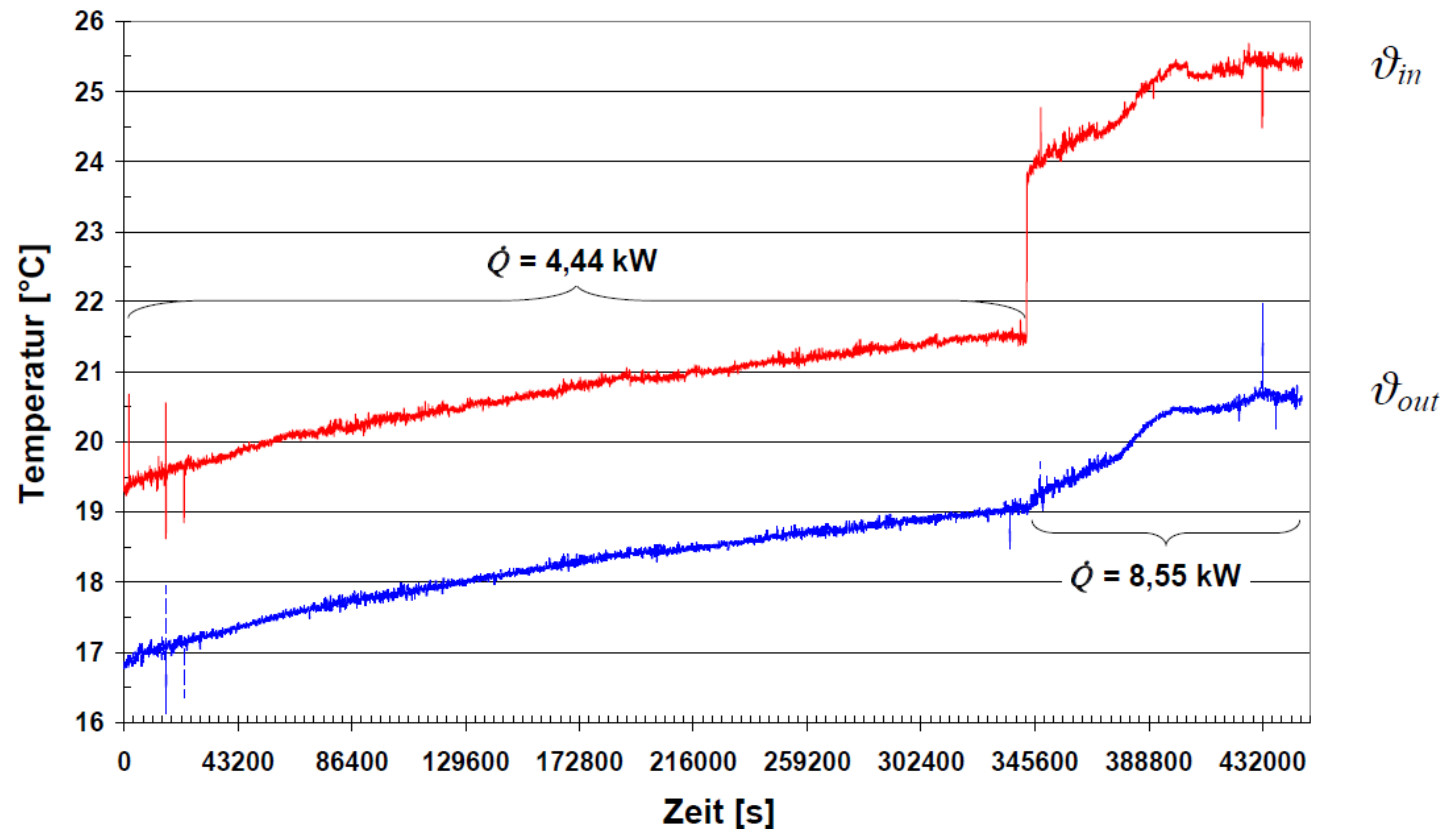
Lineare Regression der gemessenen Fluidmitteltemperatur	$\bar{T}_f(t) = k \cdot \sqrt{t} + m$
Berechnungsansatz für die Fluidmitteltemperatur	$\bar{T}_f(t) = \frac{\dot{q}}{\sqrt{\pi \lambda \rho c_p}} \cdot \sqrt{t} + R_c \cdot \frac{\dot{q}}{2} + T_0$
Ermittlung Wärmeleitfähigkeit des Erdreichs	$\lambda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

Literaturhinweis:

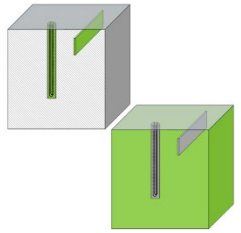
Van de Ven, A. Neth, F., Kainzlsperger, M., Koenigsdorff, R.: Thermal Response Tests an Erdwärmekollektoren, Geothermische Energie, Heft 104, Februar 2023



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



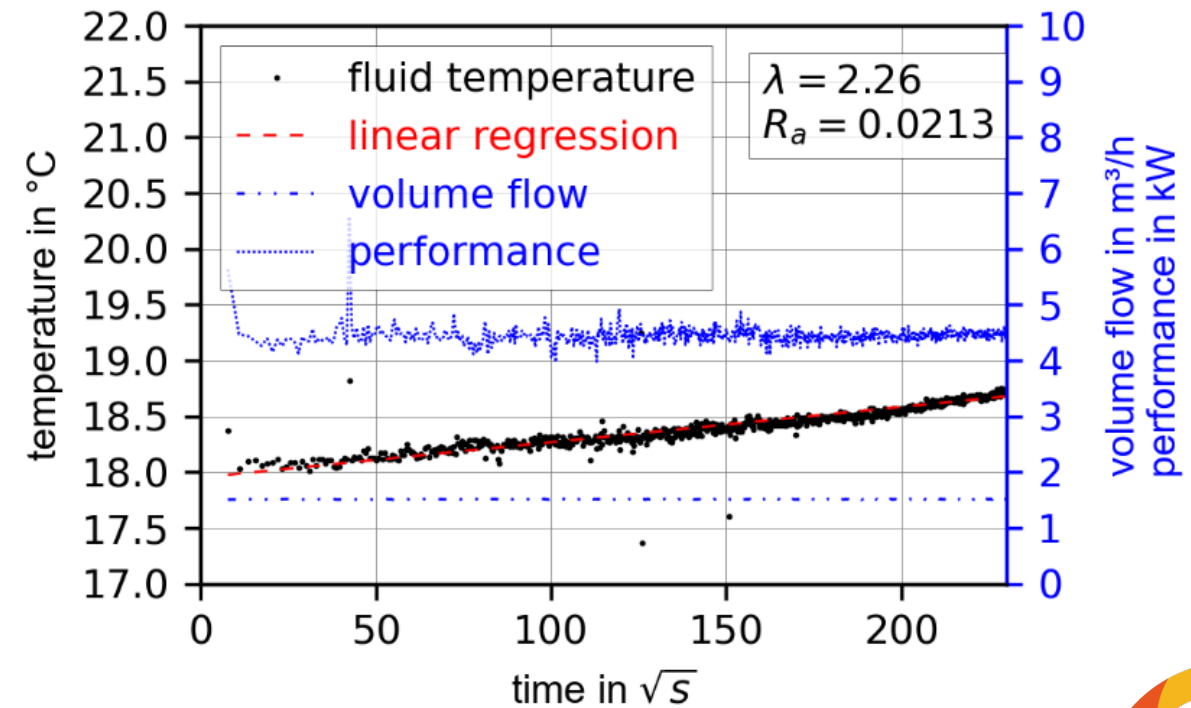
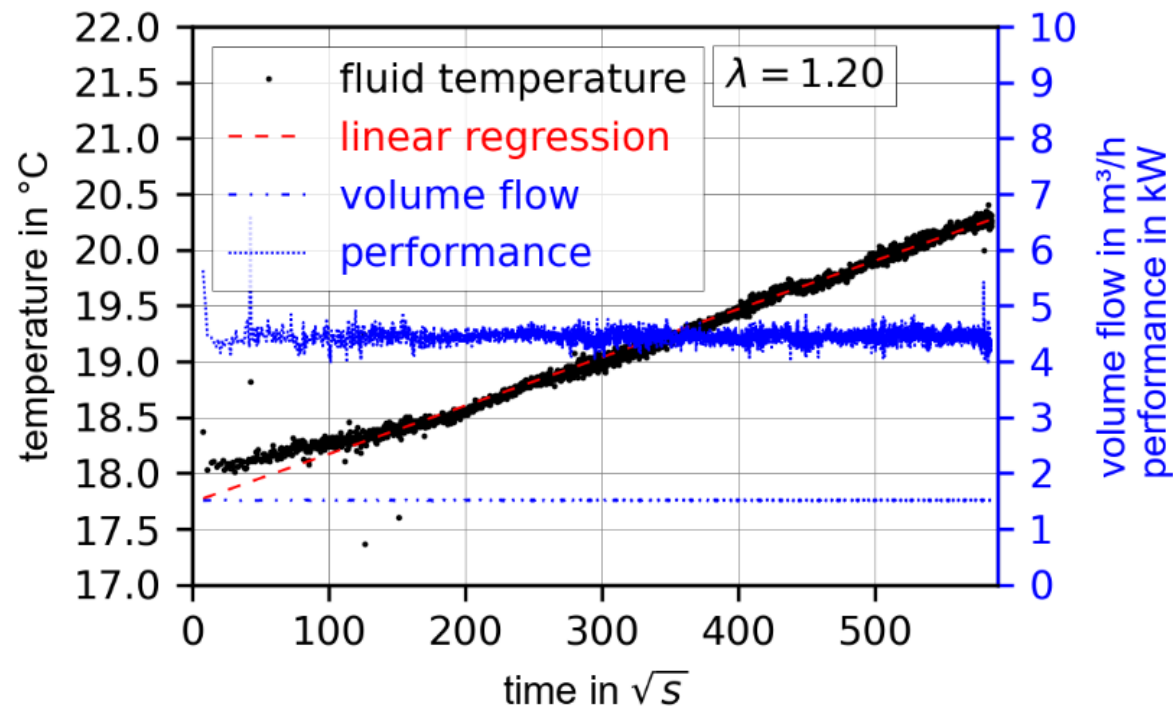
Quelle:
Koenigsdorff R., Feuerstein P., Köhler A.,
Thermal Response Tests an geothermischen
Flächensystemen. Vortrag am Symposium 10
Jahre Thermal Response Test in Deutschland,
Göttingen, Deutschland, 2009

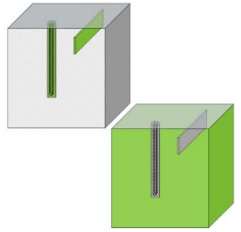


Literaturhinweis:
Van de Ven, A. Neth, F., Kainzlsperger, M.,
Koenigsdorff, R.: Thermal Response Tests
an Erdwärmekollektoren, Geothermische
Energie, Heft 104, Februar 2023

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

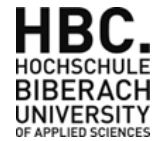
Vielen Dank für die Aufmerksamkeit!

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
ISE

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

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