

GeoTHERM expo & congress, 1.3.2024



Qualitätssteigerung  
oberflächennaher Geothermiesysteme

Vertikale hydraulische Abdichtung von  
EWS-Bauwerken – Ergebnisse aus dem  
Verbundprojekt QEWSplus

Micha Pinnekamp, Lukas Pendzich, Dr. Jens Kuckelkorn,  
Yannick Reduth, Tim Theophil, Ludwig Grosch,  
Xaver Meyer, Armin Kuckelkorn

The logo for HBC. Hochschule Biberach University of Applied Sciences, featuring the text 'HBC.' in a large, bold, black font, with 'HOCHSCHULE BIBERACH UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES' in a smaller, black font below it.

The logo for Burkhardt Geologische und hydrologische Bohrungen, featuring the name 'BURKHARDT' in a large, bold, black font, with 'Geologische und hydrologische Bohrungen' in a smaller, black font below it, all set against a blue background.

The logo for eifer, featuring the name 'eifer' in a lowercase, blue, sans-serif font, with a green graphic element consisting of three horizontal bars of varying lengths to the left.

The logo for Hauri, featuring the name 'HAURI' in a large, bold, black, sans-serif font, with a graphic element of three horizontal bars to the left.

The logo for H.S.W. Ingenieurbüro, featuring the text 'H.S.W.' in a large, bold, black font, with 'Ingenieurbüro' in a smaller, black font below it, and 'Gesellschaft für Energie und Umwelt mbH' in a very small, black font at the bottom.

The logo for KIT (Karlsruher Institut für Technologie), featuring the text 'KIT' in a large, bold, black font, with 'Karlsruher Institut für Technologie' in a smaller, black font below it, and a graphic element of a fan-like shape to the left.

The logo for solites, featuring the name 'solites' in a lowercase, red, sans-serif font.

Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Klimaschutz

The logo for Fraunhofer ISE, featuring the text 'Fraunhofer' in a bold, black font, with 'ISE' in a smaller, black font below it, and a green graphic element consisting of several horizontal lines to the left.

In Zusammenarbeit mit:



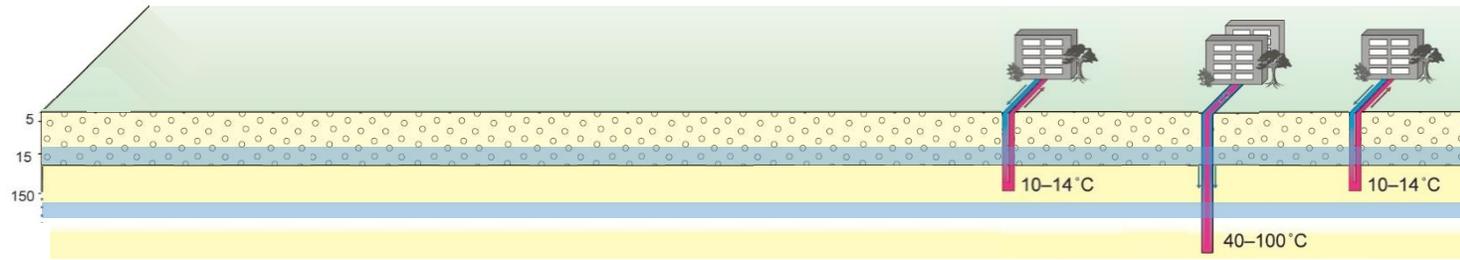
ZAE BAYERN

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages



Teilprojekt 3.2  
 Ermittlung der hydraulischen Durchlässigkeit von Systemproben

Teilprojekt 3.3  
 Realitätsnahe Kombination von Untersuchungsaspekten von Filtrationseffekten



© Bayerisches Landesamt für Umwelt (verändert)

**Motivation**

Schutz des Grundwassers  
 und Vermeidung des Wasseraustausches  
 zwischen Grundwasserstockwerken

**Ziel**

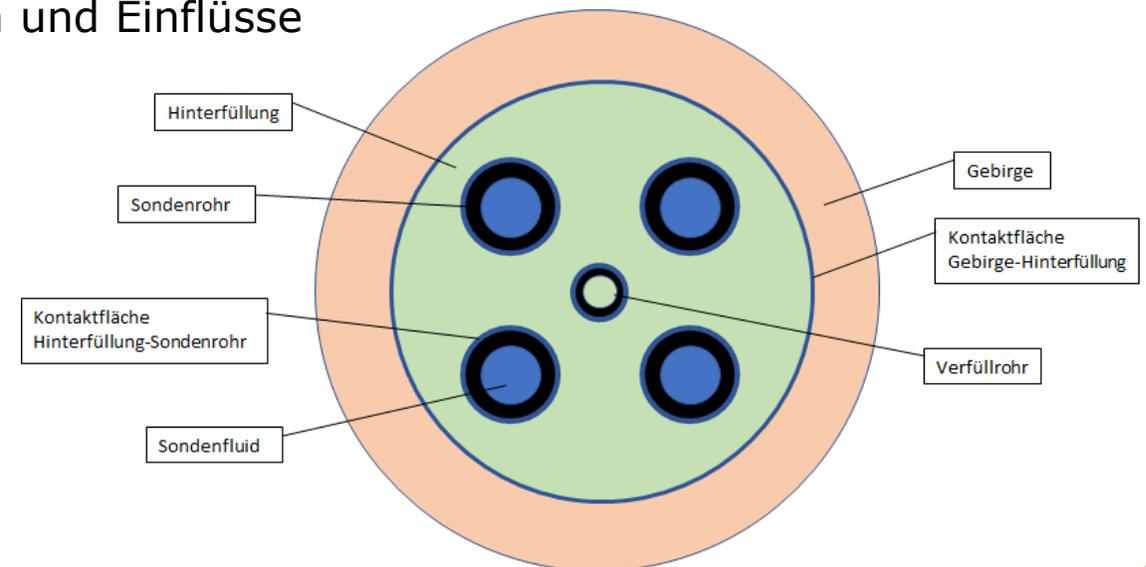
EWS-Bauwerke  
 mit geringer vertikaler  
 hydraulischer Durchlässigkeit<sup>a)</sup>



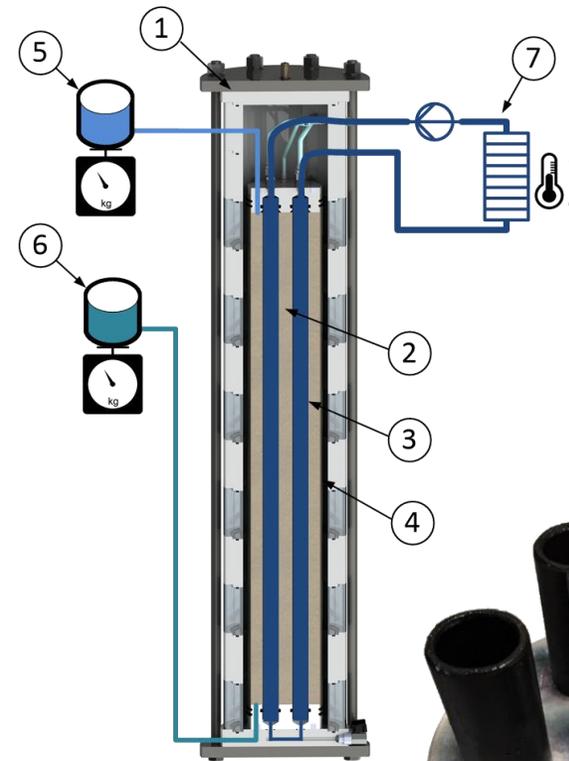
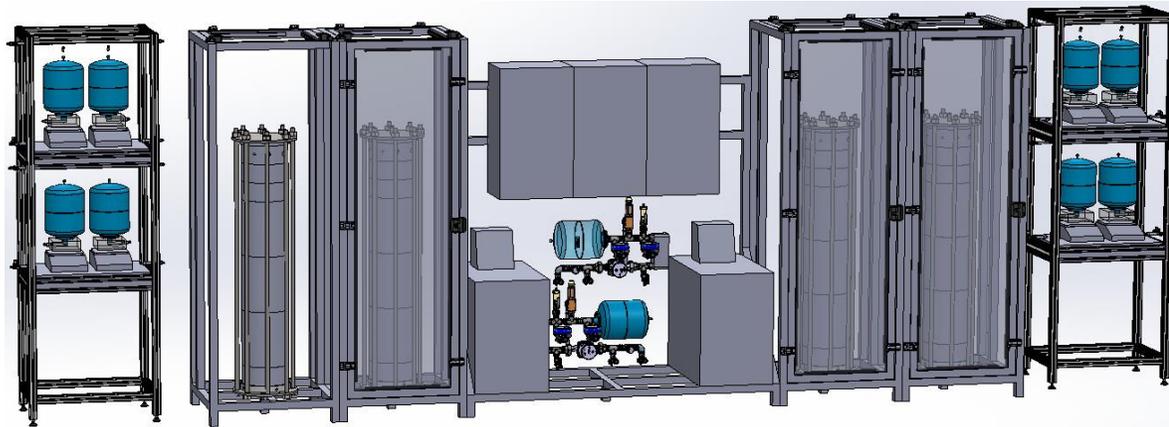
a) Staatliche Geologische Dienste der Deutschen Bundesländer: „Ad-hoc-Arbeitsgemeinschaft Hydrogeologie – Empfehlungen zur Durchlässigkeit“, 2015

## Weg zum Ziel

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



# Ermittlung der hydraulischen Durchlässigkeit von Systemproben

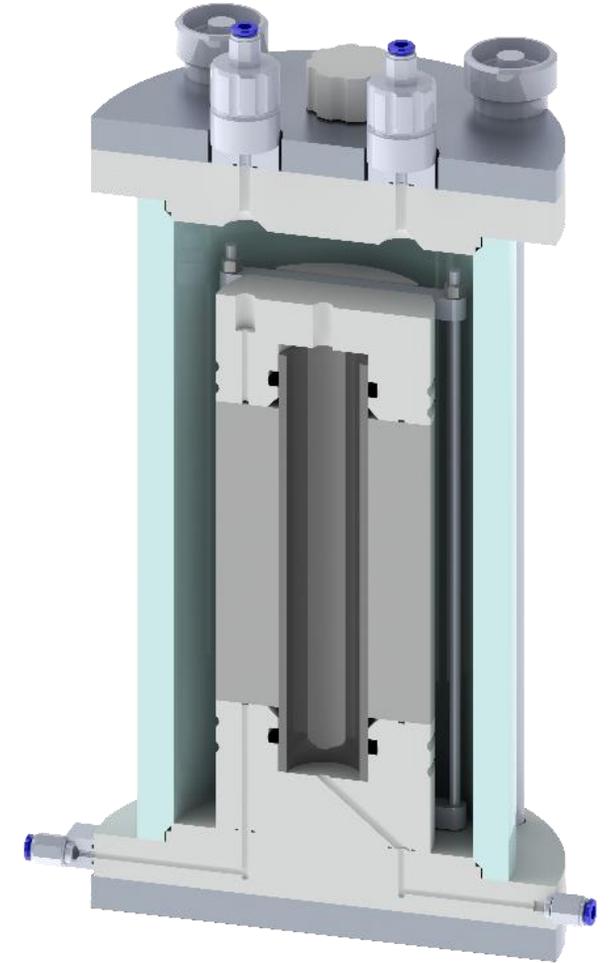


Systemtriaxialzelle (ST)

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



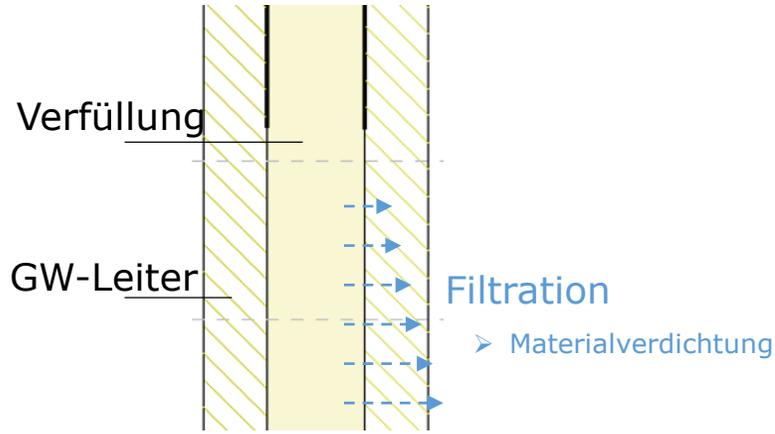
# Zusätzliche Untersuchungen an modifizierten Triaxialzellen und Vollproben



# Versuchsübersicht

Verfüllbaustoff	TP3.2		TP3.3		Modifizierte Triaxialzellen
	Probe 1	Probe 2	Probe 3 Referenz	Probe 4 filtriert	
1. Ringversuch quarzbasiert					
2. Ringversuch phonolitbasiert					
3. Ringversuch graphitbasiert					 <p>+ 3 Proben tonbasiert, mit PE-Rohr 3 Proben Tonpellets mit PE-Rohr</p>

# Realitätsnahe Kombination von Untersuchungsaspekten von Filtrationseffekten



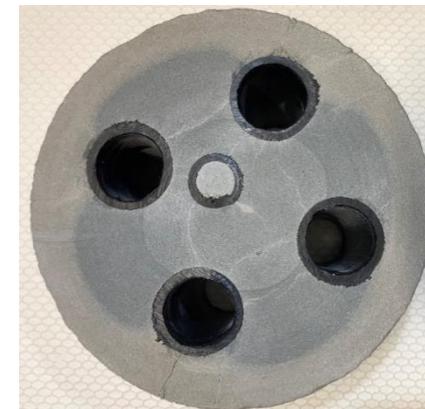
© Solites / QEWS+ Projektpartner



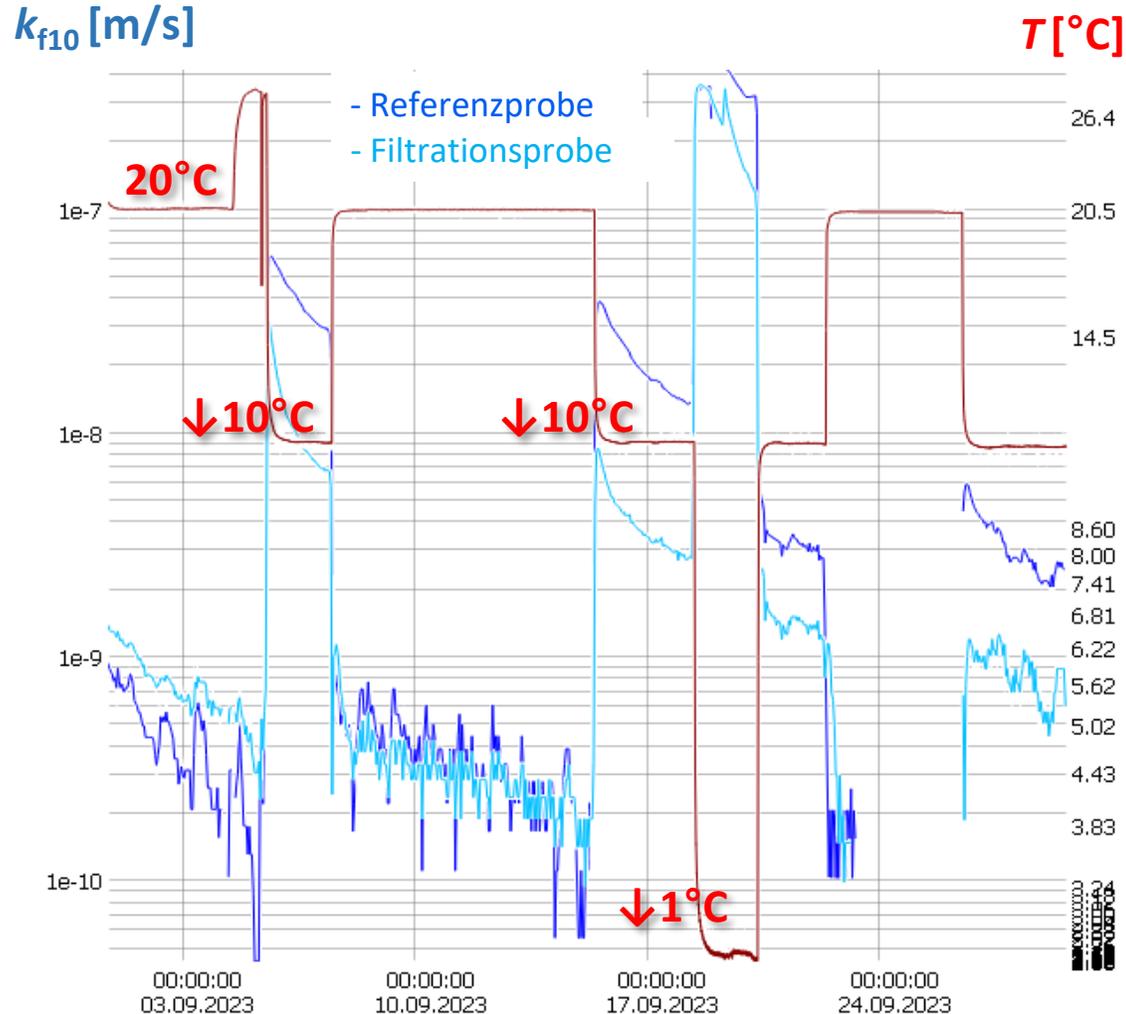
Querschnitt der  
 Referenzprobe  
 Baustoffdichte:  
 1,76 kg/l



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



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



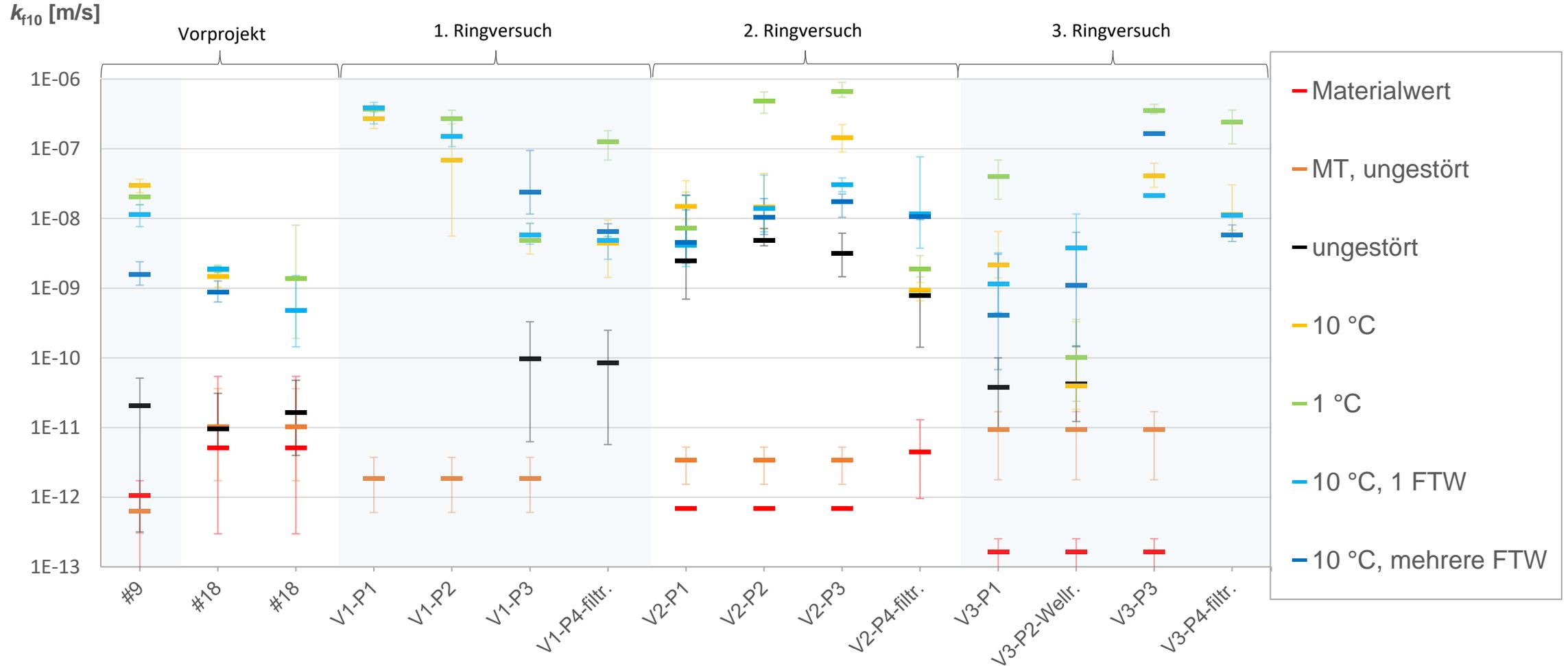
## Temperaturabhängigkeit

- Systemdurchlässigkeit ist temperaturabhängig
- $k_f$ -Veränderungen sind qualitativ reproduzierbar
- $T < 10$  °C führt zu deutlich höheren  $k_f$ -Werten

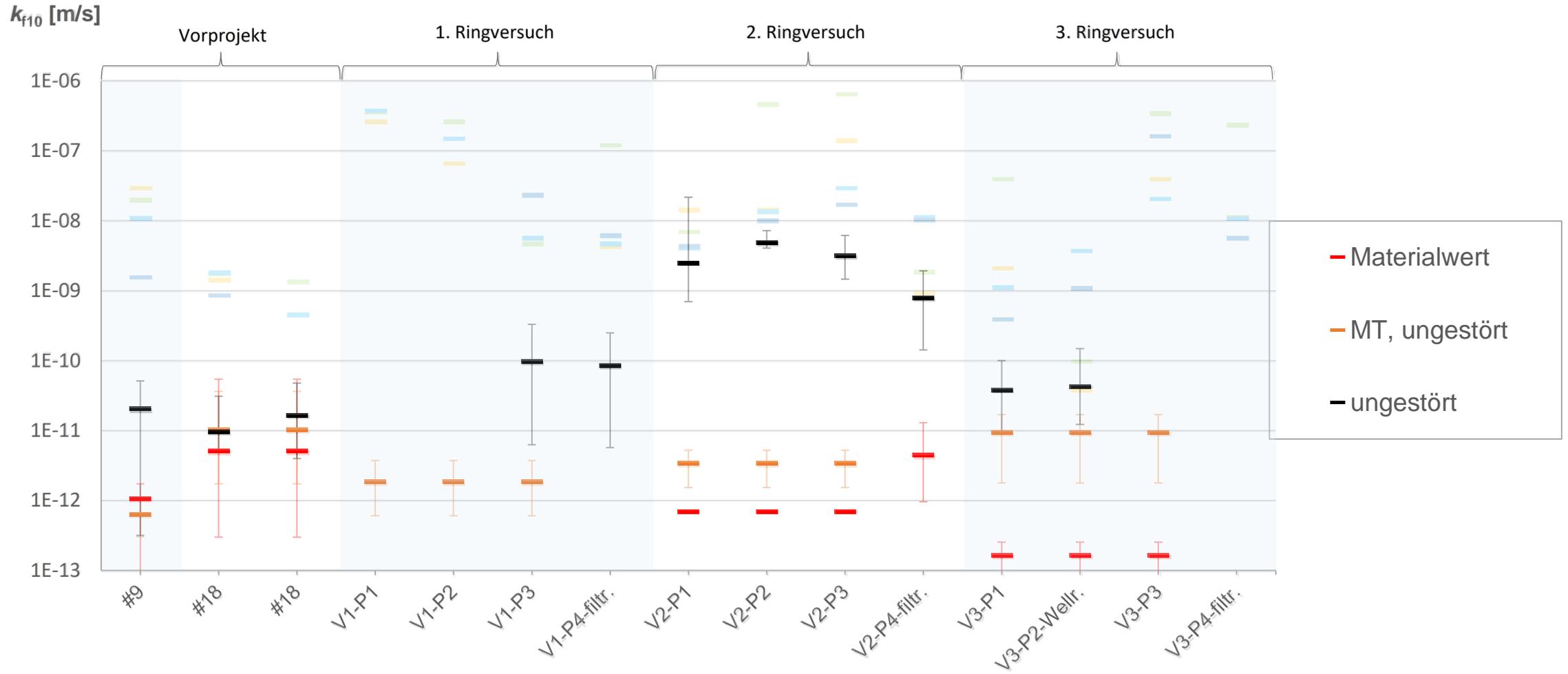
## Zeitabhängigkeit

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

# Ergebnisse aller vermessenen Proben

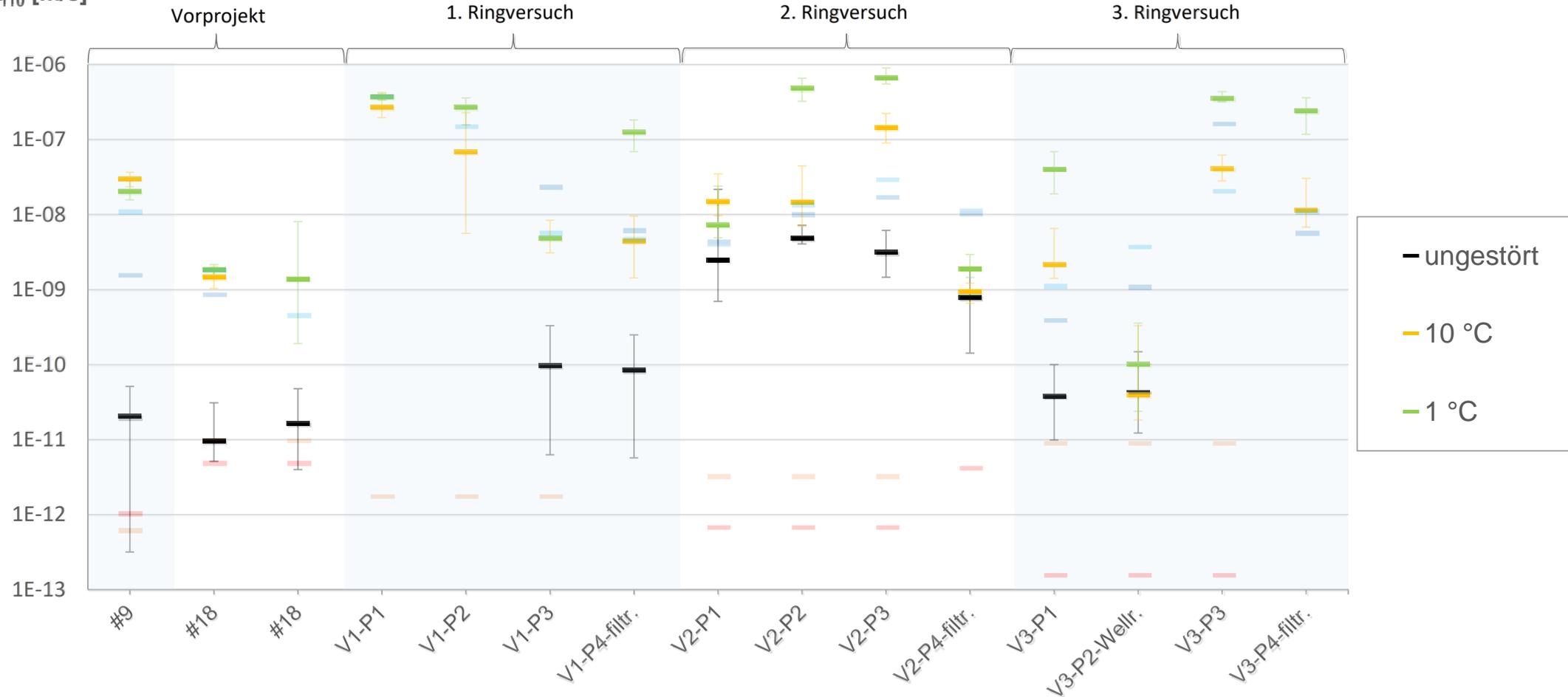


# Vergleich zwischen Vollproben, MTs und STs

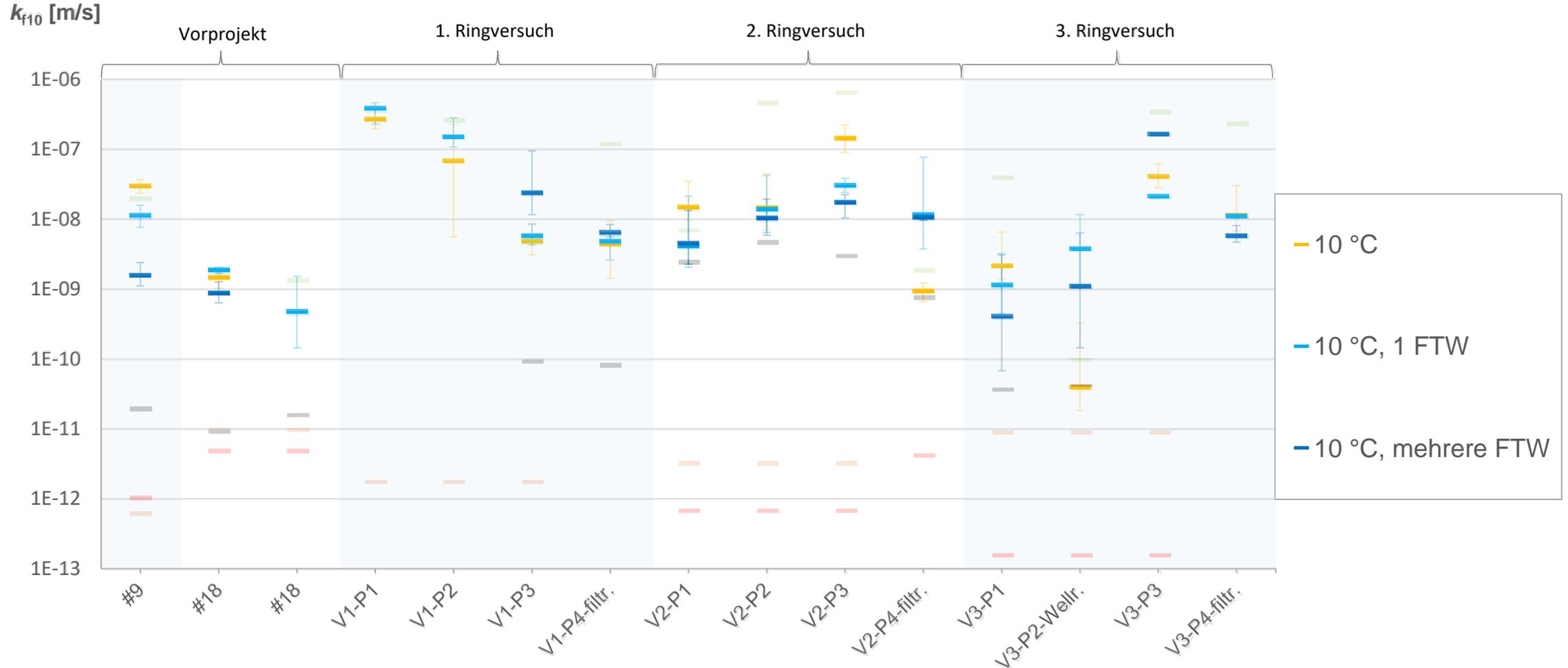


# Anfängliche Temperierung

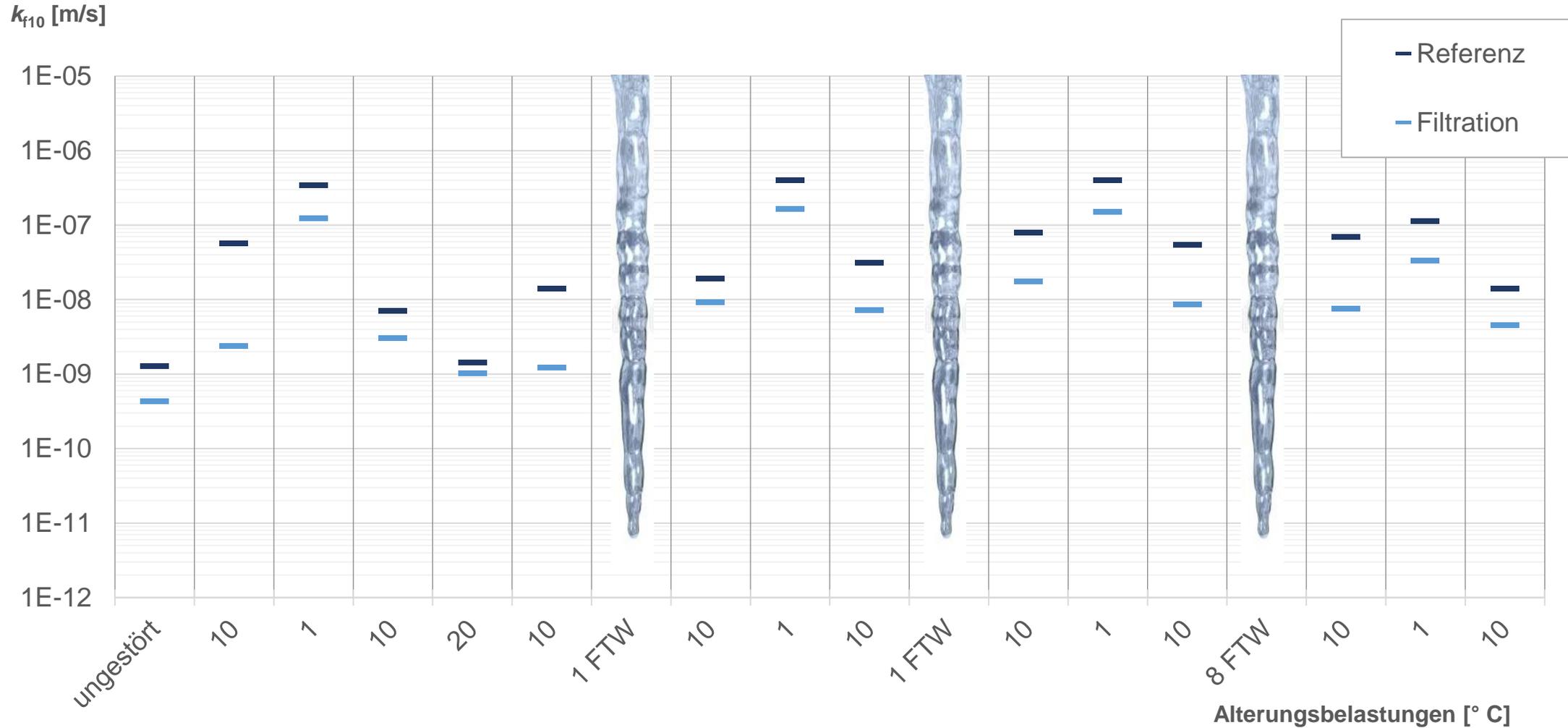
$k_{f10}$  [m/s]



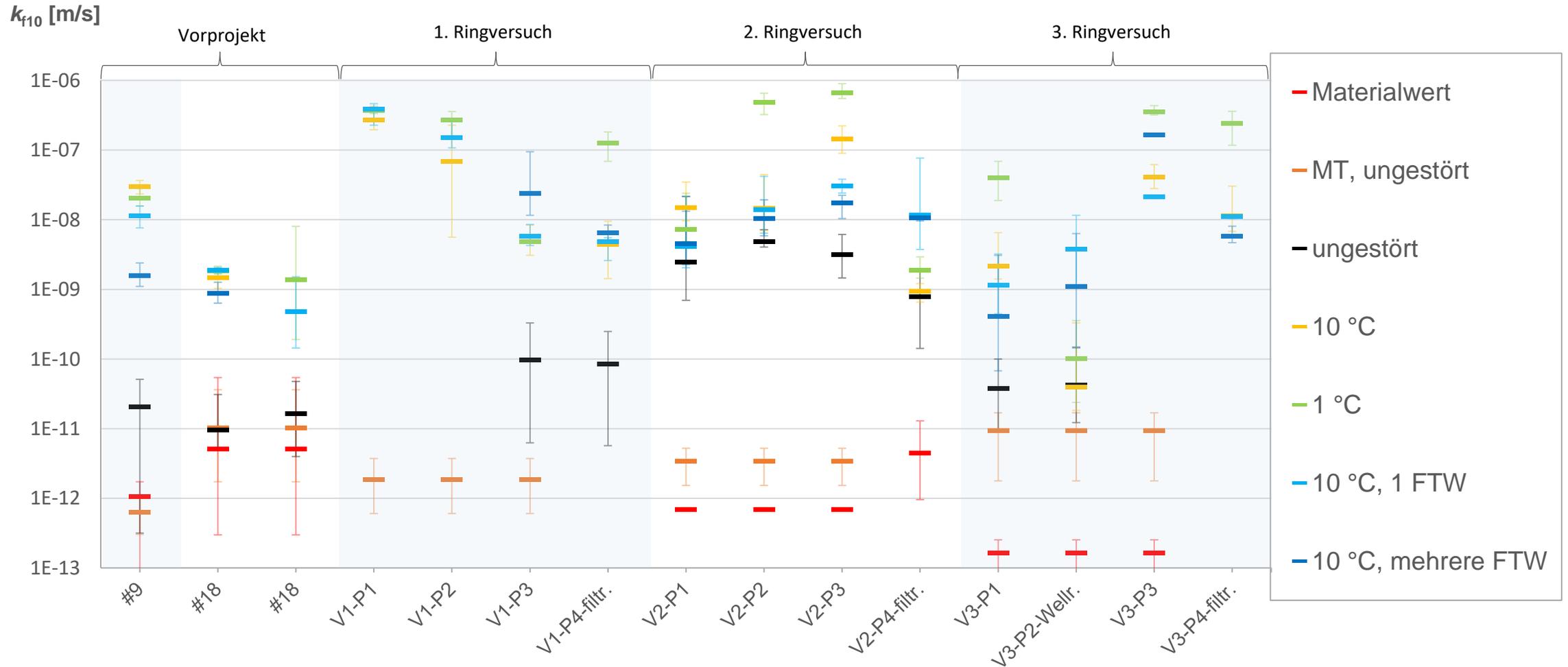
# Frost-Tau-Wechsel haben untergeordneten Effekt auf Durchlässigkeit



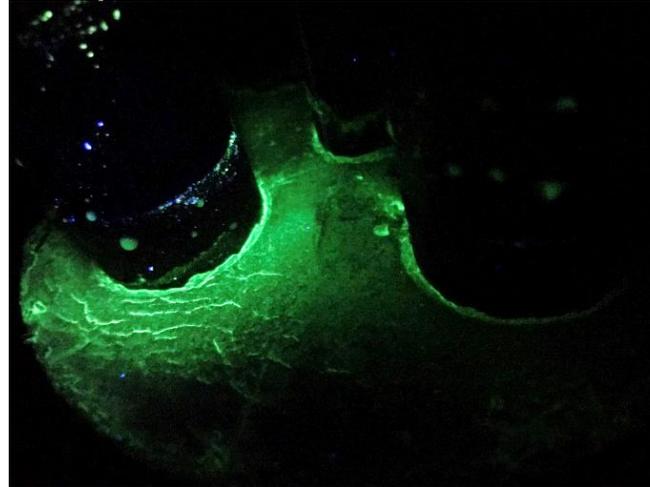
# Auswirkungen der Filtration



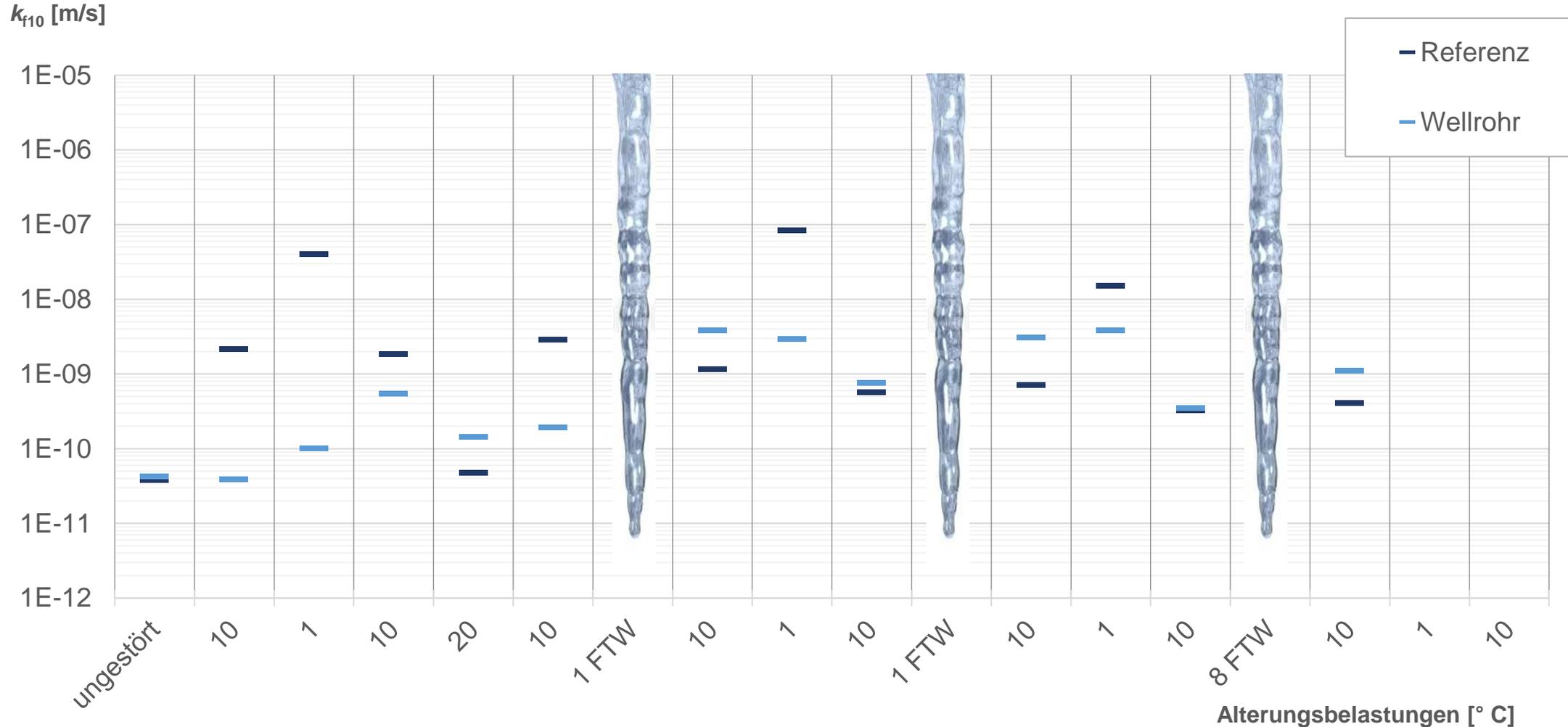
# Empfohlene Grenzwerte können im Betrieb nicht eingehalten werden



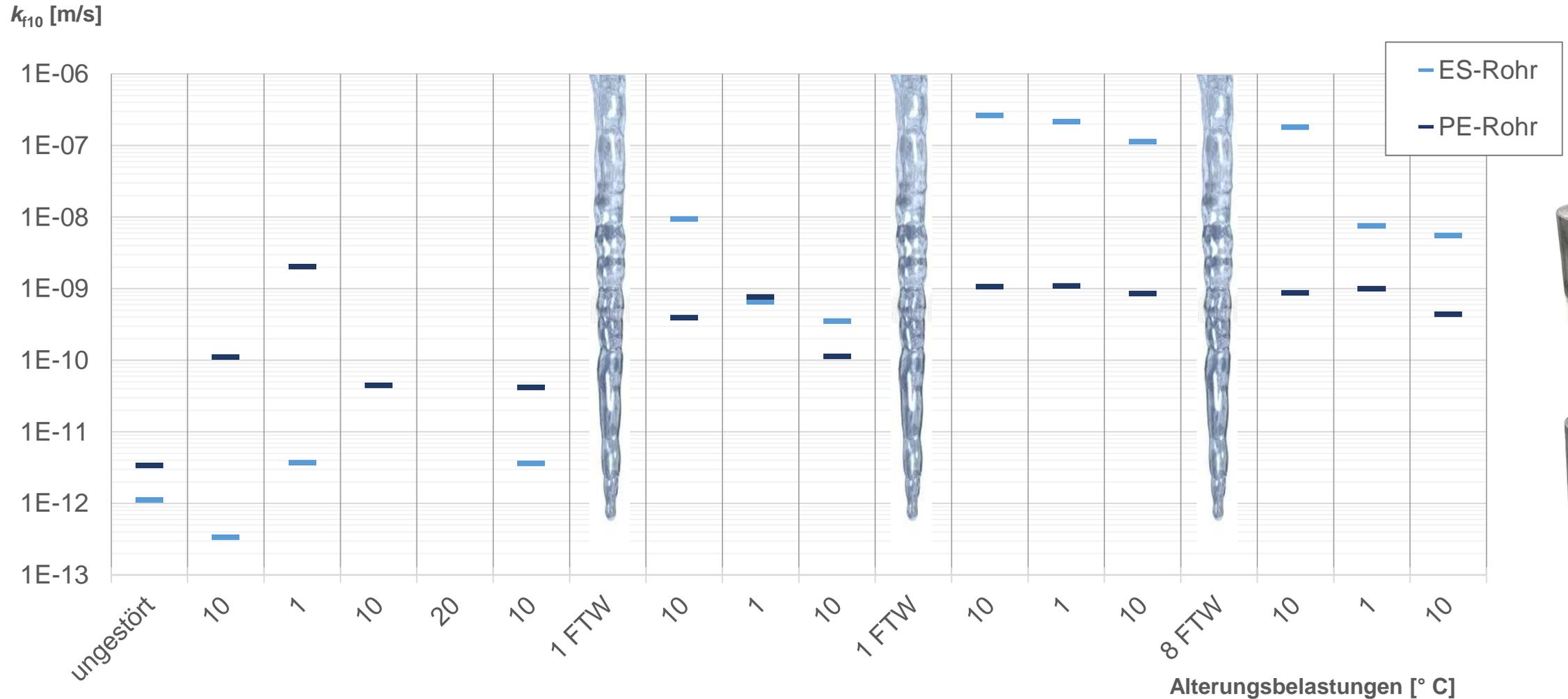
# Ringspaltbildung an den Sondenrohren



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



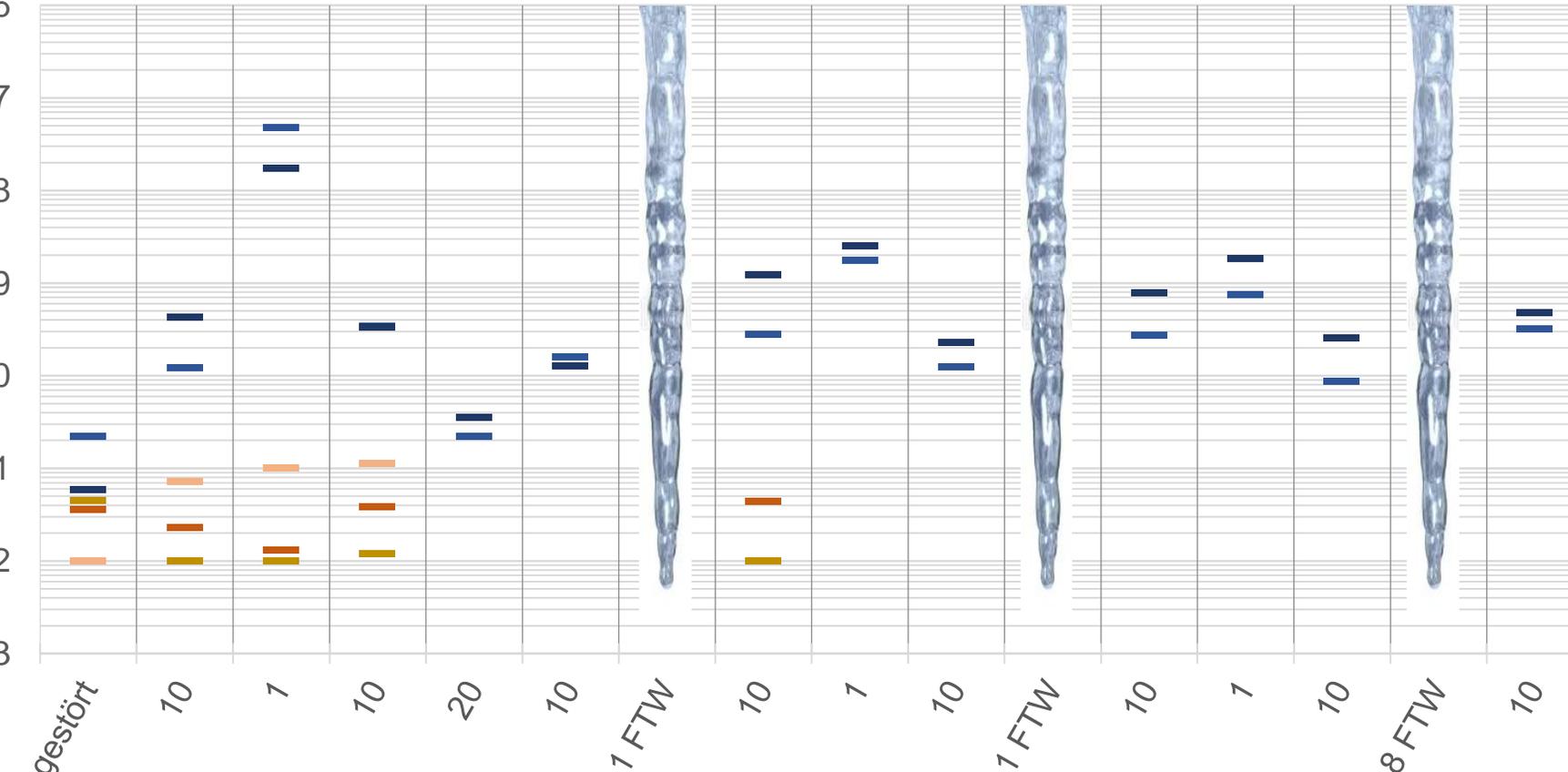
# Einmaliger Versuch an Proben mit zentralem Edelstahlrohr in modifizierter Triaxialzelle



# Einmaliger Versuch an Tonpelletproben im Vergleich zu zementbindenden tonbasierten Verfüllmaterialien

$k_{f10}$  [m/s]

1E-06  
 1E-07  
 1E-08  
 1E-09  
 1E-10  
 1E-11  
 1E-12  
 1E-13



- P1-Tonpellets
- P2-Tonpellets
- P3-Tonpellets
- P4-tonbasiert
- P5-tonbasiert



Alterungsbelastungen [° C]

- 1) Ungestörter  $k_{f10}$ -System-Wert zeigt sehr geringe Durchlässigkeit, jedoch sehr sensible Systemprobenherstellung
- 2) Sondenfluiddruck- und -temperaturvariationen haben einen gravierenden Einfluss auf die Durchlässigkeit (Randumläufigkeiten am Sondenrohr aufgrund von Ringspaltbildung)
  - Ab erster Temperaturabsenkung auf 10 °C: erhebliche Erhöhung der Durchlässigkeit um mehrere Zehnerpotenzen
  - Durchlässigkeitserhöhungen können teilweise durch Temperaturanstieg, Gegendruck und Zeitfaktor kompensiert werden
- 3) Der Einfluss von Frost-Tau-Wechseln auf die Systemdurchlässigkeit der untersuchten Verfüllbaustoffe war in Relation zu Punkt 2) vergleichsweise gering
- 4) Filtrierte Systemproben: ähnliches hydraulisches Verhalten wie bei unfiltrierten Systemproben
- 5) Ansätze wie Wellrohre und Tonpellets sollen weiter untersucht werden

# Vertikale hydraulische Abdichtung von EWS-Bauwerken

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

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.

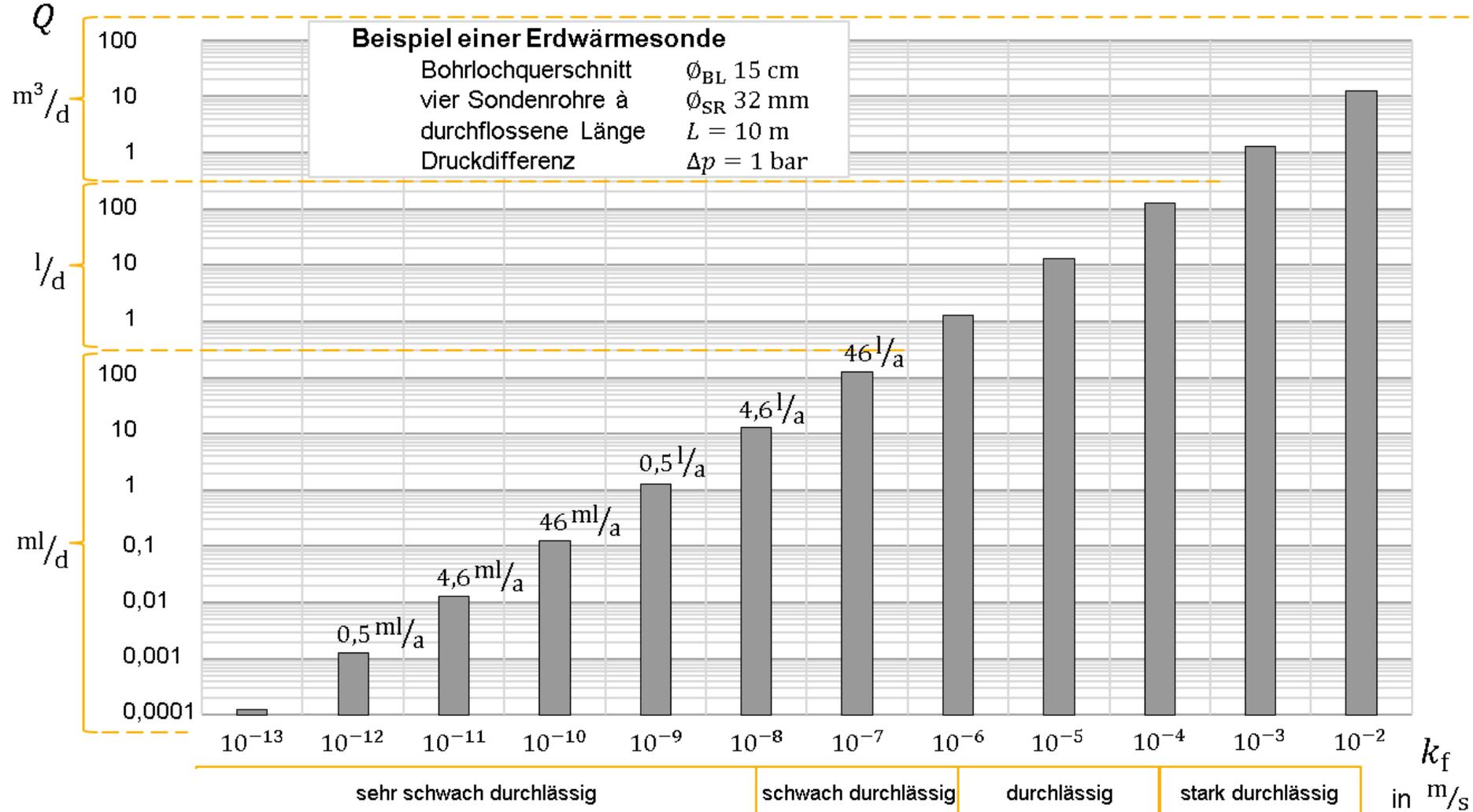
Peter Osgyan | [peter.osgyan@zae-bayern.de](mailto:peter.osgyan@zae-bayern.de) | [www.zae-bayern.de](http://www.zae-bayern.de)



Qualitätssteigerung  
oberflächennaher Geothermiesysteme

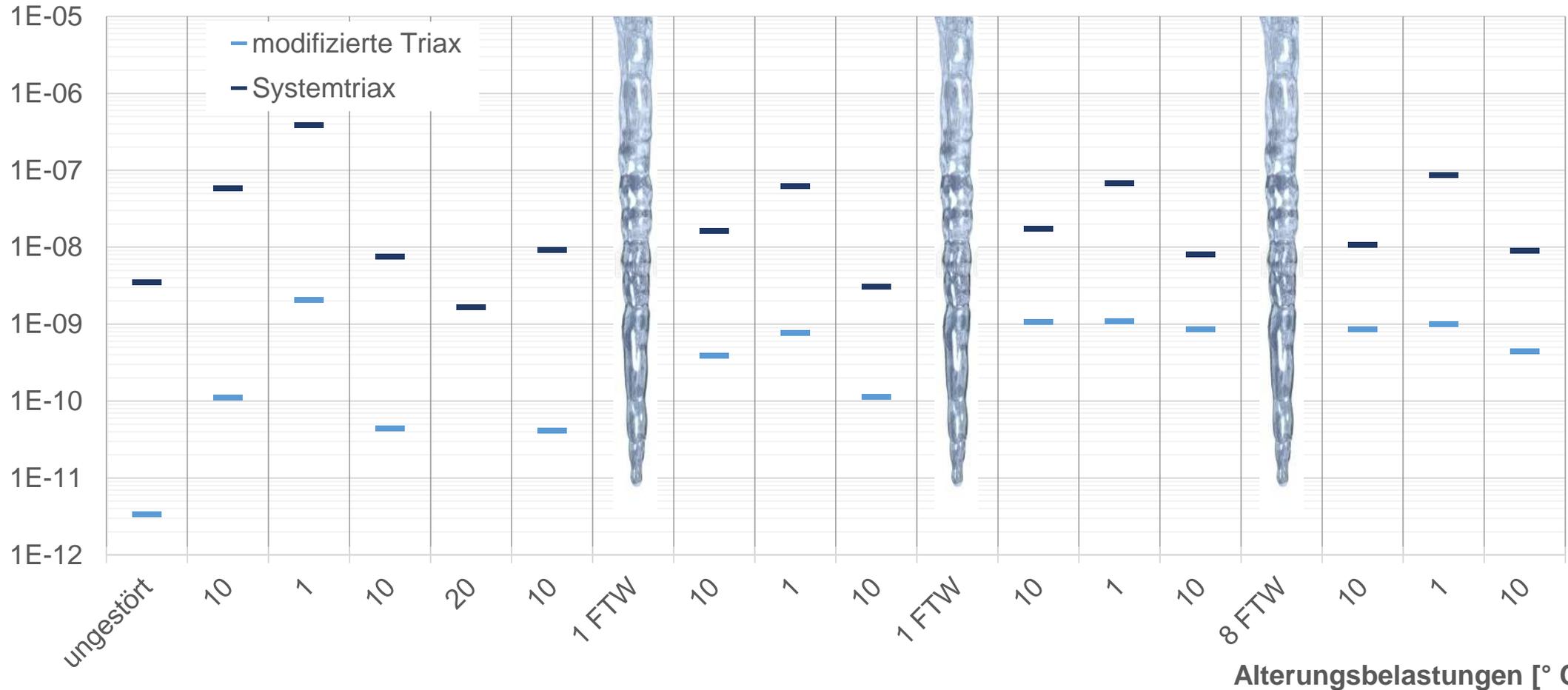
Micha Pinnekamp  
ZAE Bayern e. V.  
Walther-Meißner-Straße 6, 85748 Garching  
Tel.: +49 89 329442-25  
[micha.pinnekamp@zae-bayern.de](mailto:micha.pinnekamp@zae-bayern.de)

# Beispiel für Volumenstrom



# Modifizierte Triax vs. Systemtriax (2. Ringversuch)

$k_{f10}$  [m/s]



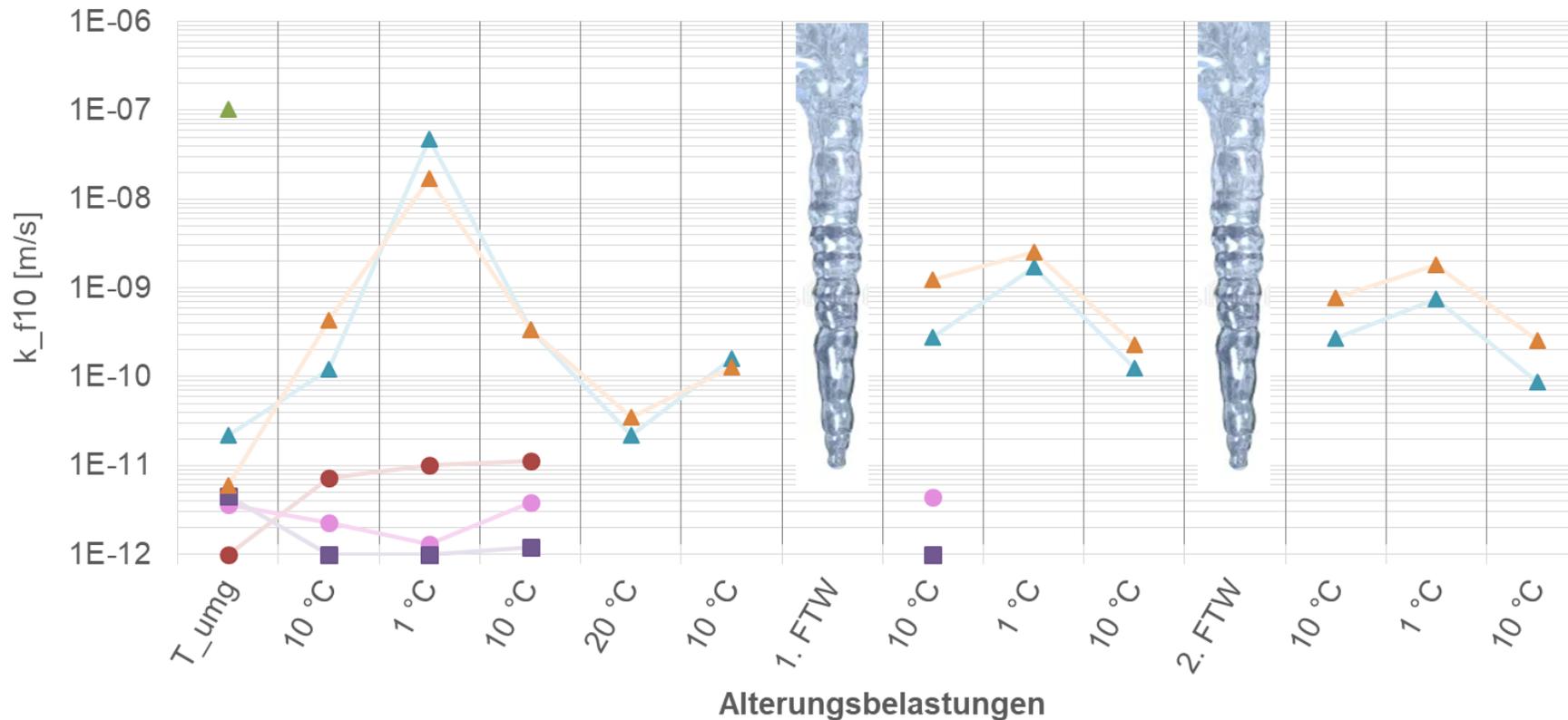
- Der von geologischen Diensten<sup>a)</sup> empfohlene  $k_f$ -sys bis  $1 \cdot 10^{-9}$  m/s für EWS-Bauwerke an Standorten mit GW-Gefährdungspotenzial ist ohne Gegenmaßnahmen nur bei einem ungestörten System ohne Auskühlung der Sonde erreichbar.
- Solange Lösungsansätze für ein hydraulisch robustes 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.
- 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

## Messungen an drei Modifizierten MT-Proben



# Tonbasierte Hinterfüllmaterialien sowie reine Tonschüttungen



## Ergebnisse

- Zementgebunde Tonmischungen verhalten sich wie andere zementbasierte Baustoffe
- Tonschüttungen konstant dicht

## Einschränkungen

- Zellendruck auf Membran begünstigt Nachverdichten
- Kugelschüttung deutlich anders als in-situ