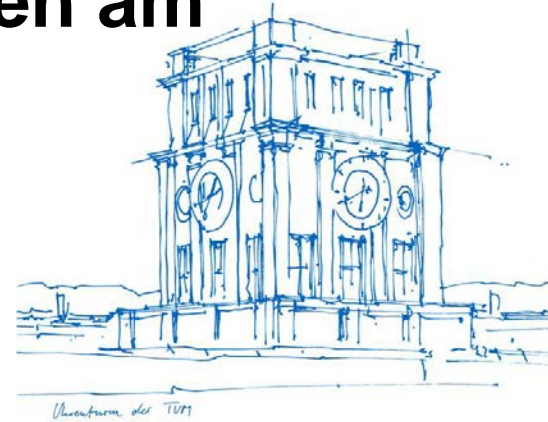


Grundlagenforschung und baupraktische Untersuchungen zu gefrorenen Böden am Zentrum Geotechnik TUM-ZG



Geotechnik-Tag in München 2024

Ulrich Schindler, Stylianos Chrisopoulos, Roberto Cudmani



Technische Universität München, Zentrum Geotechnik



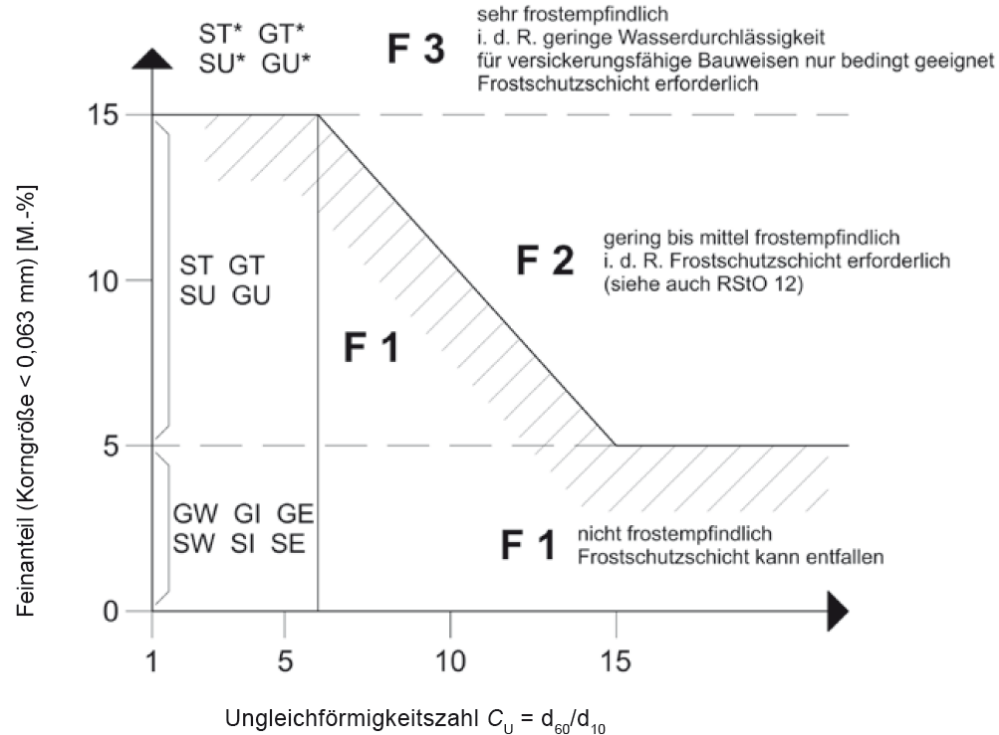
- Ein Rückblick: Untersuchungen zu gefrorenem Boden an TUM-ZG
- Aktuelle Untersuchungen bei TUM-ZG
 - Kommendes DFG Projekt zur Eislindenbildung
 - Experimentelle und numerische Untersuchungen zum mechanischen Verhalten von gefrorenen Böden (Dissertation Ulrich Schindler)
- Verwendung von Forschungsergebnissen in Vereisungsprojekten TUM-ZG



Gefrorene Böden am TUM-ZG: Ein Rückblick

Erdbauarbeiten (beginnend mit Prof. Jelinek and Prof. Floss)

- ZTVE-StB17 Frostempfindlichkeit von grob- und feinkörnigen Böden



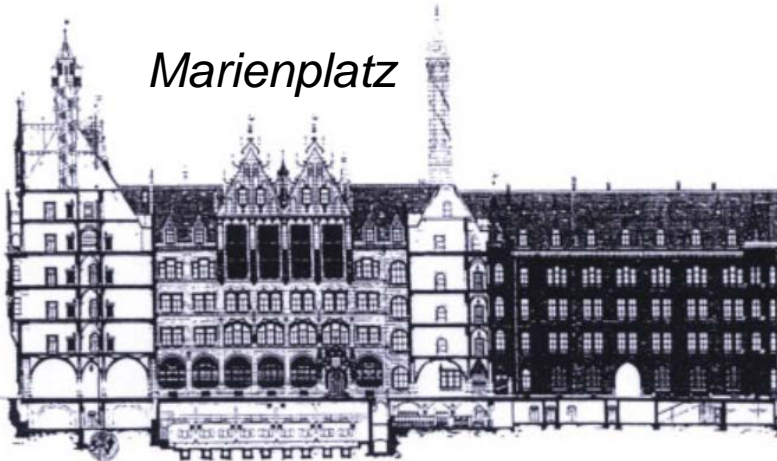
Aufbauend auf
Floss (1973)



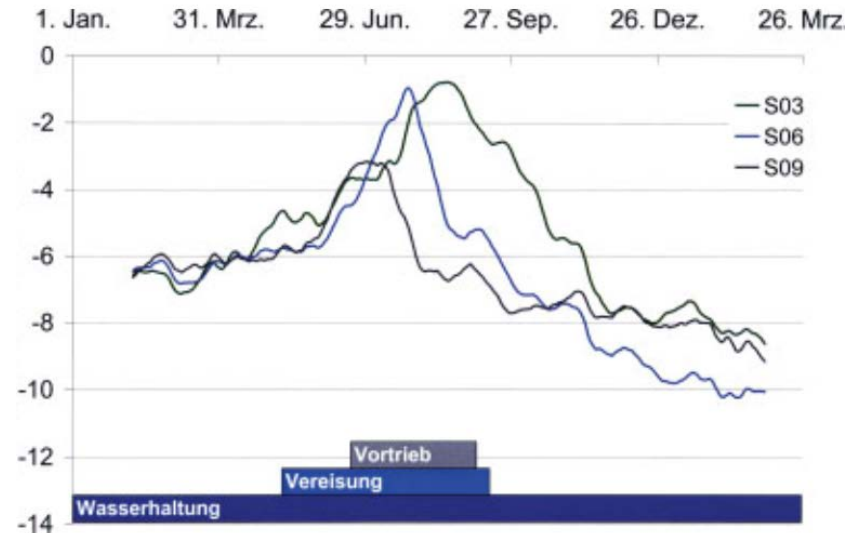
Bahnsteigerweiterung U6 München unter dem alten Rathaus

- Vereisung als temporäres, statisch tragendes und abdichtendes Baubehelf
 - Frostkörper lag in tertiären Sanden und Tonen
 - Volumetrische Verformungen während des Gefrier- und Tauvorgangs

Marienplatz

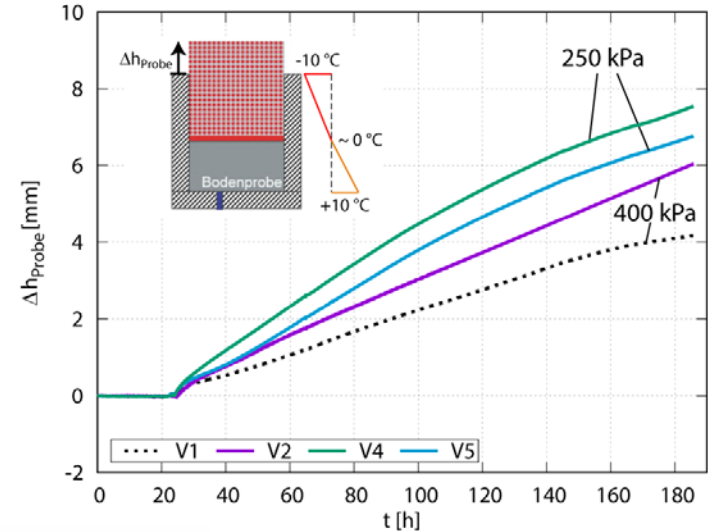
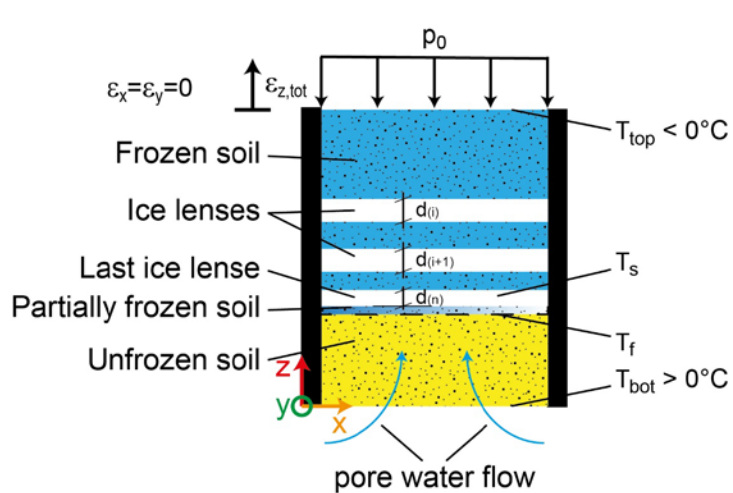


Fillibeck et al. (2005), Kellner (2007)





Grundlagenforschung zur Eislinsenbildung



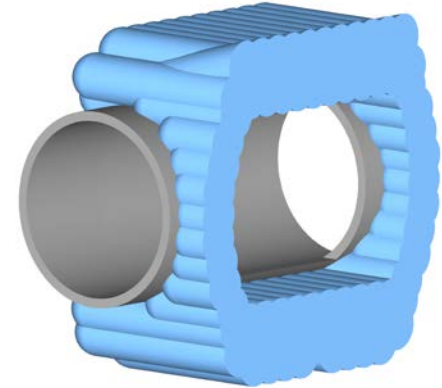
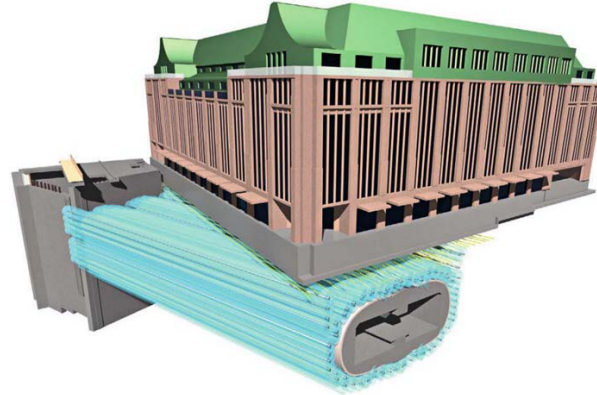
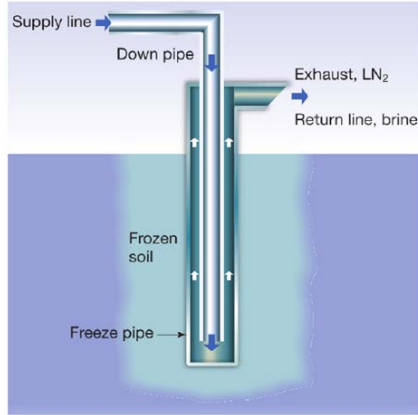
Gefördert durch



Deutsche
Forschungsgemeinschaft



Baupraktische Anwendung der Baugrundvereisung





Mechanisches Verhalten von gefrorenen granularen Böden

- Es gibt wenige höherwertige Stoffmodelle, die das komplexe raten-, spannungs- und temperaturabhängige mechanische Verhalten von gefrorenen Böden beschreiben
- Bisher überwiegend in der Praxis: Verwendung von vereinfachten Stoffmodellen und analytischen Ansätzen
 - Überdimensionierung bzw. ressourcenintensive Dimensionierung der Frostkörper
- Entwicklung eines neuartigen höherwertigen Stoffmodells durch TUM-ZG zur Beschreibung des Scher- und Kriechverhaltens gefrorener granularer Böden
 - Berücksichtigung von unterschiedlichen Temperaturen, Spannungen und Dehnungsraten
 - Berücksichtigung des (positiven) Einflusses des mittleren Drucks auf das Scher- und Kriechverhalten



Gleichungen des elastisch-viskoplastischen Stoffmodells

$$\dot{\sigma} = \mathbb{L} : (\dot{\epsilon} - \dot{\epsilon}_v)$$

$$\mathbb{L} = K\mathbf{1} \otimes \mathbf{1} + 2G \left(\mathbb{1} - \frac{1}{3} \mathbf{1} \otimes \mathbf{1} \right)$$

$$\dot{\epsilon}_v = \|\dot{\epsilon}_m\| \times \exp(-\beta) \exp\left(\beta \frac{t}{t_m}\right) \left(\frac{t}{t_m}\right)^{-\beta} \frac{\mathbf{s}}{\|\mathbf{s}\|}$$

$$\|\dot{\epsilon}_m\| = \sqrt{\frac{3}{2}} \dot{\epsilon}_a \exp\left\{ \left(\frac{K_1}{\theta + 273.4} + \ln \dot{\epsilon}_a \right) \left[\frac{\sigma_{cr}(p, q, \phi)}{\sigma_a(\theta)} - 1 \right] \right\}$$

$$t_m = \sqrt{\frac{3}{2}} c / \|\dot{\epsilon}_m\| \quad \sigma_a(\theta) = \alpha_1 (-\theta)^{\alpha_2}$$

$$\sigma_{cr}(p, q, \phi) = \frac{1}{2} \left(\{ [B \cos(\phi - \pi/3) + C]q + Dp \} + \sqrt{\{ [B \cos(\phi - \pi/3) + C]q + Dp \}^2 + 4Aq^2} \right)$$

Parameter

Table 2. Material constants for the proposed model

	Parameter	Value	Unit
One-dimensional model	E	500	MPa
	ν	0.30	–
	c	2.40	%
	a_1	3.05	MPa/°C
	a_2	0.59	–
	β	0.69	–
	K_1	3817	K
Extended novel model	A	2.11	–
	B	3.18	–
	C	–1.60	–
	D	–3.33	–

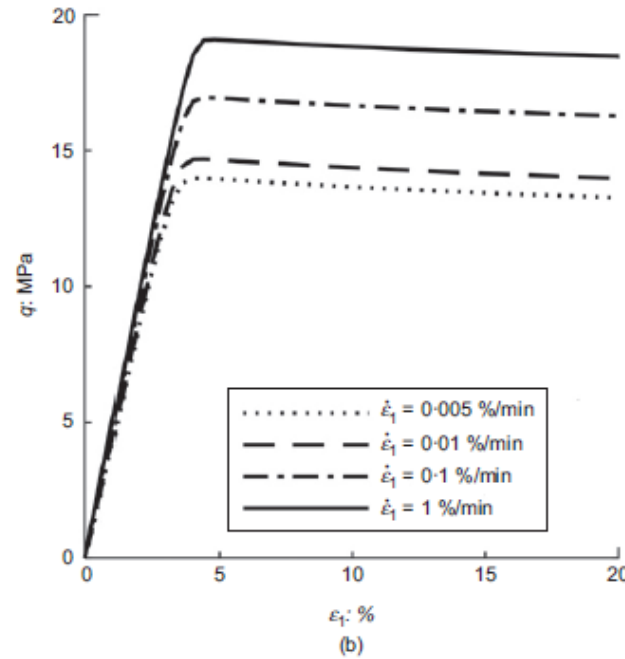
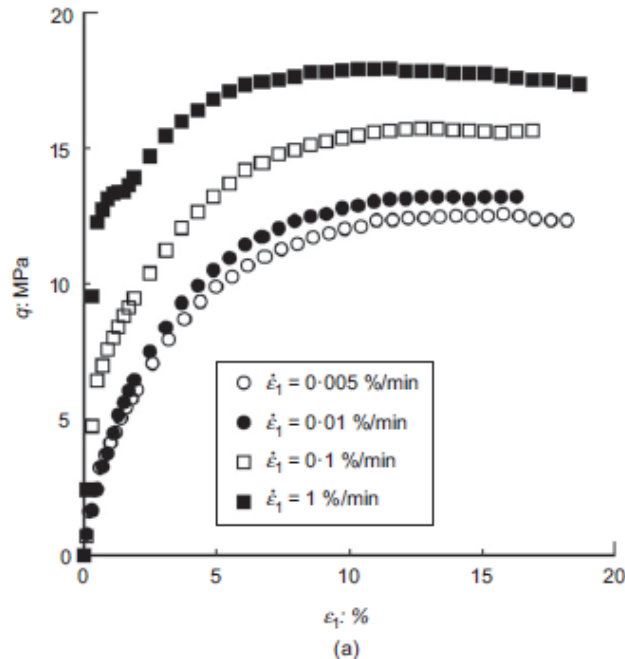
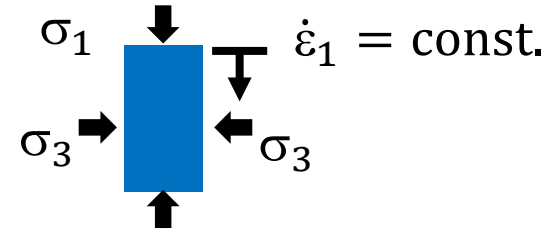
Eindeutiges Vorgehen zur Parameterkalibrierung



Validierung des Modells: Triaxiale Druckversuche

- Einfluss der Dehnungsrate

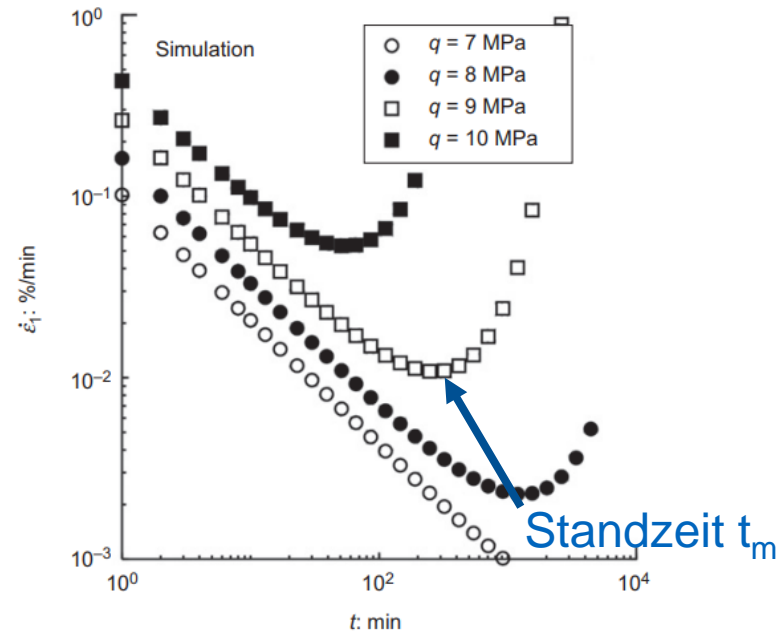
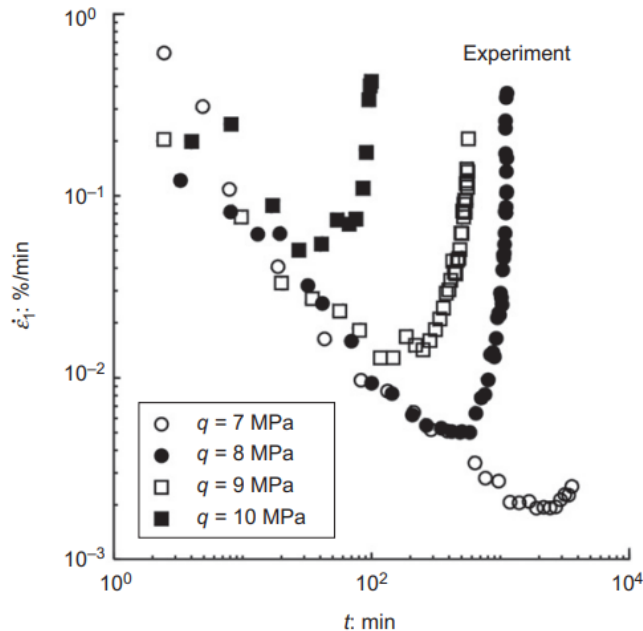
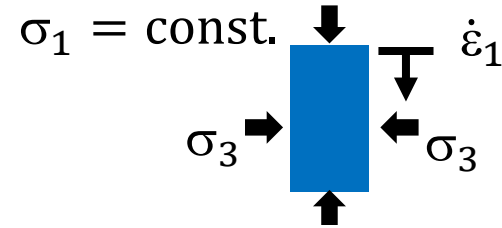
$\theta = -10^\circ\text{C}; \sigma_3 = 10 \text{ MPa}$





Validierung des Modells: Triaxiale Kriechversuche

$\theta = -10^\circ\text{C}; p = 4 \text{ MPa};$
 $q = \text{variabel}$

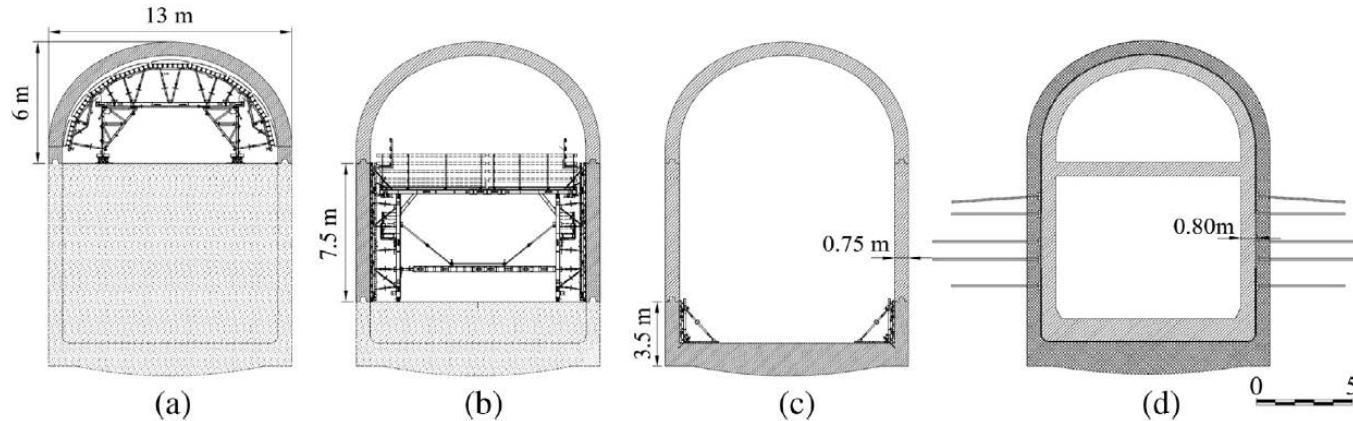


Einschränkung: Modelversion gemäß (Cudmani et al. (2023)) nur verwendbar für überwiegend monotone Belastungen

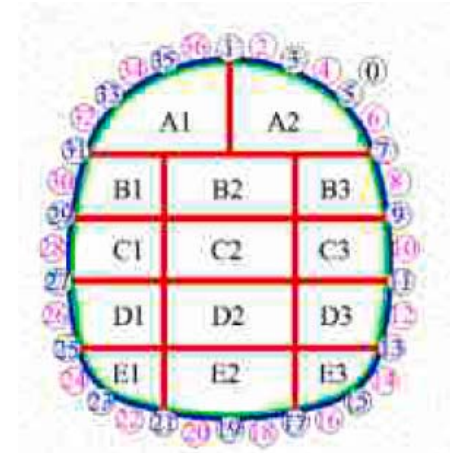


Praktische Relevanz von nicht monotoner statischer Belastung

- Unterschiedliche Bauphasen und Ausbruchsverfahren führen zu stufenweiser Be- und/oder Entlastung des gefrorenen Erdkörpers



Mehrere Bauphasen



Ausbruch in Teilflächen

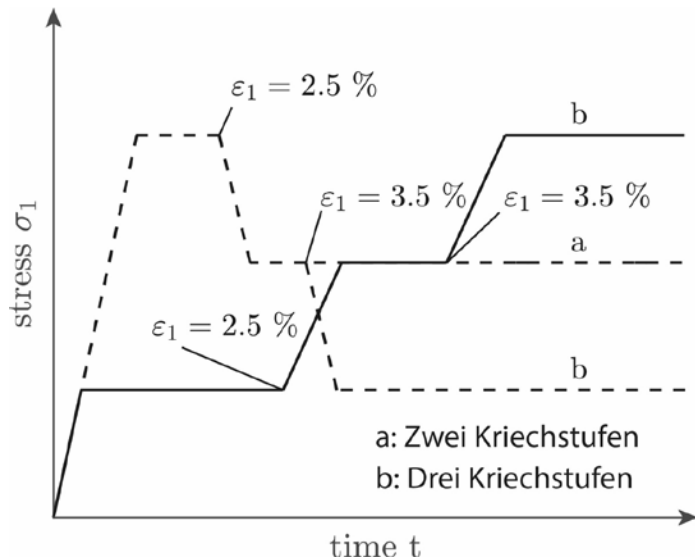
Erweiterung des Stoffmodells für nicht monotone Belastungen



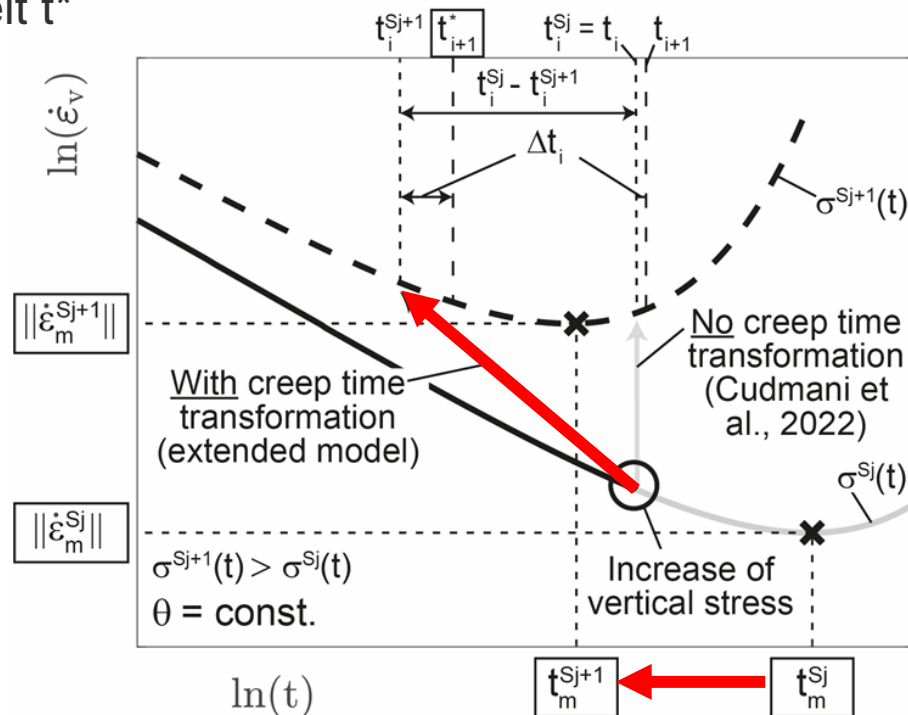
Berücksichtigung von nicht monotone Belastungen

Koppelung der Kriechzeit mit der Spannungs-Dehnung Geschichte zur Berücksichtigung von mehrstufigen Belastungen

- Einführung der transformierten Kriechzeit t^*

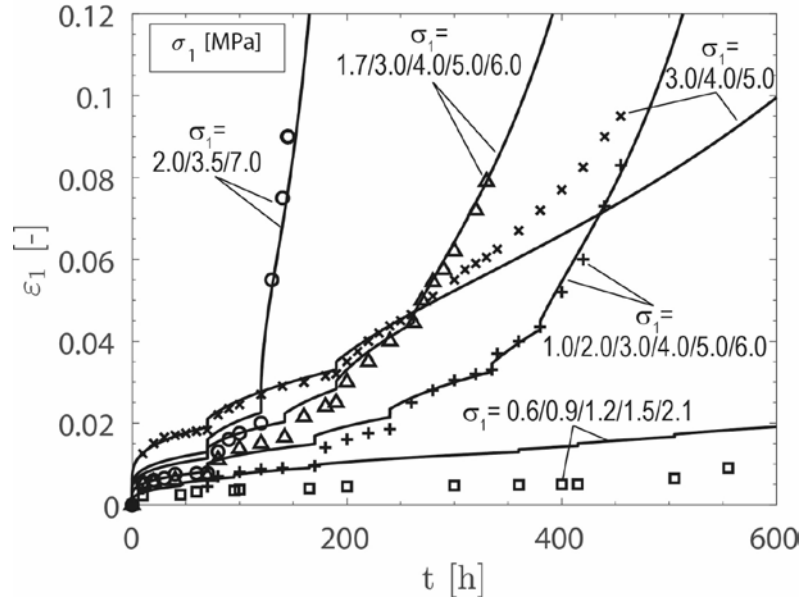


Erweitertes Modell → EVPFROZEN
Schindler et. al. (2023)

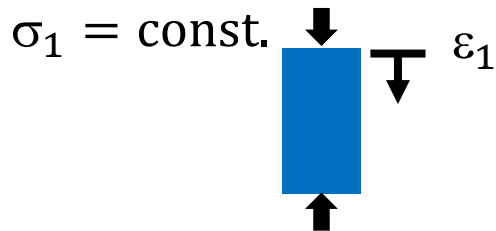




Validierung des Modells (EVPFROZEN)

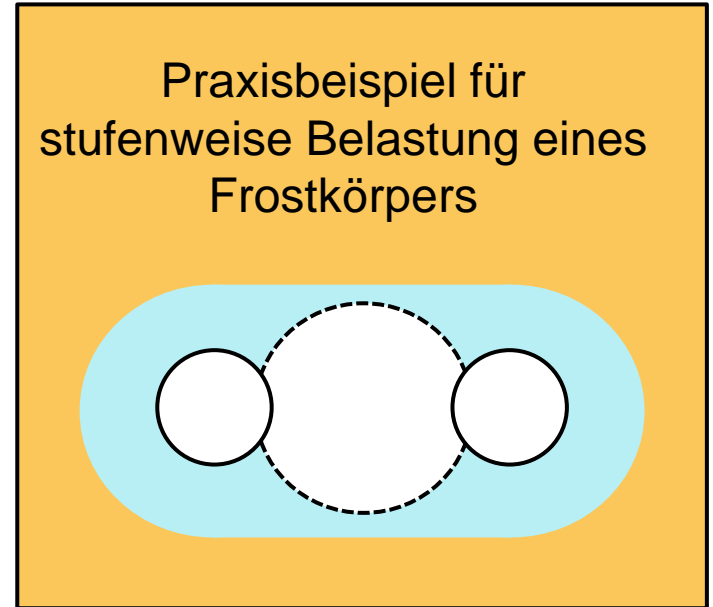


Stufenweise Belastung



- Experiment: Symbole
 - Simulation: Linien
- 10°C

Praxisbeispiel für
stufenweise Belastung eines
Frostkörpers





**Validierung des Modells anhand von
Elementtests** ✓



**Umfangreiches Testen und Validieren des
Modells in Randwertproblemen
→ FEM Simulationen (ABAQUS)**

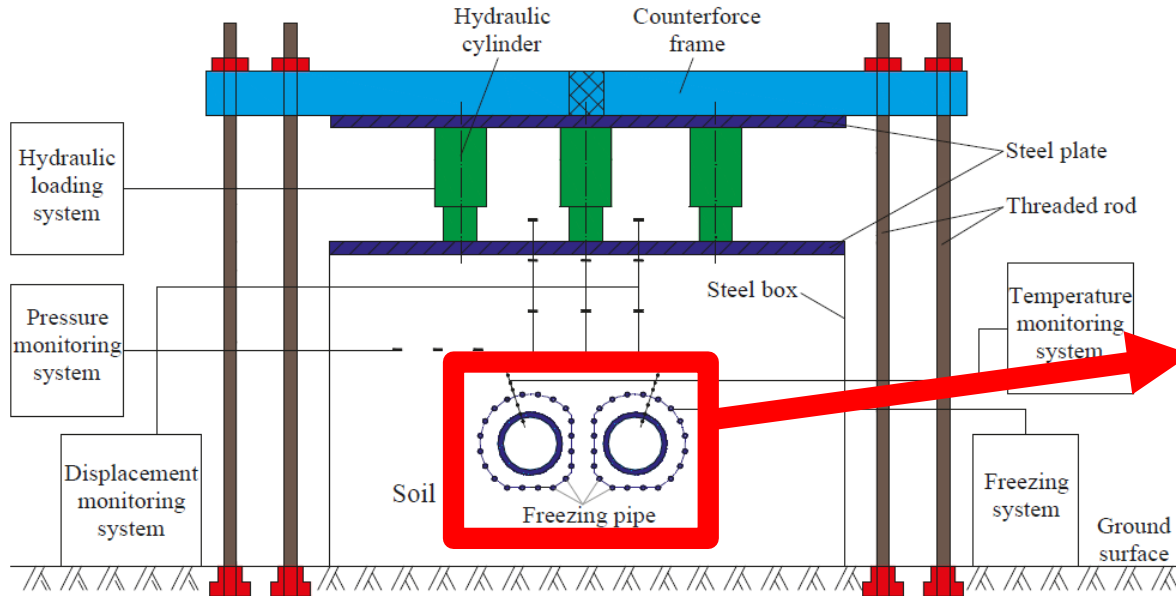


**Verwendung des Stoffmodells in FEM
Simulationen in praktischen
Anwendungen**



Verwendung von EVPFROZEN in RW-Problemen

Nachrechnung eines großmaßstäblichen Versuchs nach Cai et al. (2019)

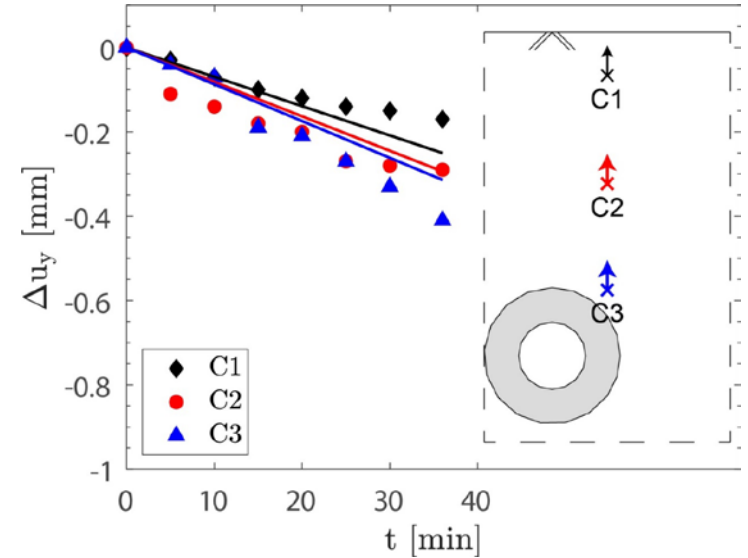
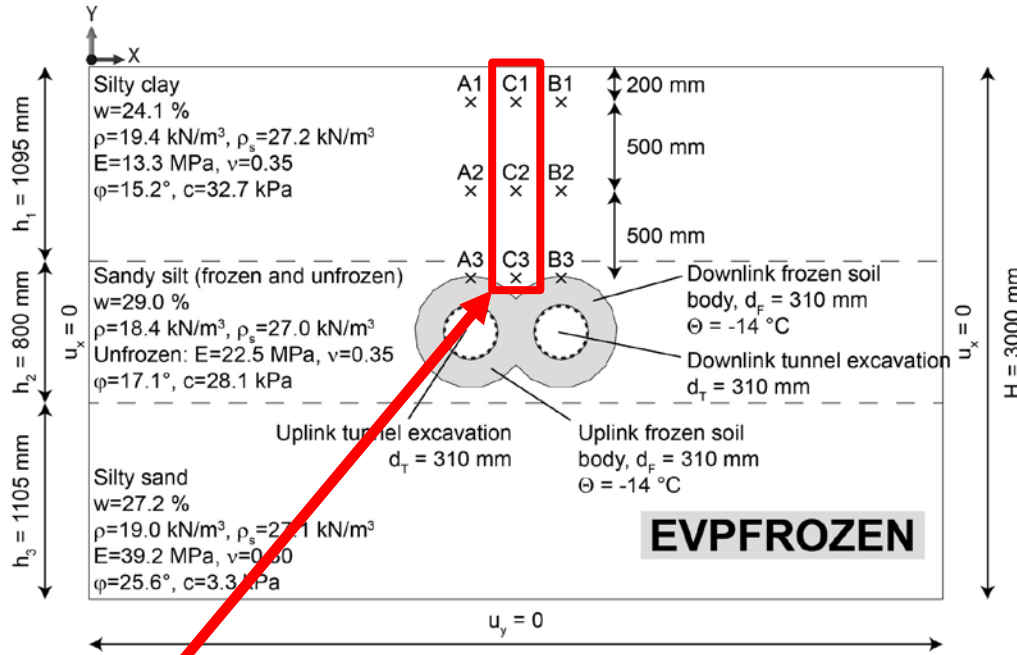


Schematische Darstellung (links) und die tatsächlichen ausgebrochenen Tunnelquerschnitte (rechts) [nach Cai et al. (2019)]



Verwendung von EVPFROZEN in RW-Problemen

Nachrechnung eines großmaßstäblichen Versuchs nach Cai et al. (2019)



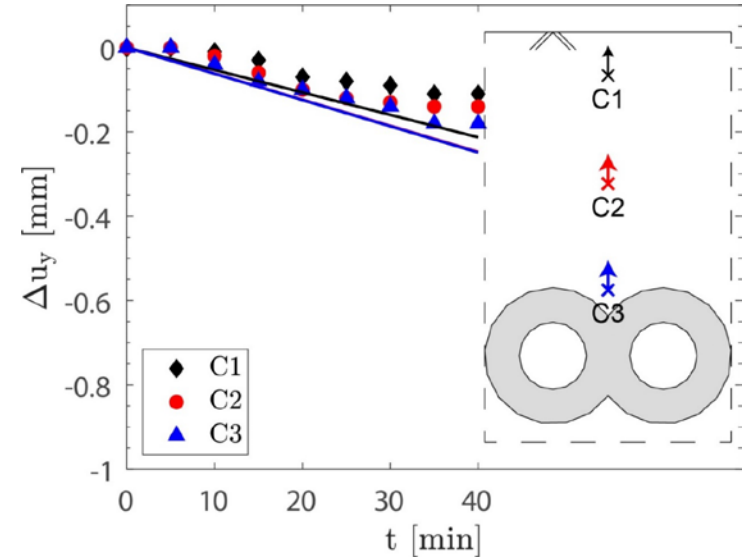
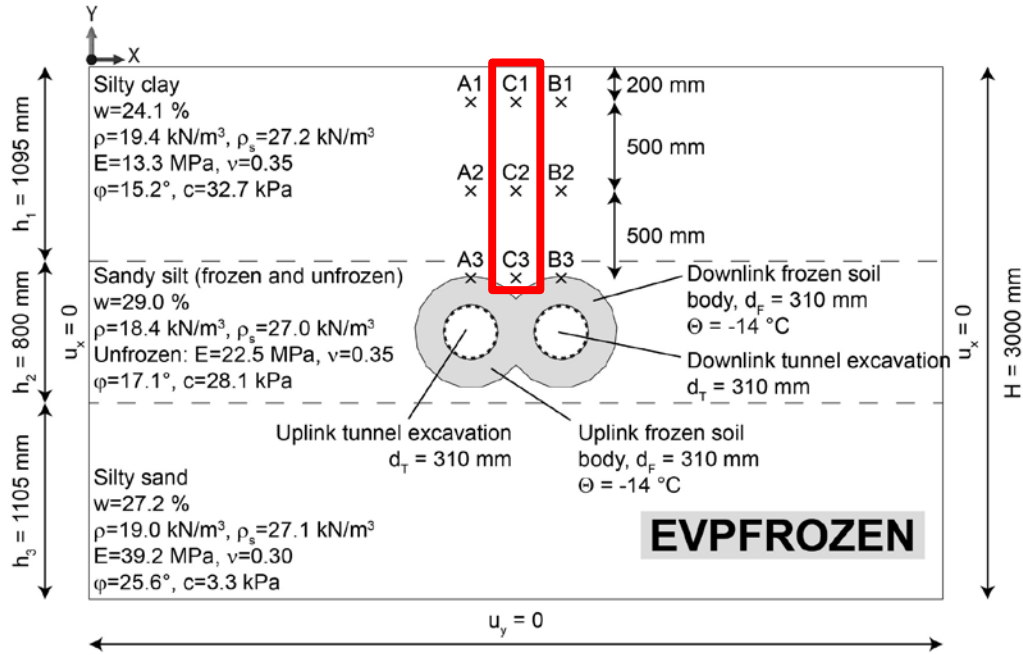
Symbole: Versuch
 Linien: Simulation

Vergleich zwischen den gemessenen und berechneten (EVPFROZEN) vertikalen Verschiebungen oberhalb der Tunnel



Verwendung von EVPFROZEN in RW-Problemen

Nachrechnung eines großmaßstäblichen Versuchs nach Cai et al. (2019)



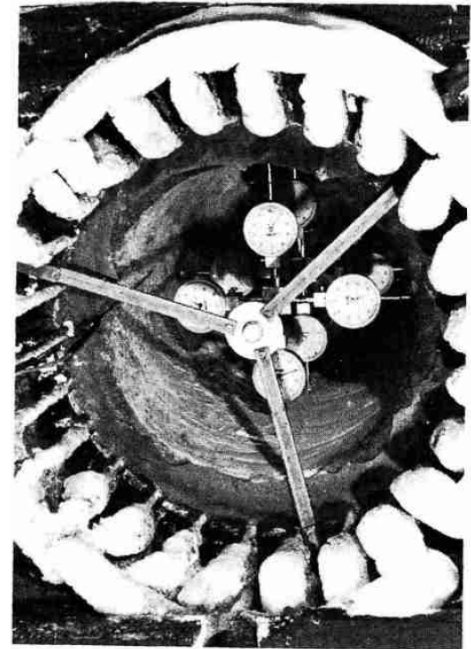
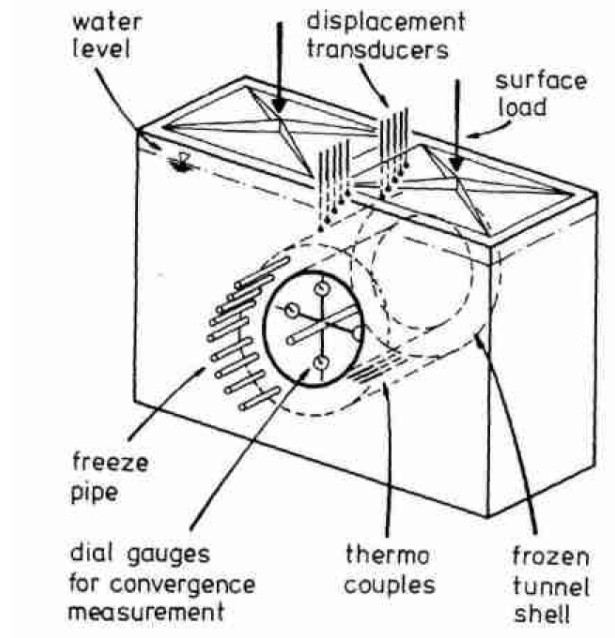
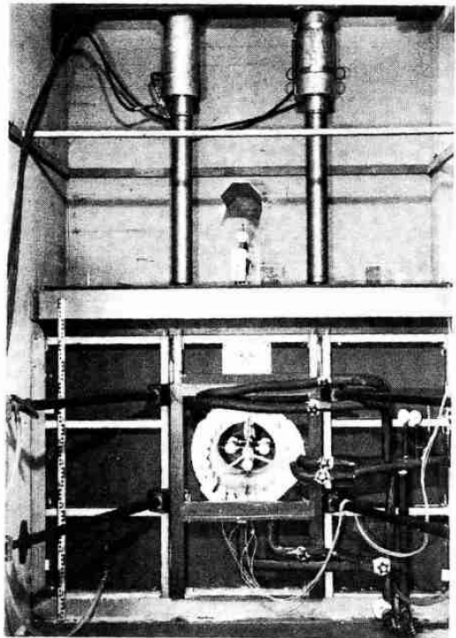
Symbole: Versuch
 Linien: Simulation

Die Überlappung von zwei gefrorenen Bodenkörpern reduziert signifikant die Gesamtsetzungen für den zweiten Tunnelaushub



Verwendung von EVPFROZEN in RW-Problemen

Simulationen der Kriechphase beim Tunnelausbruch

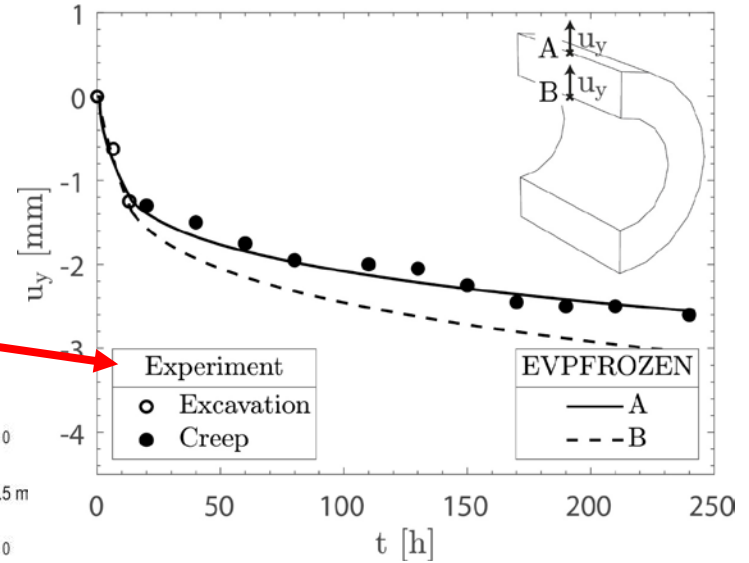
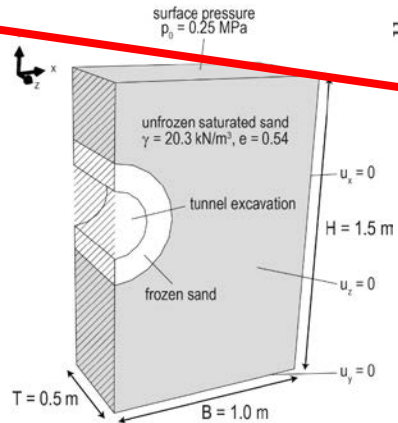
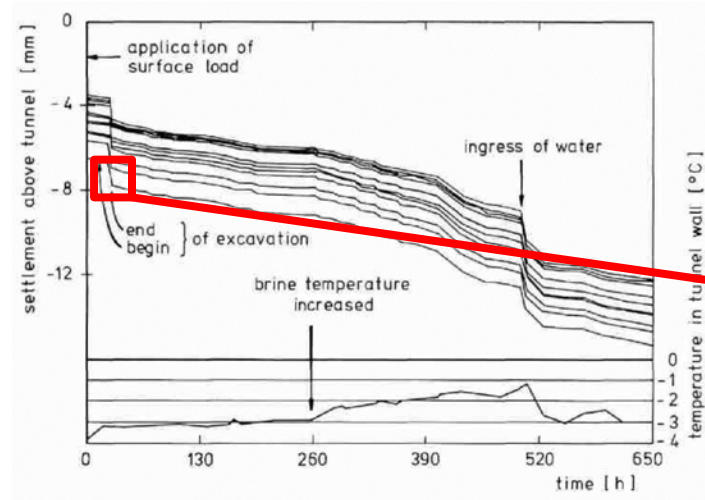


Modellversuch nach Orth and Meissner (1985)



Verwendung von EVPFROZEN in RW-Problemen

Simulationen der Kriechphase beim Tunnelausbruch



Nachrechnung des Modellversuchs nach Orth and Meissner (1985)

Ausgewählte Veröffentlichungen (Peer-reviewed Journals)

- Cudmani, R., Yan, W., and Schindler, U. 2023. A constitutive model for the simulation of temperature-, stress- and rate-dependent behaviour of frozen granular soils. *Géotechnique*, 73:12, 1043-1055.
- Schindler, U., Cudmani, R., Chrisopoulos, S., and Schünemann, A. 2024. Multistage creep behavior of frozen granular soils: Experimental evidence and constitutive modeling. *Canadian Geotechnical Journal*, 61(1): 118-133.
- Schindler, U., Chrisopoulos, S., and Cudmani, R. 2023. Artificial ground freezing applications using an advanced elastic-viscoplastic model for frozen granular soils. *Cold Regions Science and Technology*, 215, 103964.
- Schindler, U., Chrisopoulos, S., Cudmani, R., and Vogt, S. (submitted). Constitutive modeling of frozen soil creep behavior under non-monotonic static loading. *Computers and Geotechnics*, under review.
- Schindler, U. Dissertation (in Begutachtung). Experimental and numerical contributions to the mechanical behavior of frozen coarse-grained soils. Verteidigung: Sommer 2024



Vereisungsprojekte TUM-ZG

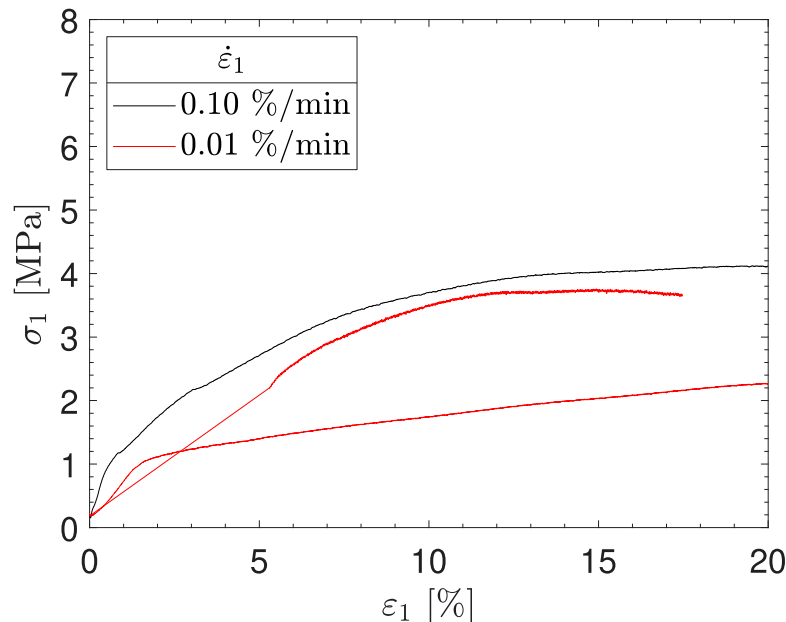


Voll ausgestattetes Frostlabor zur Untersuchung des mechanischen als auch volumetrisches Verhaltens



Baupraktische Verwendung des entwickelten mehrstufigen Kriechkonzepts

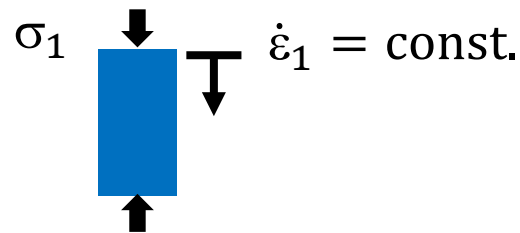
- 2023: Frostlaborprogramm für ein großes Infrastrukturprojekt in München



Einaxiale Druckversuche



Feinsand
-10°C





Bau

- 2

Natürliche Streuung der Versuchsergebnisse an “ungestörten” Proben

σ_1 [MPa]

Wie wählt man eine passende Kriechspannung, die zeitnah zum Kriechbruch der Probe führt?

→ Mehrstufige Kriechversuche

S



const.

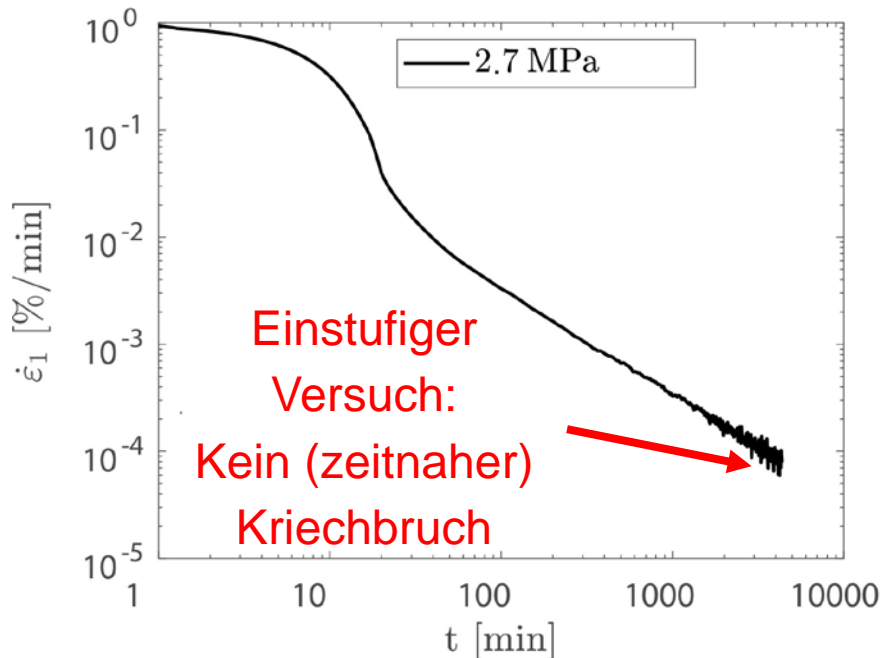




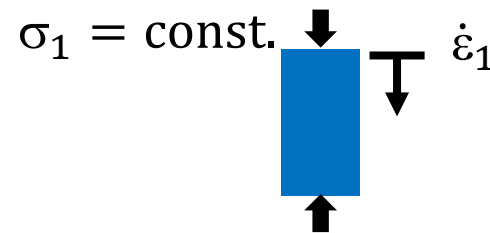
Baupraktische Verwendung des entwickelten mehrstufigen Kriechkonzepts

- 2023: Frostlaborprogramm für ein großes Infrastrukturprojekt in München

Feinsand
-20°C



Einaxialer Kriechversuch

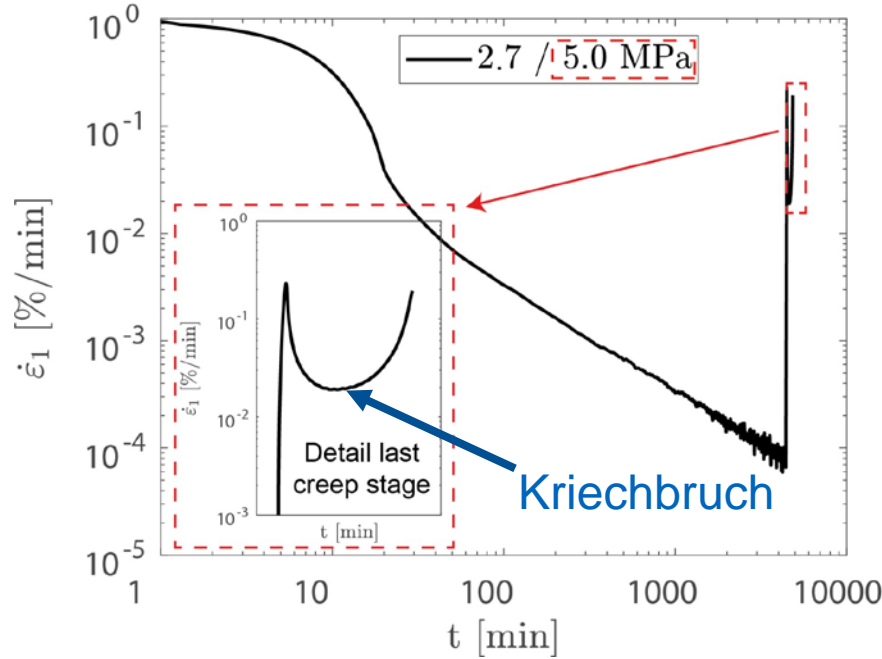




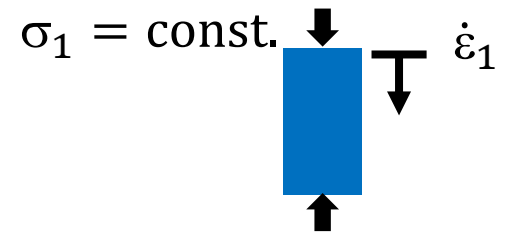
Baupraktische Verwendung des entwickelten mehrstufigen Kriechkonzepts

- 2023: Frostlaborprogramm für ein großes Infrastrukturprojekt in München

Feinsand
-20°C



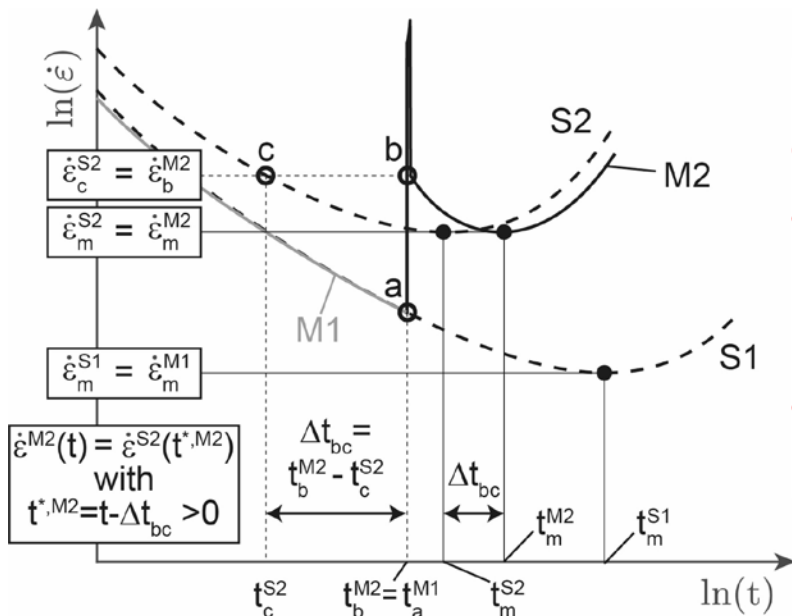
Einaxialer Kriechversuch





Baupraktische Verwendung des entwickelten mehrstufigen Kriechkonzepts

- 2023: Frostlaborprogramm für ein großes Infrastrukturprojekt in München



Erkenntnisse aus dem Vergleich von einstufigen und mehrstufigen Kriechversuchen:

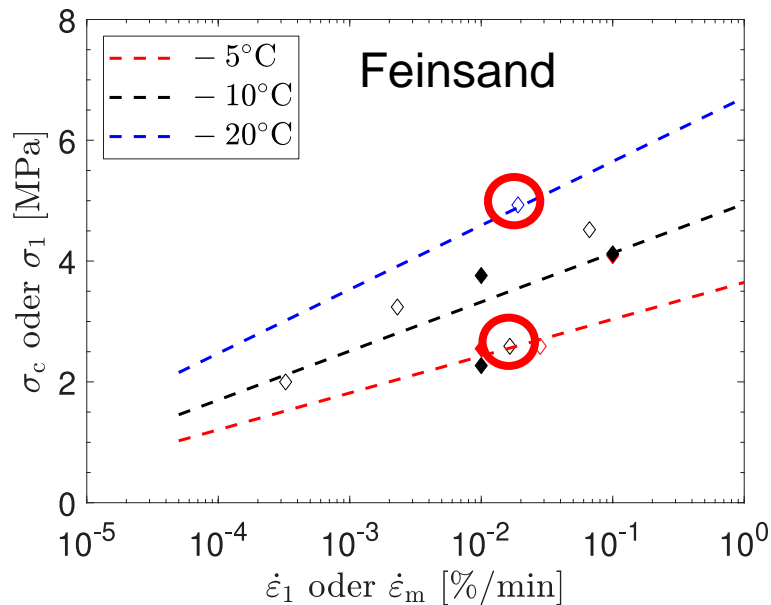
- Die minimale Dehnungsrate $\dot{\epsilon}_m$ ist weitestgehend unabhängig von der Belastungsgeschichte
- Die Standzeit t_m hängt von der Belastungsgeschichte ab

Schindler et al. (2024)



Baupraktische Verwendung des entwickelten mehrstufigen Kriechkonzepts

- 2023: Frostlaborprogramm für ein großes Infrastrukturprojekt in München



**Mehrstufige Kriechversuche
stimmen gut überein mit
einstufigen Versuchen bei der
selben Temperatur**

Ausgefüllte Symbole: 1D Druckversuch; Offene Symbole: 1D Kriechversuch



- Untersuchungen zu gefrorenen Böden haben eine lange TUM-ZG Tradition
- Untersuchungen zum mehrstufigen Kriechverhalten und Entwicklung eines entsprechenden Kriechkonzepts
- Entwicklung eines höherwertigen Stoffmodell zur Beschreibung des komplexen mechanischen Verhaltens von gefrorenen Böden
 - Validierung anhand von Element- und Modeltests für monotone und nicht monotone Belastungen
- Zusammenwirken von Forschungsergebnissen in baupraktischen Anwendungen von gefrorenen Böden
 - Mehrstufige Kriechversuche
 - Zeit- und Kostenersparnisse

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!