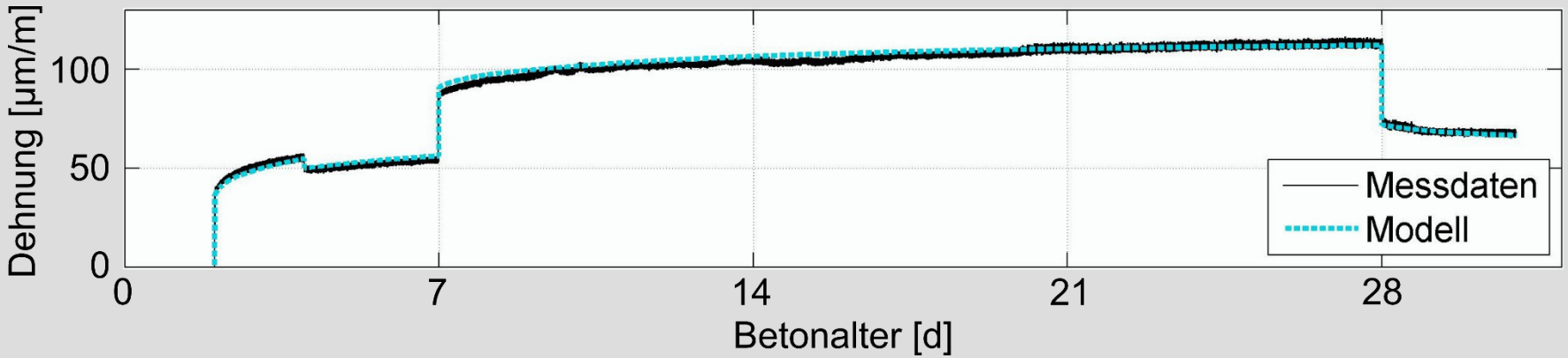
Technische Universität Braunschweig

DAfStb

iBMB MPA TU BRAUNSCHWEIG



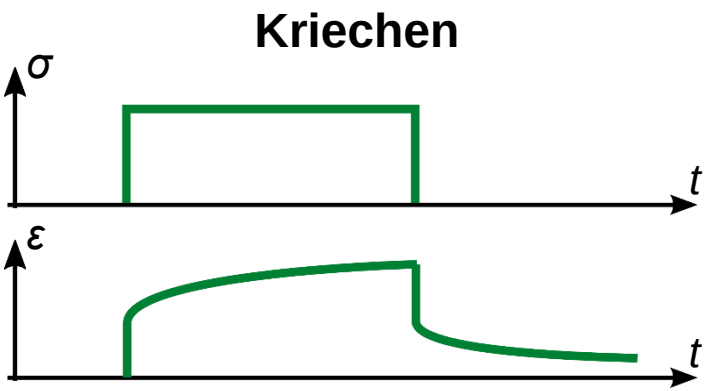
Betonkriechen im jungen Alter

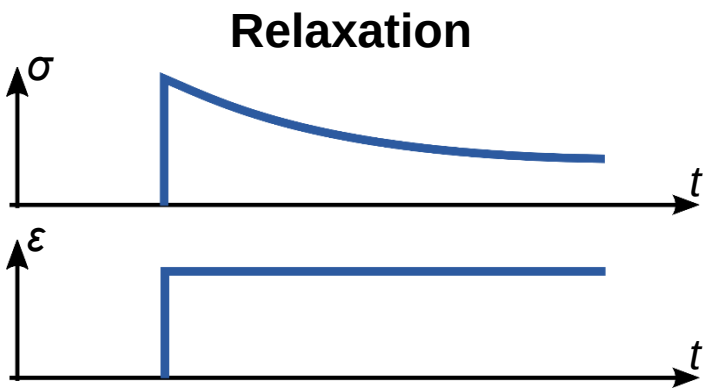
Dr.-Ing. Wibke Hermerschmidt

Überblick

1. • Motivation und Problemstellung
2. • Versuchsprogramm und Untersuchungsmethoden
3. • Versuchsergebnisse und Modellbildung
4. • Zusammenfassung und Ausblick

Motivation und Problemstellung
Viskoelastisches Materialverhalten von Beton





Modellhafte Beschreibung (fib Model Code / Eurocode 2):

Kriechdehnung: $$\varepsilon_{cc}(t,t_0) = \frac{\sigma_c(t_0)}{E_{ci}} \cdot \varphi(t,t_0)$$

Kriechzahl: $$\varphi(t,t_0) = \varphi_0 \cdot \beta_c(t,t_0)$$

$$\varphi_0 = \varphi_{RH} \cdot \beta(f_{cm}) \cdot \beta(t_0)$$

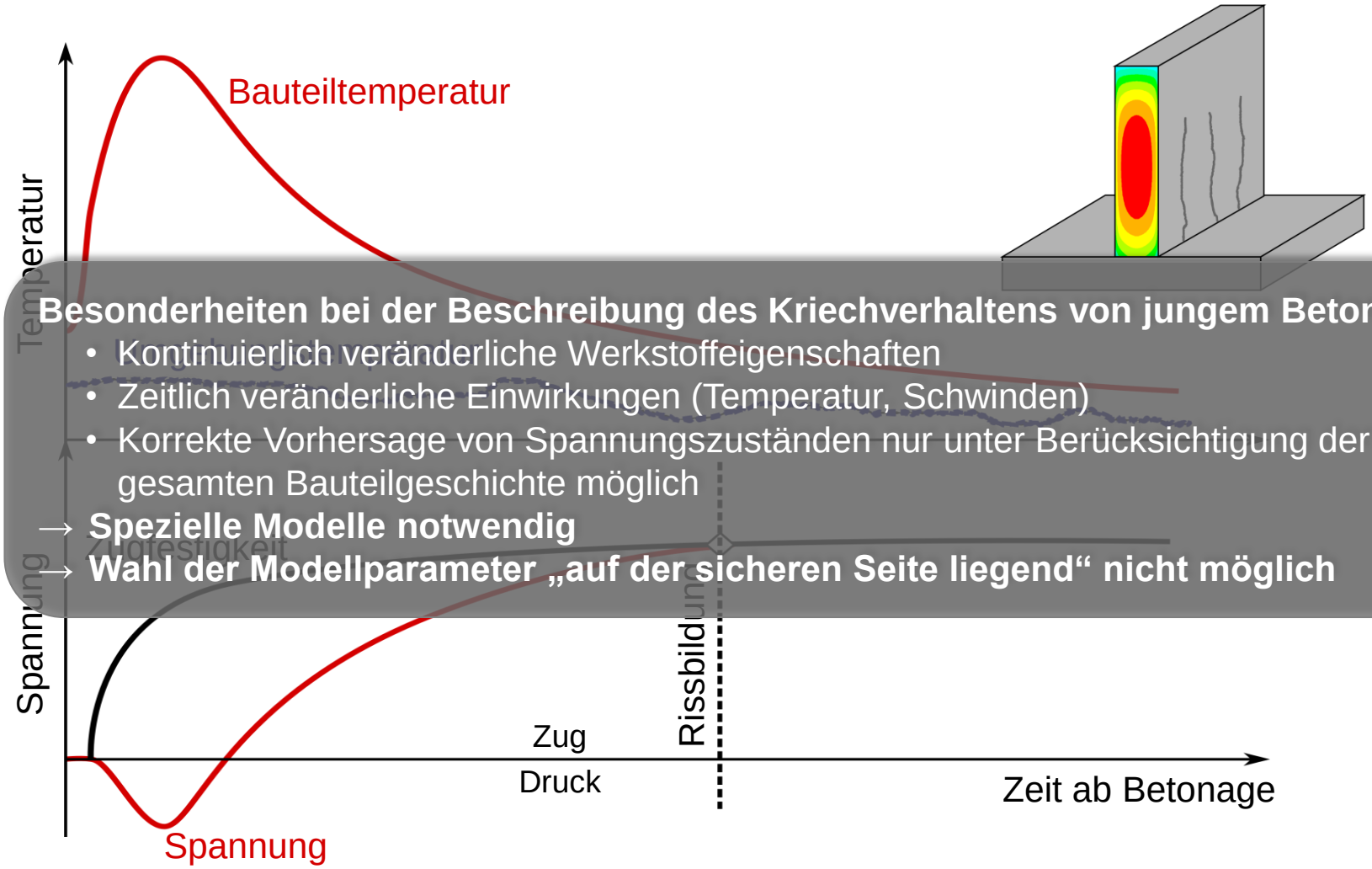
rel. Feuchte | Druck-festigkeit | Belastungs-alter

$$\beta_c(t,t_0) = \left[\frac{(t-t_0)}{\beta_H + (t-t_0)}\right]^{0.3}$$

rel. Feuchte/Bauteil-abmessungen | Belastungs-dauer

Motivation und Problemstellung

Zwangsspannungen infolge abfließender Hydratationswärme



Besonderheiten bei der Beschreibung des Kriechverhaltens von jungem Beton

- Kontinuierlich veränderliche Werkstoffeigenschaften
- Zeitlich veränderliche Einwirkungen (Temperatur, Schwinden)
- Korrekte Vorhersage von Spannungszuständen nur unter Berücksichtigung der gesamten Bauteilgeschichte möglich

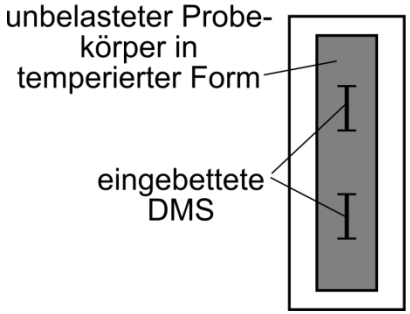
→ **Spezielle Modelle notwendig**

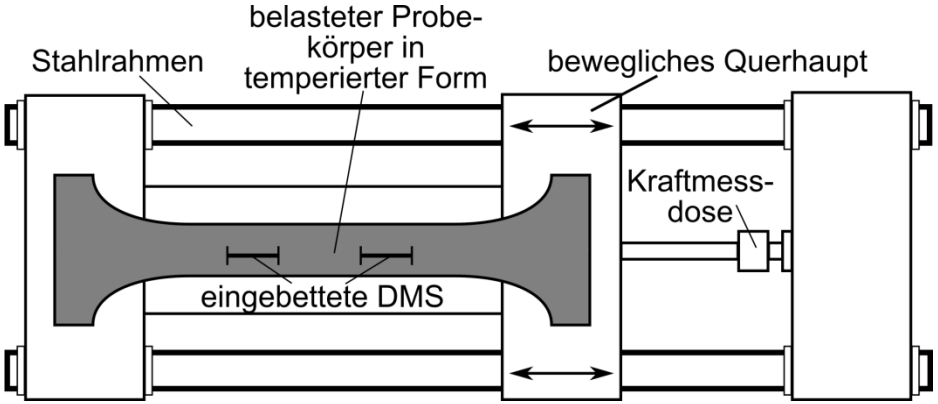
→ **Wahl der Modellparameter „auf der sicheren Seite liegend“ nicht möglich**

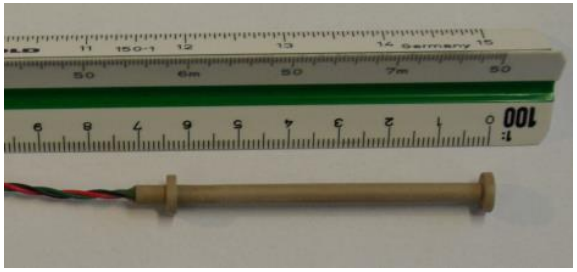
Versuchsprogramm

Temperatur-Spannungs-Prüfmaschine (TSTM)

- Knochenförmiger Probekörper auf Zug belastet
- Unbelasteter Probekörper zur Aufzeichnung der lastunabhängigen Dehnungen
- Isotherme Bedingungen während Erhärtung und Versuch durch doppelwandige, temperierte Formen



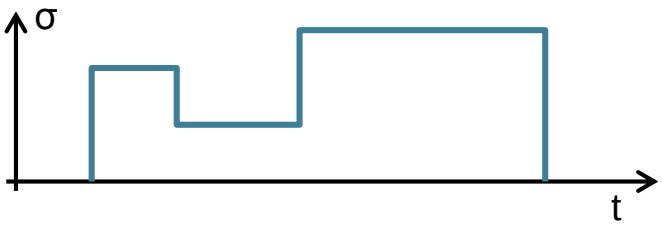




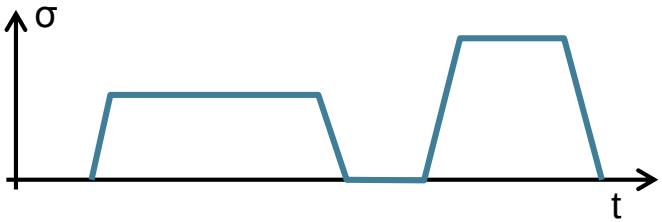
Versuchsprogramm

3 Arten von Kriechversuchen:

1. Konstante Spannung



2. Schrittweise veränderliche Spannung



3. Kontinuierlich veränderliche Spannung

Belastungsalter: 1...7 d, **Belastungsgrad:** 20...80 % f_{ct}

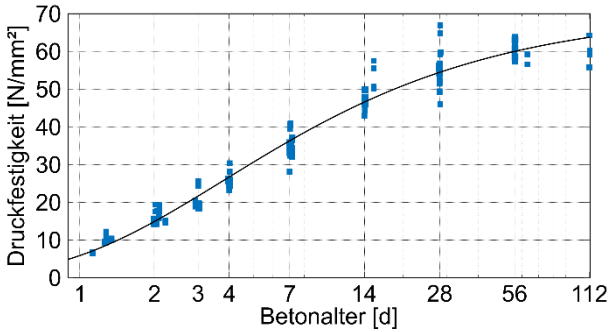
Versuchsprogramm

Referenzbeton REF01 - stellvertretend für Beton in massigen Bauteilen

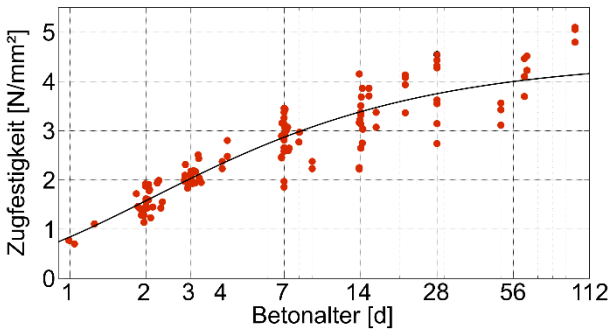
Zementart	[-]	CEM III/A 32,5 N
Zementgehalt	[kg/m³]	300
Gesteinskörnung 0/16 mm	[kg/m³]	1970
Wasser	[kg/m³]	140
w/z-Wert	[-]	0,48
Rohdichte	[kg/m³]	2410

Mechanische Kurzzeiteigenschaften

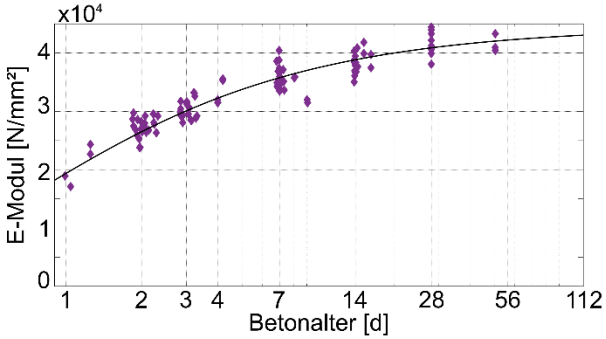
$f_{c,m,28d}$ = 54 N/mm²



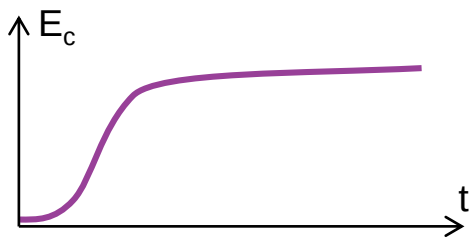
$f_{ct,m,28d}$ = 3,8 N/mm²

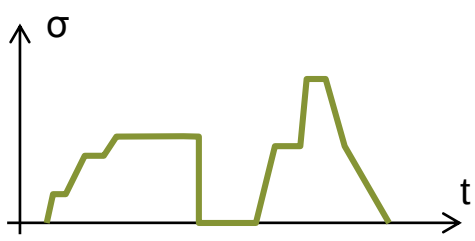


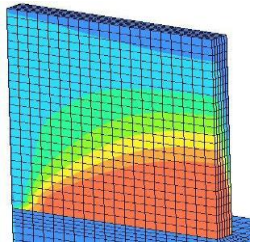
$E_{ct,m,28d}$ = 40.800 N/mm²



Versuchsergebnisse und Modellbildung
Grundüberlegungen zur Modellbildung







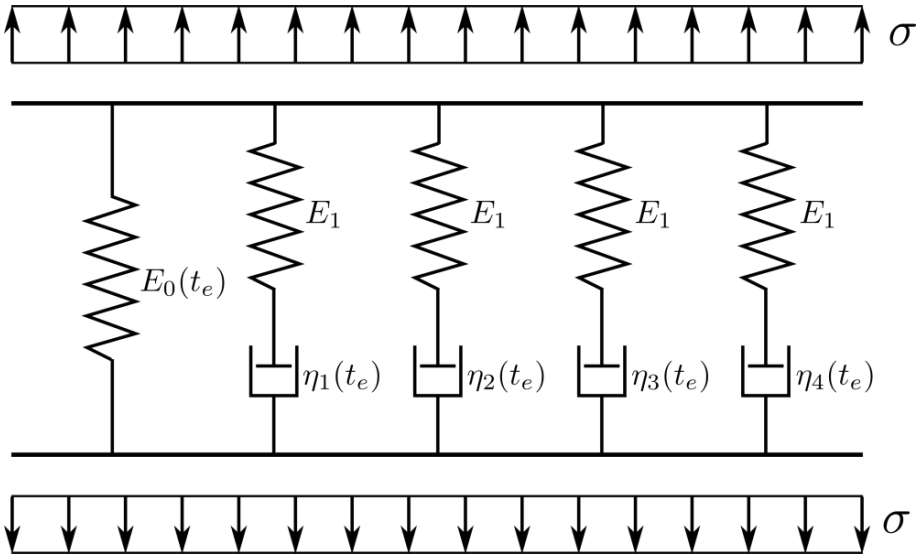
Berücksichtigung des Erhärtungsprozesses

Anwendbarkeit für beliebige Spannungs-Dehnungs-Geschichten, z.B. schrittweise oder kontinuierlich veränderliche Belastung

Einfache Implementierbarkeit in numerische Simulationen

Versuchsergebnisse und Modellbildung
Modellaufbau und Grundgleichungen

Generalisiertes Maxwellmodell mit alternden Feder- und Dämpferkennwerten



Grundgleichung des Materialgesetzes

$$a_0 \cdot \sigma + a_1 \cdot \frac{\partial \sigma}{\partial t_e} + a_2 \cdot \frac{\partial^2 \sigma}{\partial {t_e}^2} + a_3 \cdot \frac{\partial^3 \sigma}{\partial {t_e}^3} + a_4 \cdot \frac{\partial^4 \sigma}{\partial {t_e}^4} = b_0 \cdot \varepsilon + b_1 \cdot \frac{\partial \varepsilon}{\partial t_e} + b_2 \cdot \frac{\partial^2 \varepsilon}{\partial {t_e}^2} + b_3 \cdot \frac{\partial^3 \varepsilon}{\partial {t_e}^3} + b_4 \cdot \frac{\partial^4 \varepsilon}{\partial {t_e}^4}$$

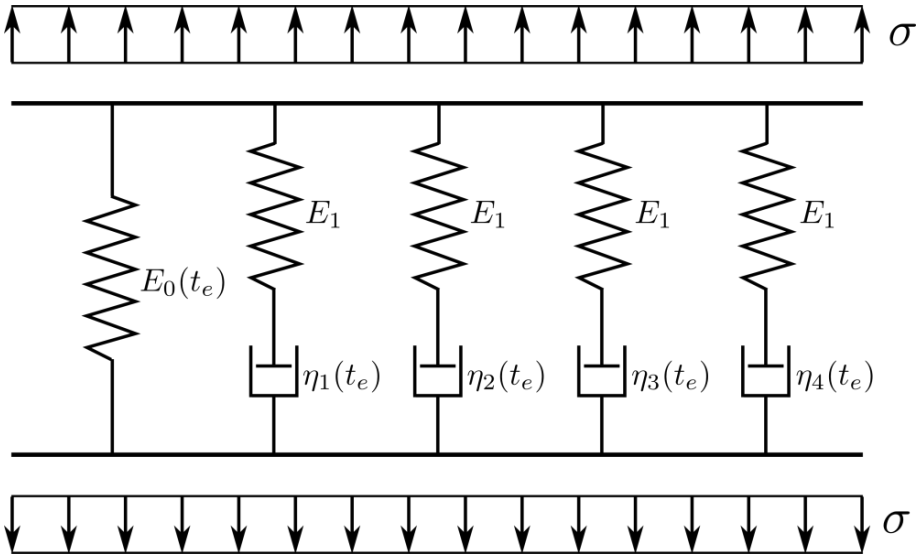
mit

$$a_0 \ldots a_4 = f(E_0, E_1, \eta_1, \eta_2, \eta_3, \eta_4)$$

$$b_0 \ldots b_4 = f(E_0, E_1, \eta_1, \eta_2, \eta_3, \eta_4)$$

Versuchsergebnisse und Modellbildung
Modellaufbau und Grundgleichungen

Generalisiertes Maxwellmodell mit alternden Feder- und Dämpferkennwerten



Zeitliche Entwicklung der Feder- und Dämpferkennwerte

$$E_0(t_e) = f_1 \cdot \exp\left(f_2 \cdot \left(\frac{t_e}{t_k}\right)^{f_3}\right) + \Delta E_0(t_e)$$

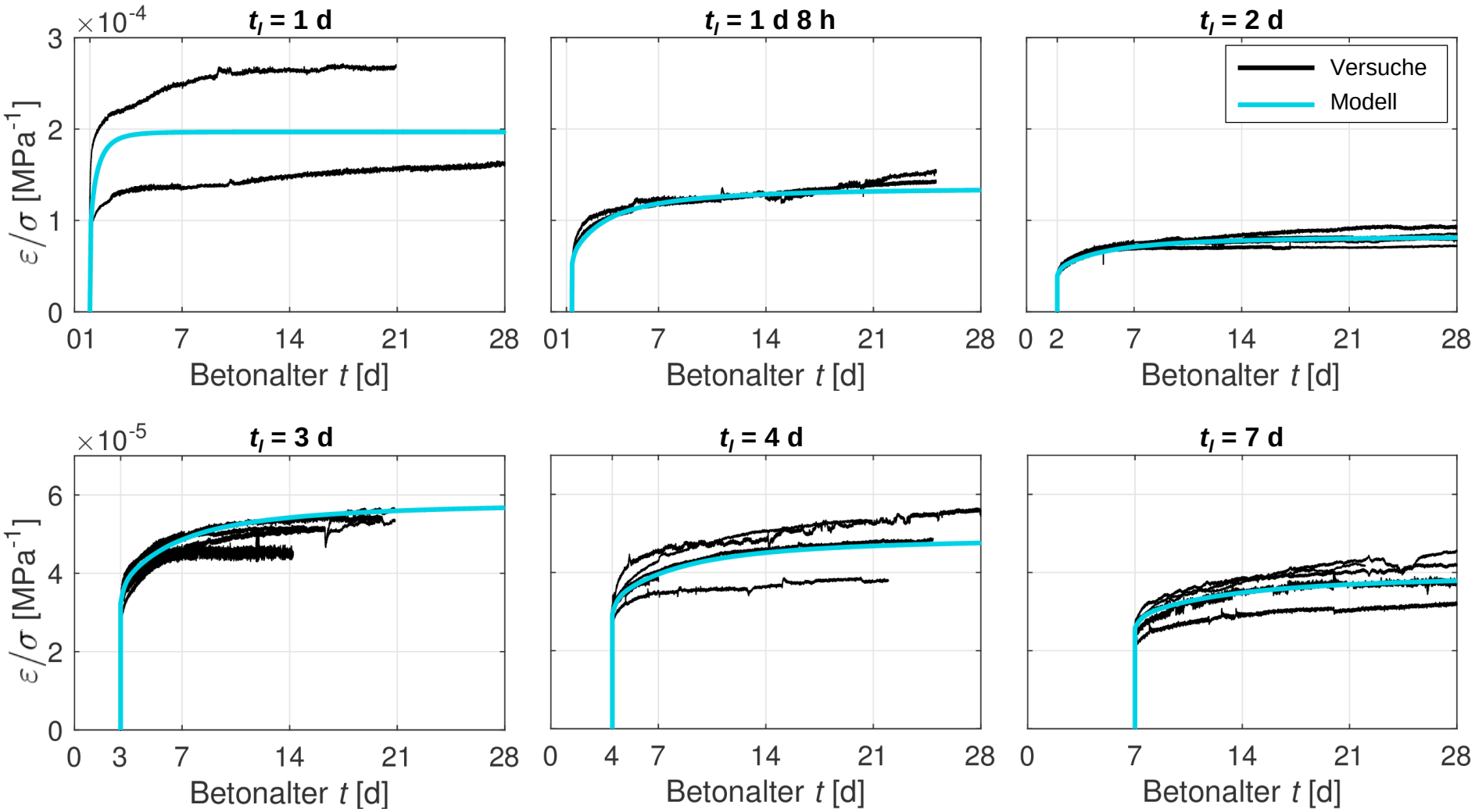
$$\Delta E_0(t_e) = \begin{cases} f_4 \cdot \left(\frac{t_e}{t_k} - \frac{t_0}{t_k}\right)^7 & \text{für } t_e < 2\,\text{d} \\ 0 & \text{für } t_e \geq 2\,\text{d} \end{cases}$$

$$\eta_i(t_e) = d_{1,i} \cdot \left(\frac{t_e}{t_k}\right)^{d_2} + \Delta\eta_i(t_e), \quad i = 1 \ldots 4$$

$$\Delta\eta_i(t) = \begin{cases} d_{3,i} \cdot \left(\frac{t_e}{t_k} - \frac{t_0}{t_k}\right)^7 & \text{für } t_e < 2\,\text{d} \\ 0 & \text{für } t_e \geq 2\,\text{d} \end{cases}$$

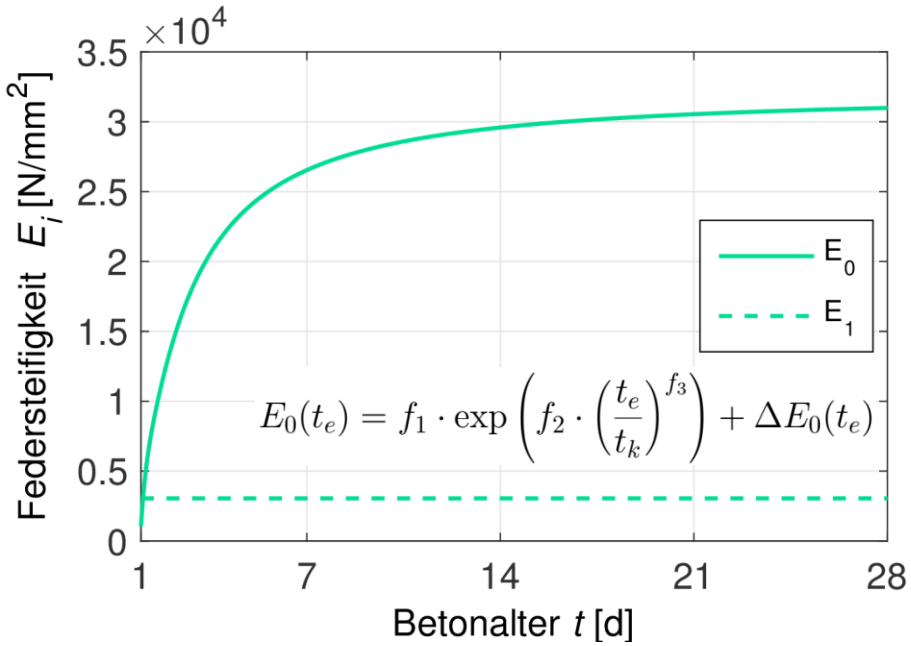
Versuchsergebnisse und Modellbildung

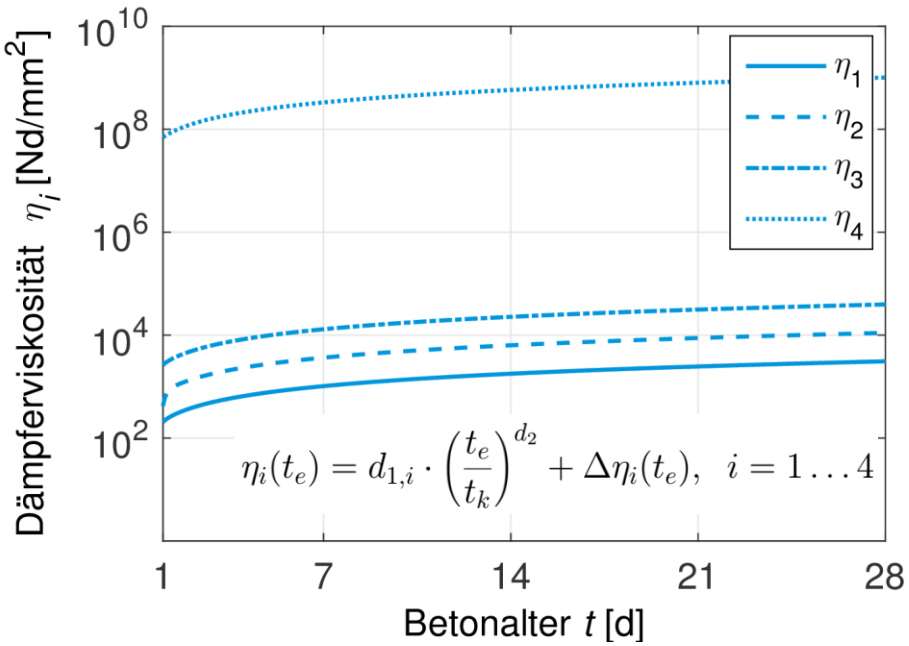
Modellkalibrierung – Kriechen unter konstanter Spannung



Versuchsergebnisse und Modellbildung

Modellparameter

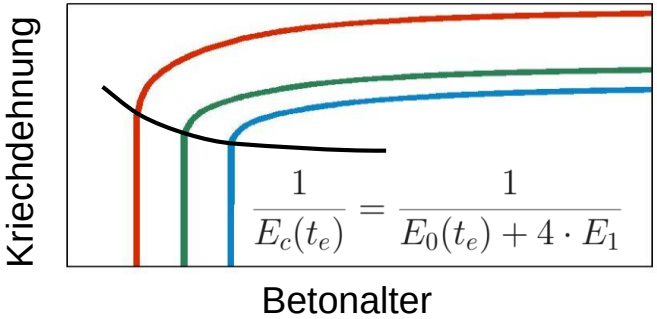




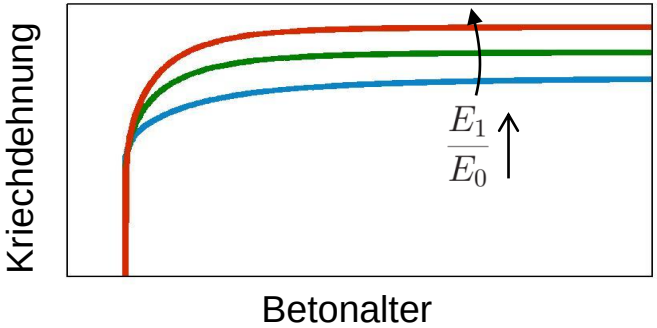
E_1	[MPa]	3051	$d_{1,1}$	[MPa·d]	215	$d_{3,1}$	[MPa·d]	10
f_1	[MPa]	32 071	$d_{1,2}$	[MPa·d]	768	$d_{3,2}$	[MPa·d]	110
f_2	[–]	-2,09	$d_{1,3}$	[MPa·d]	2 741	$d_{3,3}$	[MPa·d]	350
f_3	[–]	-1.23	$d_{1,4}$	[MPa·d]	$7{,}0 \cdot 10^7$	$d_{3,4}$	[MPa·d]	0
f_4	[MPa]	2915	d_2	[–]	0,80	t_k	[d]	1

Versuchsergebnisse und Modellbildung

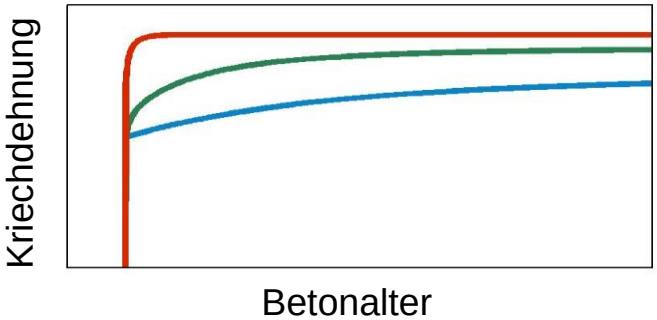
Interpretation der Modellparameter



Summe der Federsteifigkeiten entspricht dem E-Modul



Verhältnis $\frac{E_1}{E_0}$ definiert Höhe des Kriechens

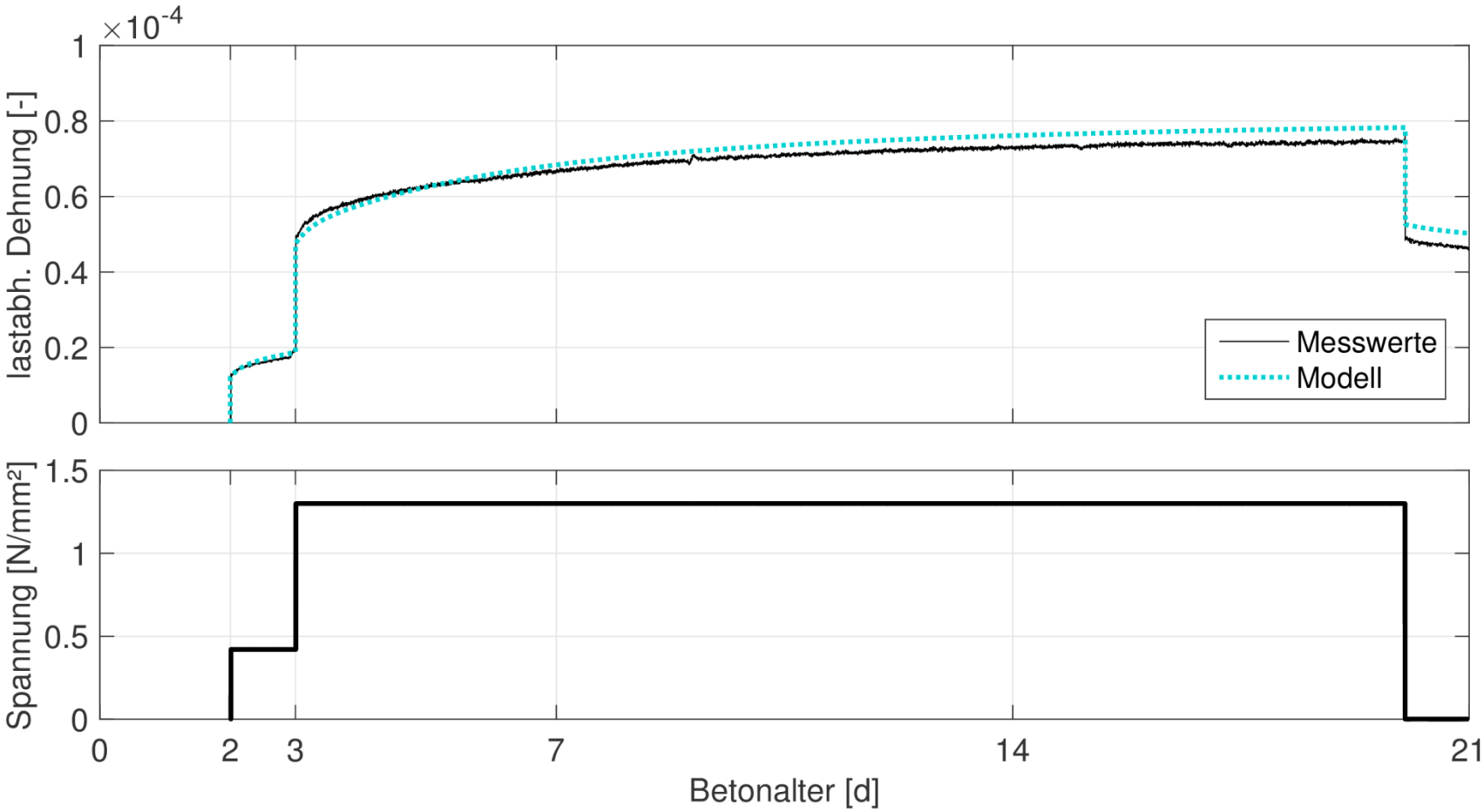


Werteverteilung der Viskositäten definiert zeitl. Verlauf

- $\eta_1 \ldots \eta_4$ klein
- $\eta_1 \ldots \eta_4$ groß
- $\eta_1 \ldots \eta_4$ verteilt über großen Wertebereich

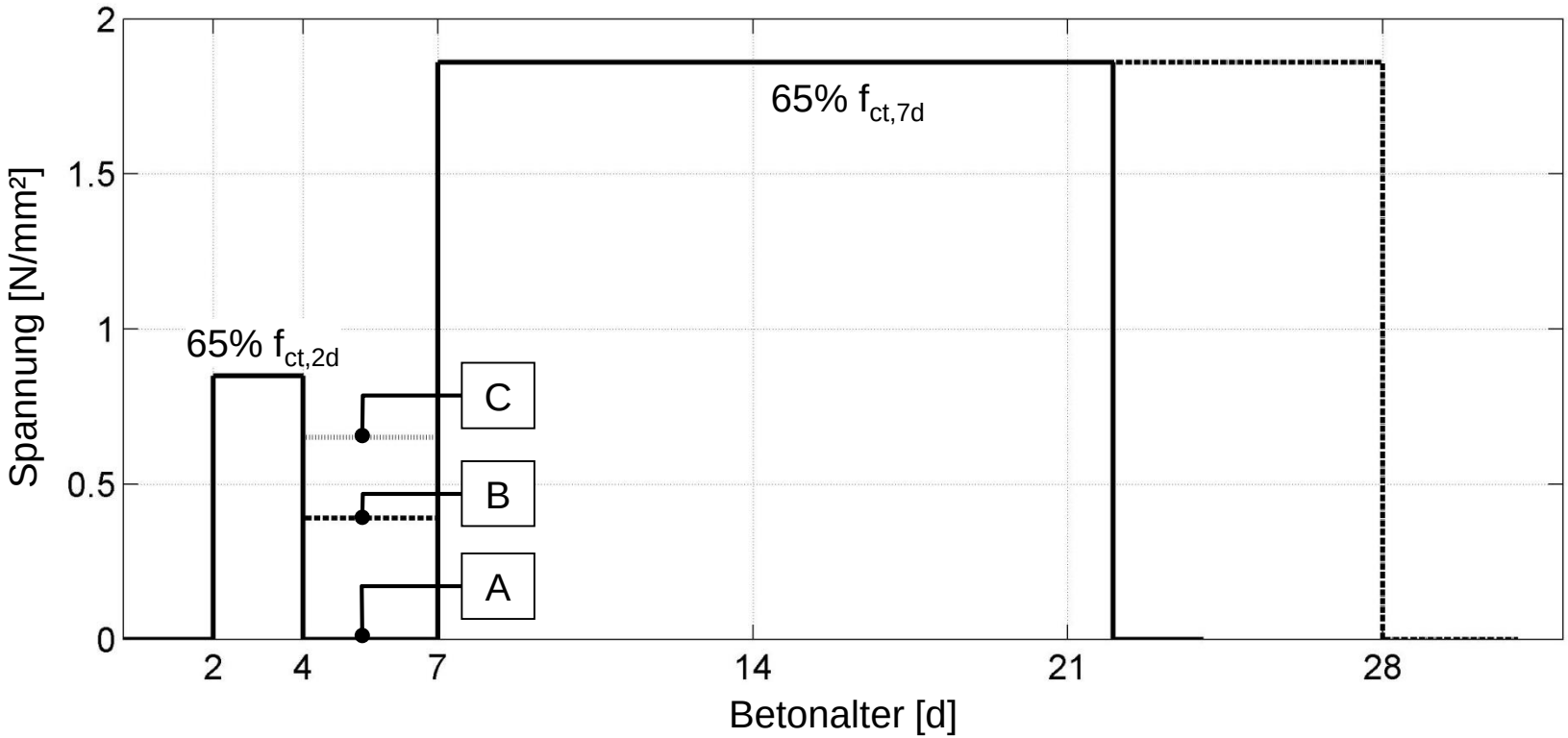
Versuchsergebnisse und Modellbildung

Kriechversuch mit schrittweise veränderlicher Spannung



Versuchsergebnisse und Modellbildung

Kriechversuche mit zwischenzeitlicher Reduktion der Spannung



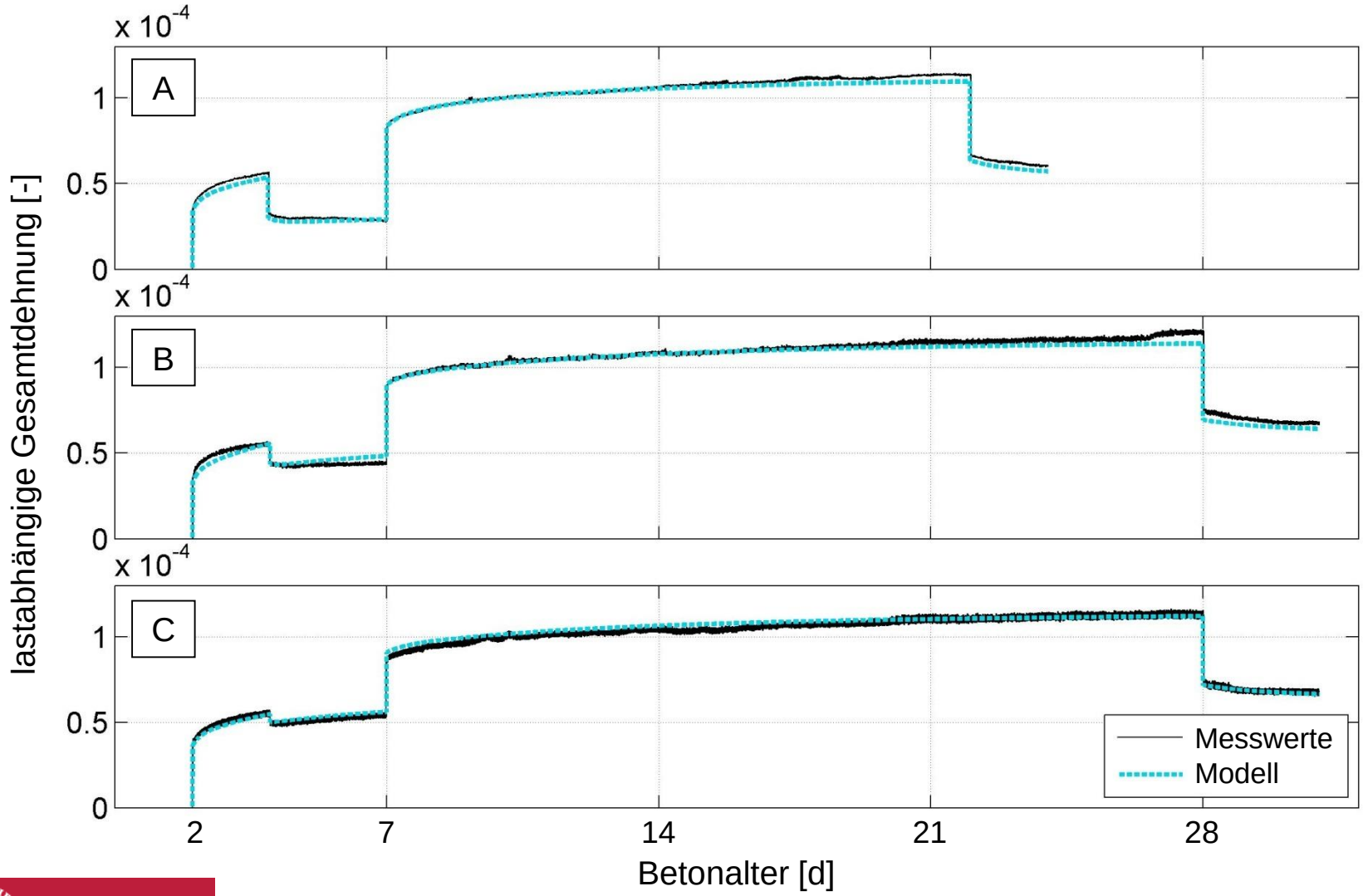
A: Vollständige Entlastung

B: Reduktion auf 50% der vorherigen Spannung

C: Reduktion auf 75% der vorherigen Spannung

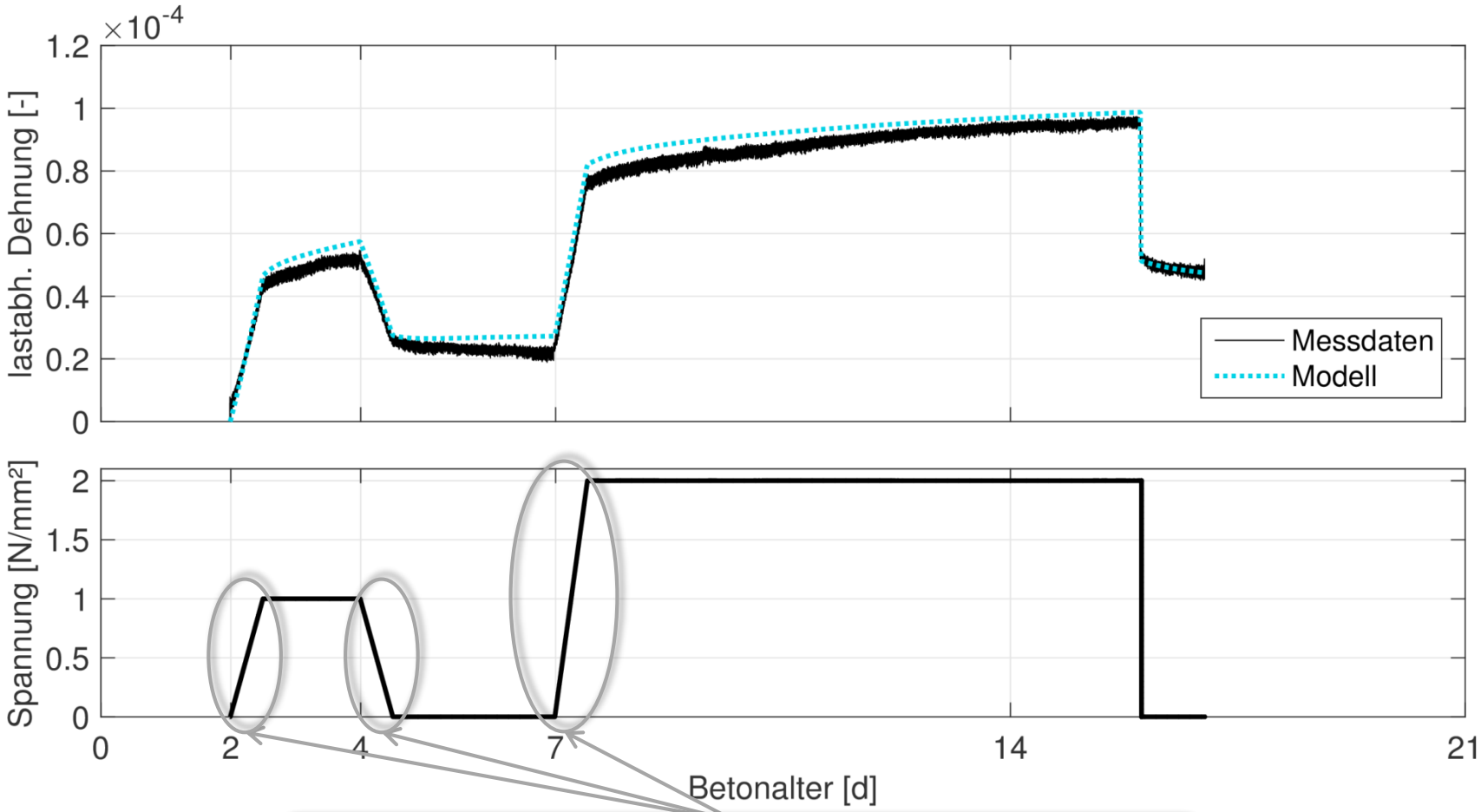
Versuchsergebnisse und Modellbildung

Kriechversuche mit zwischenzeitlicher Reduktion der Spannung



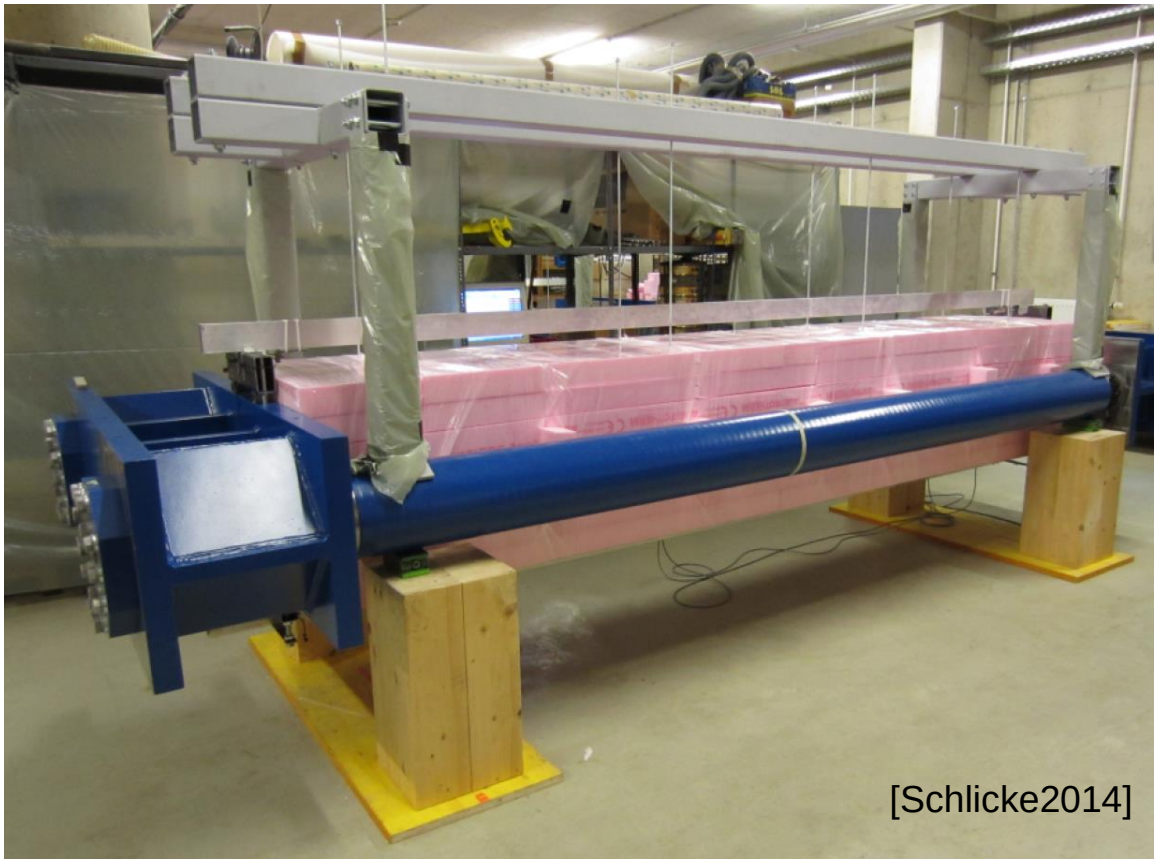
Versuchsergebnisse und Modellbildung

Kriechversuch mit langsamer Belastungsgeschwindigkeit



kontinuierliche Belastung bzw. Entlastung innerhalb von 12 h

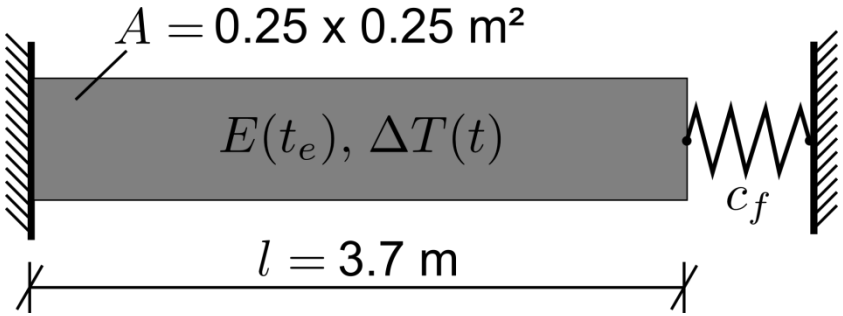
Versuchsergebnisse und Modellbildung
Bauteilversuch mit gezwängtem Stab



- Gezwängter Betonstab (Querschnitt 25 x 25 cm², Länge 3,7 m)
- Temperaturgeschichte wie in massigem Bauteil durch Dämmung mit Styroporplatten

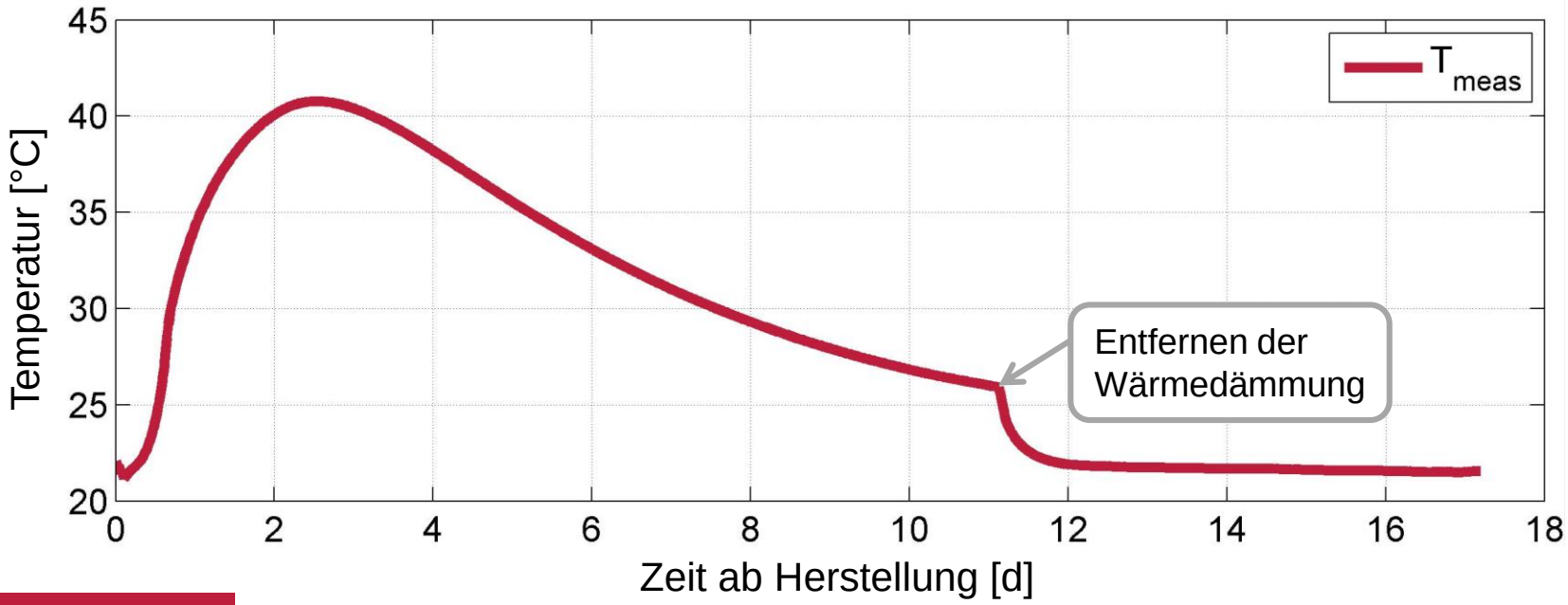
Versuchsergebnisse und Modellbildung

Bauteilversuch mit gezwängtem Stab



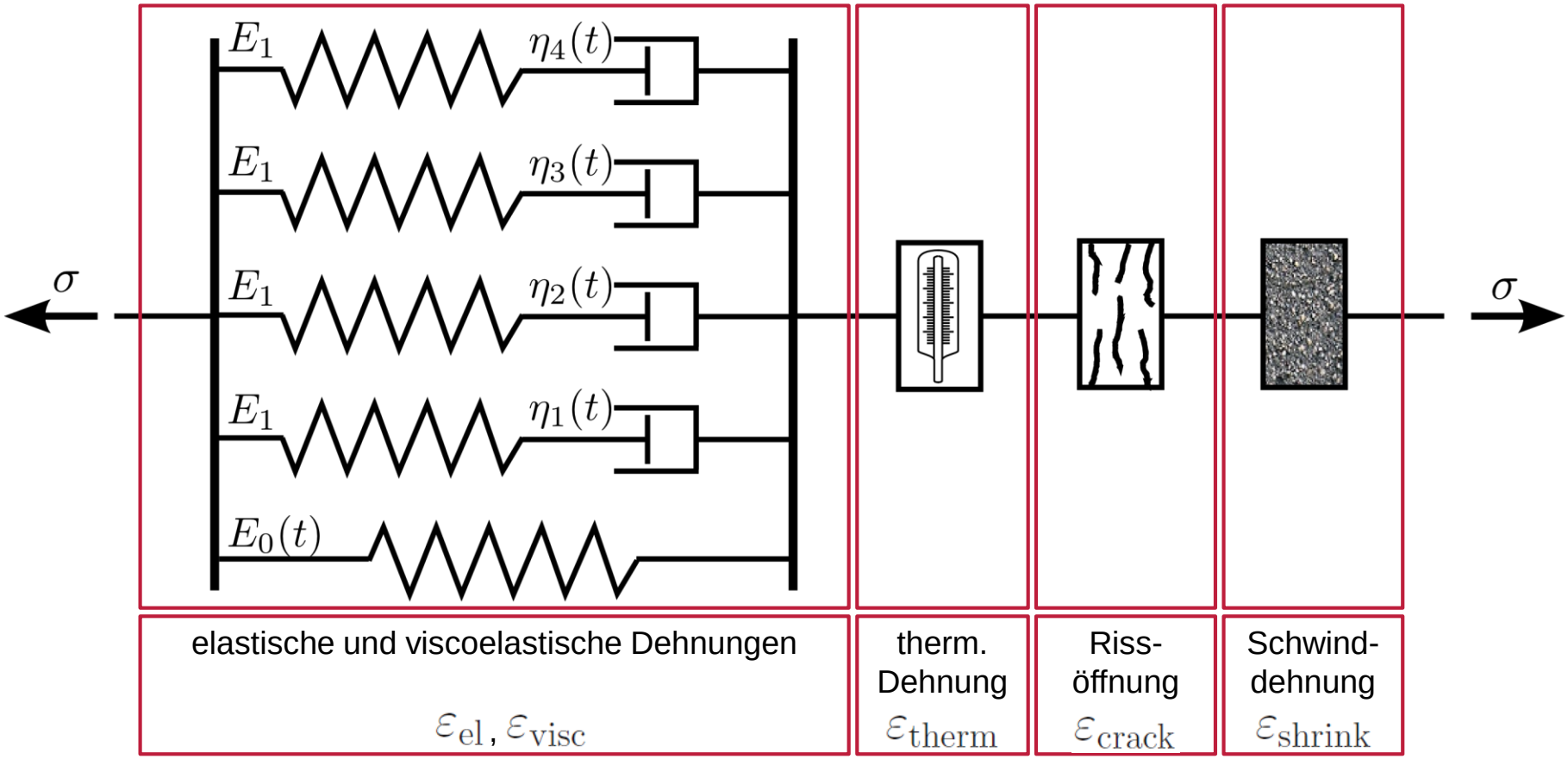
α_T = $1.0 \cdot 10^{-5}$ K^{-1}

c_f = 1053 MN/m



Versuchsergebnisse und Modellbildung

Bauteilversuch mit gezwängtem Stab

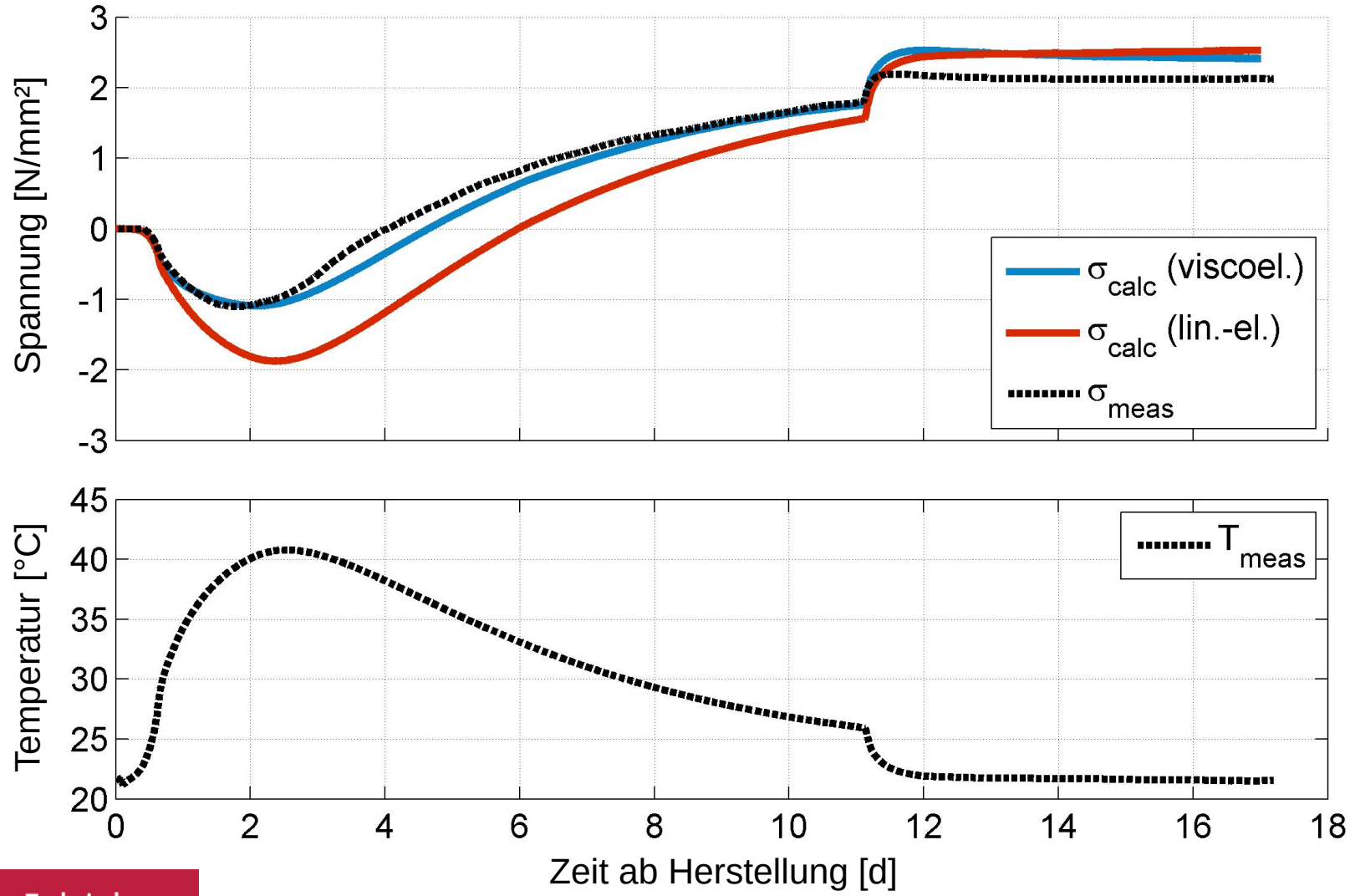


Differentielle Formulierung des Materialgesetzes:

$$\dot{\sigma} = E(t) \cdot \dot{\varepsilon}_{\mathrm{el}} = E(t) \cdot \left(\dot{\varepsilon} - \left(\dot{\varepsilon}_{\mathrm{visc}} + \dot{\varepsilon}_{\mathrm{therm}} + \dot{\varepsilon}_{\mathrm{crack}} + \dot{\varepsilon}_{\mathrm{shrink}}\right)\right)$$

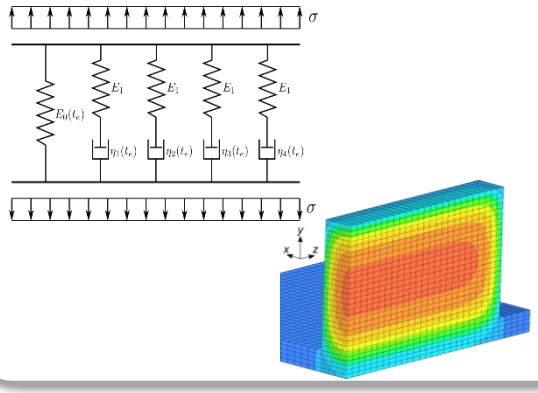
Versuchsergebnisse und Modellbildung

Bauteilversuch mit gezwängtem Stab



Zusammenfassung und Ausblick

Zusammenfassung



- Rheologisches Modell bildet gute Alternative zu bestehenden Ansätzen, insbesondere bei zeitlich veränderlicher Spannung
- Anwendbarkeit für verschiedene Spannungs-Dehnungs-Geschichten und unterschiedliche Betone belegt
- Einfache Implementierung in numerische Simulationen aufgrund differentieller Formulierung möglich

Offene Fragen und weiterer Forschungsbedarf

$\leftarrow \rightarrow \quad \rightarrow \leftarrow$

$\eta(t_e, \sigma, \ldots)$

$$E_i(t_e) = f(t_e, f_{cc}, w/z, d_G, m_G, \ldots)$$
$$\eta_i(t_e) = f(t_e, f_{cc}, w/z, d_G, m_G, \ldots)$$

- Unterschiede und Analogien bei Zug- und Druckkriechen
- Erweiterung des rheologischen Modells um nichtlineares Verhalten
- Allgemeingültige Beschreibung der Modellparameter in Abhängigkeit der Betonzusammensetzung und weiterer betonspezifischer Kenngrößen

Danksagung

Förderung:

DFG Deutsche Forschungsgemeinschaft

Projektpartner:

TU Graz
Institut für Betonbau