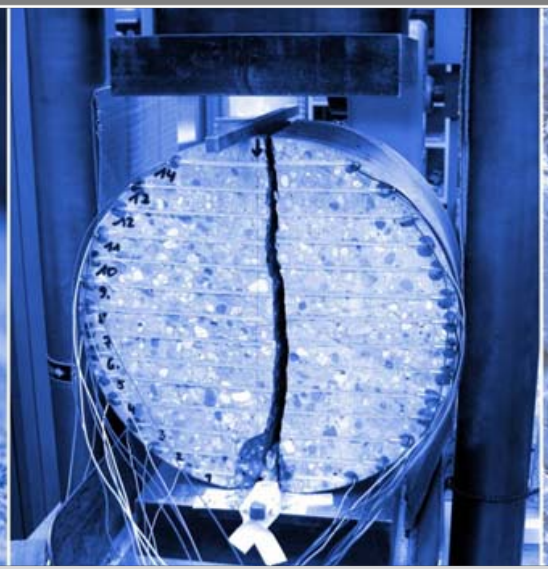
Karlsruher Institut für Technologie

Modelle für Beton im neuen Eurocode 2

Harald S. Müller, KIT Karlsruhe

Institut für Massivbau und Baustofftechnologie – Abteilung Baustoffe und Betonbau

IMB KARLSRUHE



Deutscher Ausschuss für Stahlbeton

7. Jahrestagung
60. Forschungskolloquium

Hannover
28.-29. Oktober 2019

Eurocode 2 Revision – CEN TC250 SC2 WG1

TG 7 “Time dependent effects”

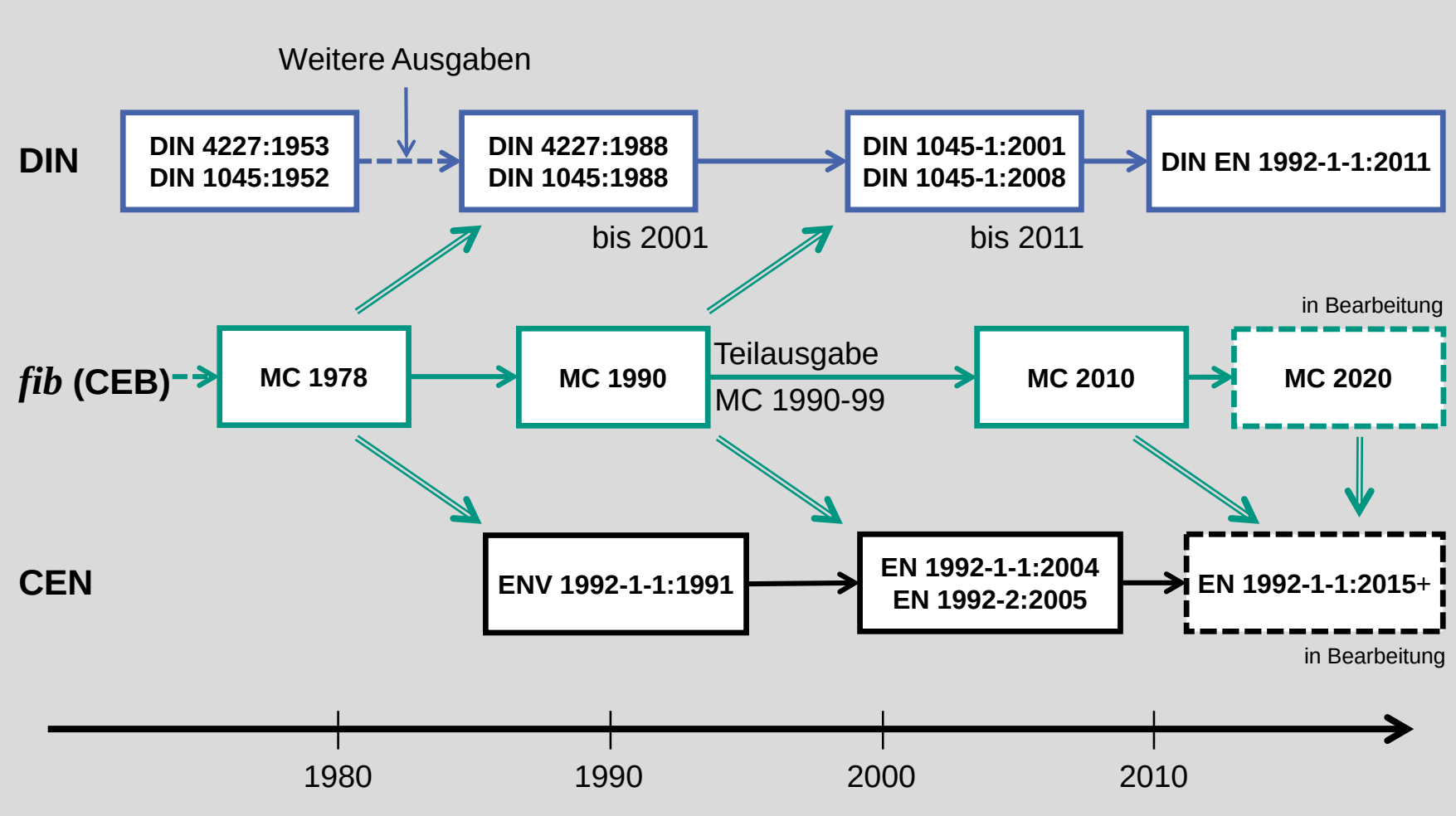
- Eingerichtet: 2013
- Obmann: Müller (DE)
- Mitglieder: Kanstad (NO), Perez (ES), Schwabach (DE), Stack (IE), Stevula (CZ), Takacs (UK), Torrenti (FR), Tosic (RS), Vogt (SE), Wendner (BE);
  Gäste: Hallgren (SE), Acosta (DE)
- Arbeitsergebnisse: Beiträge zur prEN 1992-1-1:2019 **heutiger Vortrag**
  - Section 5.1: “Concrete”
  - Annex B: “Time dependent behaviour of materials …”
  - Annex D: “Evaluation of early-age and long-term cracking due to restraint”
  - Annex N: “Recycled aggregates concrete structures”

Überblick

Modelle für Beton im neuen Eurocode 2

- Zur Entwicklungsgeschichte normativer Modelle
- Charakteristische Kennwerte: Definitionen und Festlegungen
- Elastische Verformung, Sekanten- und Tangentenmodul
- Kriechen – Kennwerte und Stoffgesetz (linearer Teil)
- Schwinden

Betonmodelle in Richtlinien



prEN 1992-1-1:2019 – Section 5.1 Concrete

- Gliederung:

alt:	neu:
3.1.1 General	3.1.1 General
3.1.2 Strength	5.1.2 Properties and related conditions
3.1.3 Elastic deformation	5.1.3 Strength
3.1.4 Creep and shrinkage	5.1.4 Elastic deformation
3.1.4 Stress strain relations …	5.1.5 Creep and shrinkage
	5.1.6 Design assumptions

Inhalte grundlegend neu abgefasst

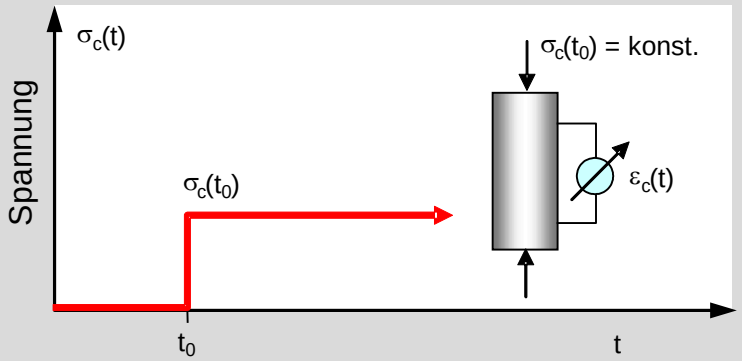
- Charakteristische Festigkeit bis C100 (alt: C90)

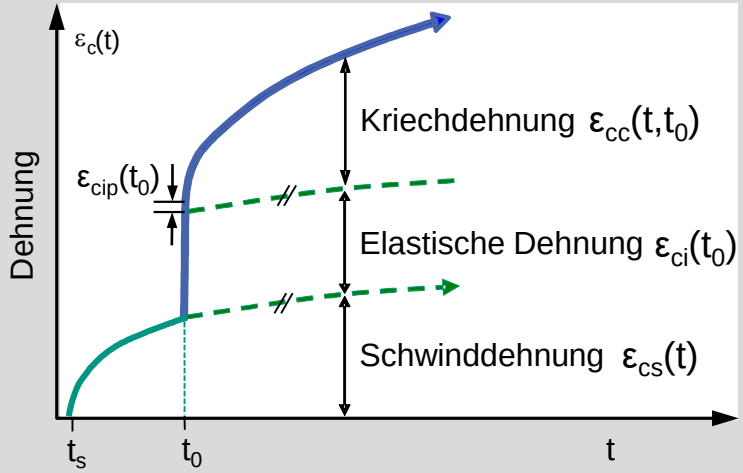
  Würfelfestigkeiten und Verformungskennwerte in Tabelle 5.1 gestrichen

- Referenzalter 28 Tage („in general“); zwischen 28 und 91 Tagen optional („may be taken when specified“)

Last- und zeitabhängige Verformungen –
Elastische Verformung, Kriechen und Schwinden

Verformungsmerkmale





Definitionen

Gesamtdehnung

$$\varepsilon_c(t) = \varepsilon_{cs}(t,t_s) + \varepsilon_{ci}(t_0) + \varepsilon_{cc}(t,t_0)$$

Kriechzahl und E-Modul

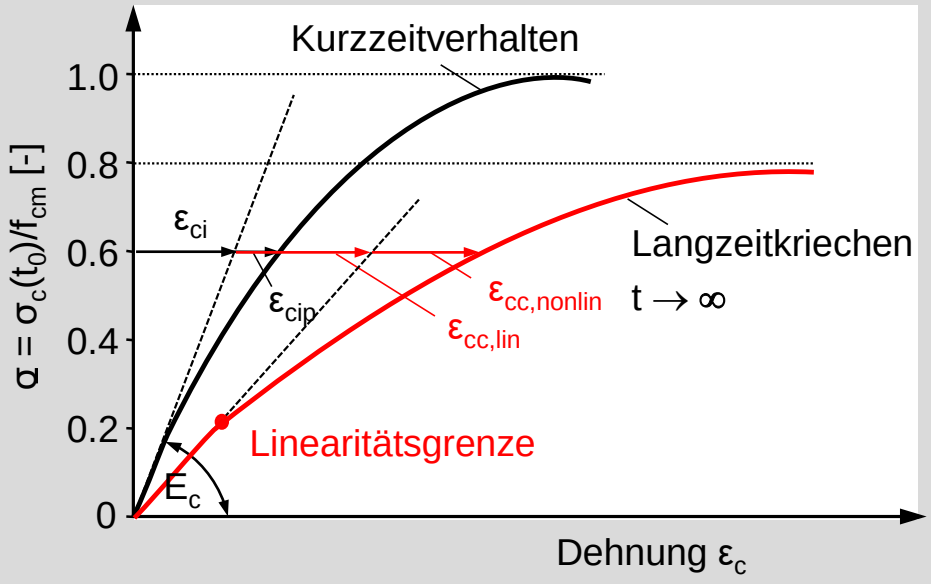
$$\varphi(t,t_0) = \frac{\varepsilon_{cc}(t,t_0)}{\varepsilon_{ci,\,28}} = \varepsilon_{cc}(t,t_0) \cdot \frac{E_c}{\sigma_c(t_0)}$$

mit: E_c = Tangentenmodul

$\varepsilon_{ci,28}$ = Elastische Verformung im Alter von 28 Tagen

Anfangsverformung / elastische Verformung und abgeleitete Verformungsmodule für Beton

Dehnung bei Kurz- u. Langzeitbeanspruchung



Verfomungsmodule E_{ci} und E_c

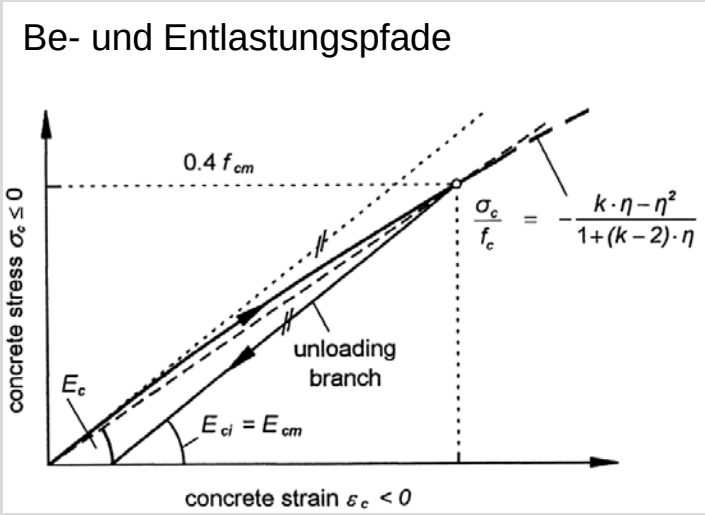


Abbildung aus MC 2010

Bezeichnung / Definition der E-Module:

- MC 1990, MC 2010: E_{ci} = Tangentenmodul; E_c = Sekantenmodul
- EN 1992-1-1:2004: E_{cm} = Sekantenmodul; E_c = Tangentenmodul

!

Beachte: Im Text des MC 2010 bezeichnet E_{cm} den Mittelwert des Tangentenmoduls

Angaben zum E-Modul in der EN 1992-1-1

EN 1992-1-1:2004

Sekantenmodul, E_{cm}:

$$E_{cm} = 22000 \cdot k_E \cdot \left[\frac{f_{cm}}{10}\right]^{0,3}$$

Quelle: MC1990, aber …

resultiert aus Anpassung d. Exponents u. Verwechslung von Sekanten- u. Tangentenmodul

Gesteinskörnung:

Art der Gesteinskörnung	k_E
Basalt, dichter Kalkstein	1,2
Quarzit	1,0
Kalkstein	0,9
Sandstein	0,7

prEN 1992-1-1:2019

Sekantenmodul, E_{cm}:

$$E_{cm} = 9500 \cdot k_E \cdot [f_{cm}]^{1/3} = 20500 \cdot k_E \cdot \left[\frac{f_{cm}}{10}\right]^{1/3}$$

übereinstimmend mit MC 2010 und MC 1990

Gesteinskörnung:

Art der Gesteinskörnung	k_E
–	
Quarzit	1,0
andere Gesteinsart	0,5 … 1,3
–	

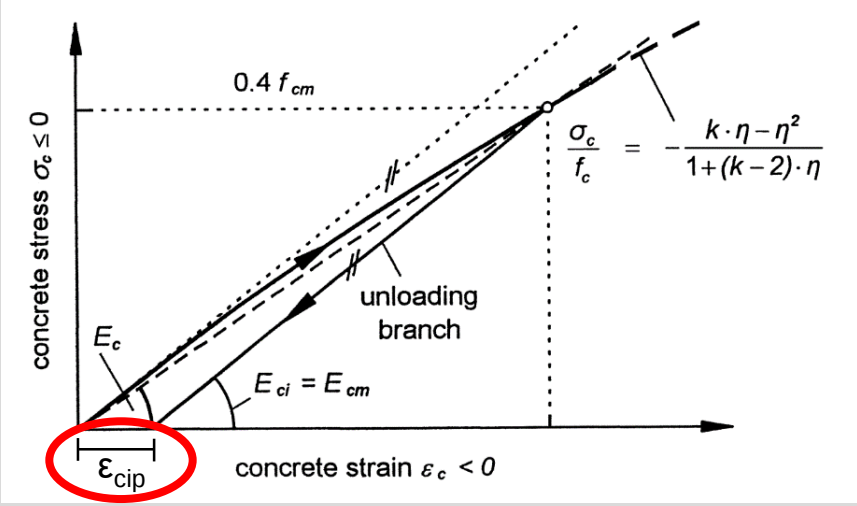
Tangentenmodul, E_c: $E_c = 1{,}05 \cdot E_{cm}$

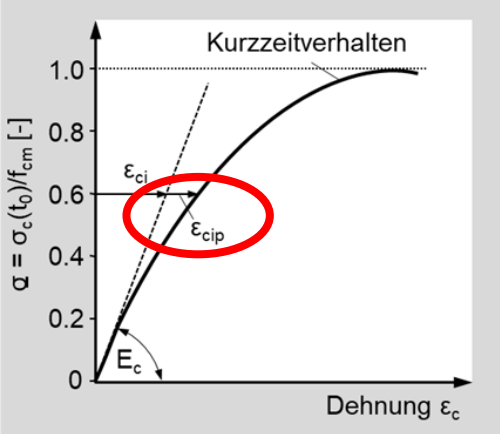
Kriechdehnung, $\varepsilon_{cc}(\infty, t_0)$: $\varepsilon_{cc}(\infty, t_0) = \varphi(\infty, t_0) \cdot \frac{\sigma_c}{E_c}$

Wenn bei einer Bemessung Kriechberechnungen durchgeführt werden, muss mit dem Tangentenmodul gerechnet werden.

Zusammenhang zwischen den E-Modulen

Sekanten und Tangentenmodul, E_{cm} und E_c





ε_{cip} = Setzdehnung (concrete initial plastic deformation)

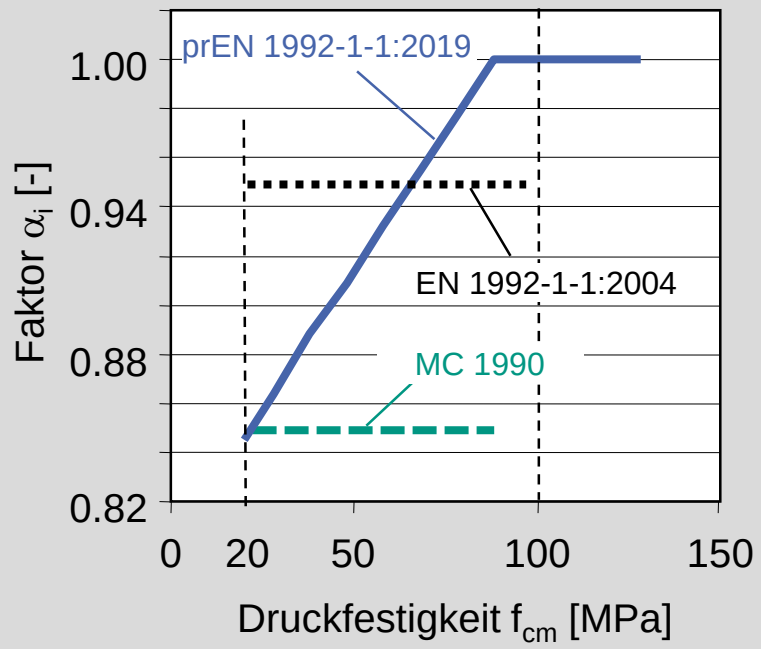
- kennzeichnet Unterschied zw. E_{cm} u. E_c
- sinkt mit steigender Festigkeit → Faktor α_i

Korrelation zwischen E_{cm} und E_c:

$$E_{cm} = \alpha_i \cdot E_c \quad \text{with:} \quad \alpha_i = 0.8 + 0.2 \cdot \frac{f_{cm}}{88\ \text{MPa}} \leq 1.0$$

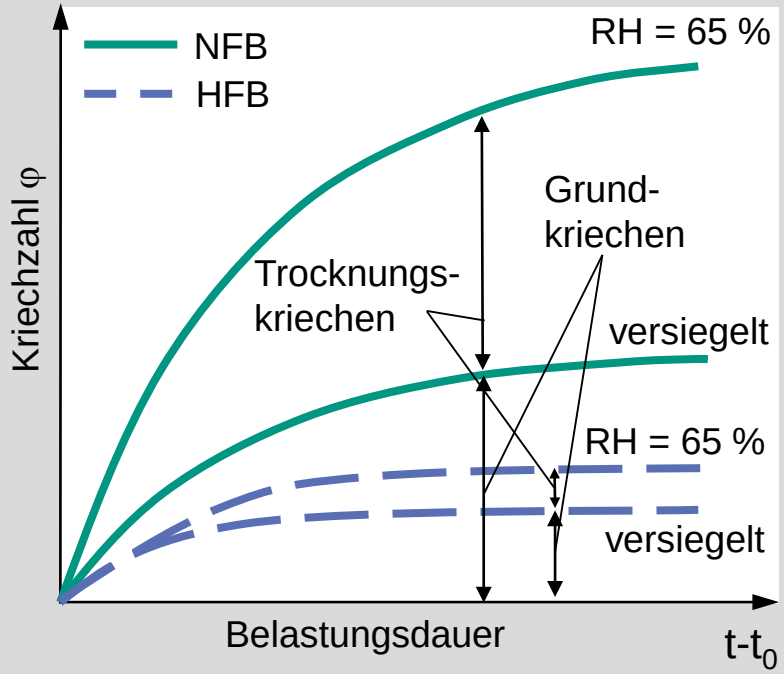
prEN 1992-1-1:2019, Annex B

Faktor α_i



Ansätze für die Formulierung der Kriechzahl

EN 1992-1-1:2004	prEN 1992-1-1:2019 | MC 2010, EN 1992-2:2005
$\varphi(t,t_0) = \underbrace{\varphi_0 \cdot \beta_c(t-t_0)}_{\text{total creep, Gesamtkriechen}}$	$\varphi(t,t_0) = \underbrace{\varphi_{b0} \cdot \beta_{bs}(t-t_0)}_{\text{basic creep, Grundkriechen}} + \underbrace{\varphi_{d0} \cdot \beta_{dc}(t-t_0)}_{\text{drying creep, Trocknungskriechen}}$

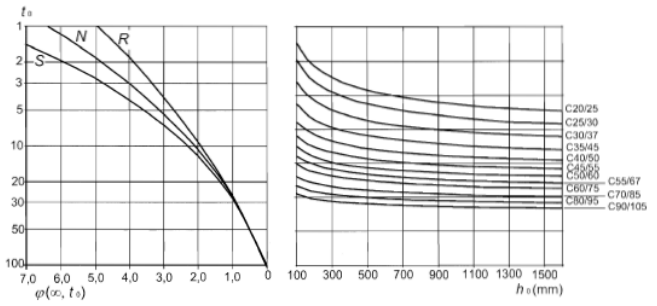


Aufspaltung in Grund- und Trocknungs-kriechen ermöglicht die zutreffende Berücksichtigung der Umgebungsbe-dingungen auf das Kriechen bei normalfestem und hochfestem Beton

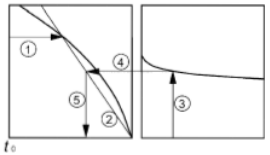
Konzept erstmals umgesetzt/veröffentlicht in MC 1990-99 (als Weiterentwicklung des MC 1990-Ansatzes)

Kriechangaben im Hauptkapitel der EN 1992-1-1

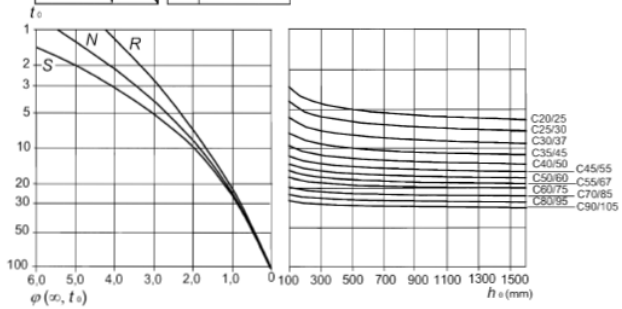
EN 1992-1-1:2004 – Fig. 3.1



a) inside conditions - RH = 50%



Note:
- intersection point between lines 4 and 5 can also be above point 1
- for t_0 > 100 it is sufficiently accurate to assume t_0 = 100 (and use the tangent line)



b) outside conditions - RH = 80%

Figure 3.1: Method for determining the creep coefficient $\varphi(\infty, t_0)$ for concrete under normal environmental conditions

prEN 1992-1-1:2019 – Tab. 5.2

Table 5.2 Creep coefficient $\varphi(50y,t_0)$ of plain concrete after 50 years of loading

Age at loading t_0 [days]			Dry atmospheric conditions (RH = 50 %)				Humid atmospheric conditions (RH = 80 %)			
Cement [a]			Notional size, h_n [b] [mm]							
L	N	R	100	200	500	1000	100	200	500	1000
3	1	1	4,2	3,8	3,4	3,1	3,0	2,8	2,6	2,5
10	7	3	3,1	2,8	2,5	2,3	2,2	2,1	2,0	1,9
32	28	23	2,4	2,2	1,9	1,8	1,7	1,6	1,6	1,5
91	91	91	1,9	1,7	1,5	1,4	1,4	1,3	1,2	1,2
365	365	365	1,4	1,3	1,1	1,0	1,0	0,9	0,9	0,8
Correction factor A			0,82	0,79	0,75	0,72	0,71	0,68	0,66	0,64

Notes:

NOTE 1 For geometries outside the given range of notional size, Annex B shall be used.

NOTE 2 The values of the creep coefficient are based on a C35 concrete. More accurate creep coefficients for concretes in the range of 12 MPa ≤ f_{ck} ≤ 100 MPa may be obtained, if the values are multiplied by the factor $(35/(f_{ck}))^A$, where A is the correction factor in the table.

NOTE 3 The values of the creep coefficient are mean values with a coefficient of variation of about 30%.

[a] L, N and R stand for slowly, normal and rapid hardening cements, respectively

[b] h_0 is the notional size = $2A_c / u$, where A_c is the concrete cross-sectional area and u is the perimeter of that part which is exposed to drying

tional size = 2Ac / u, where Ac is the concrete cross-sectional area and u is the perimeter of that part which is exposed to drying

Vergleich der Ansätze für die Kriechzahl

EN 1992-1-1:2004

$$\varphi(t,t_0) = \varphi_{RH} \cdot \beta(f_{cm}) \cdot \beta(t_0) \cdot \left[\frac{(t-t_0)}{\beta_h + t - t_0}\right]^{0.3}$$

mit: $\varphi_{RH} = \varphi_{RH,b} + \varphi_{RH,d} = \left[1 + \frac{1 - RH/RH_0}{\sqrt[3]{0{,}1 \cdot h/h_0}} \cdot \alpha_1\right] \cdot \alpha_2$

Grundkriechen Trocknungskriechen

EN 1992-2:2005

$$\varphi(t,t_0) = \varphi_{b0} \cdot \frac{\sqrt{t-t_0}}{\sqrt{t-t_0} + \beta_{bc}(t_0)} + \varphi_{d0} \cdot \left[\varepsilon_{cd}(t) - \varepsilon_{cd}(t_0)\right]$$

prEN 1992-1-1:2019 = Model Code 2010

$$\varphi(t,t_0) = \beta_{bc}(f_{cm}) \cdot \ln\left\{(30/t_0 + 0.035)^2 \cdot (t-t_0) + 1\right\}$$
$$+ \beta_{dc}(f_{cm}) \cdot \beta(RH) \cdot \beta_{dc}(t_0) \cdot \left[\frac{t-t_0}{\beta_h + (t-t_0)}\right]^{\gamma(t_0)}$$

Bemerkungen

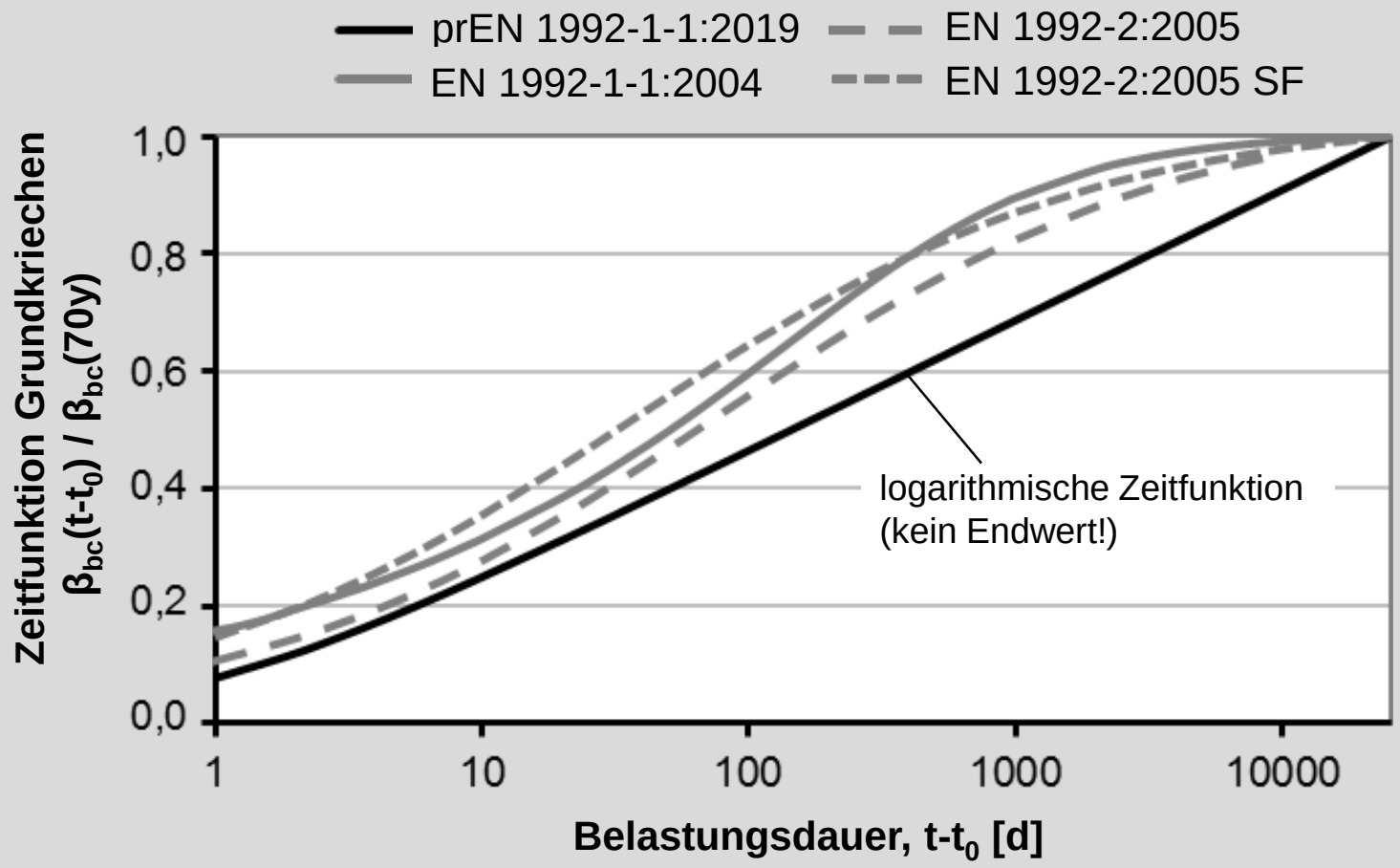
Gültig für normal- und hochfesten Beton; gleiche Kinetik (Verlaufs-funktion) für beide Betonarten

Gültig nur für hochfesten Beton; konstitutive Beziehung für das Trocknungskriechen: “rate-type” (Dischinger-type, wie DIN 4227)

Gültig für normal- und hochfesten Beton; unterschiedliche Kinetik (Verlaufsfunktion) für beide Betonarten

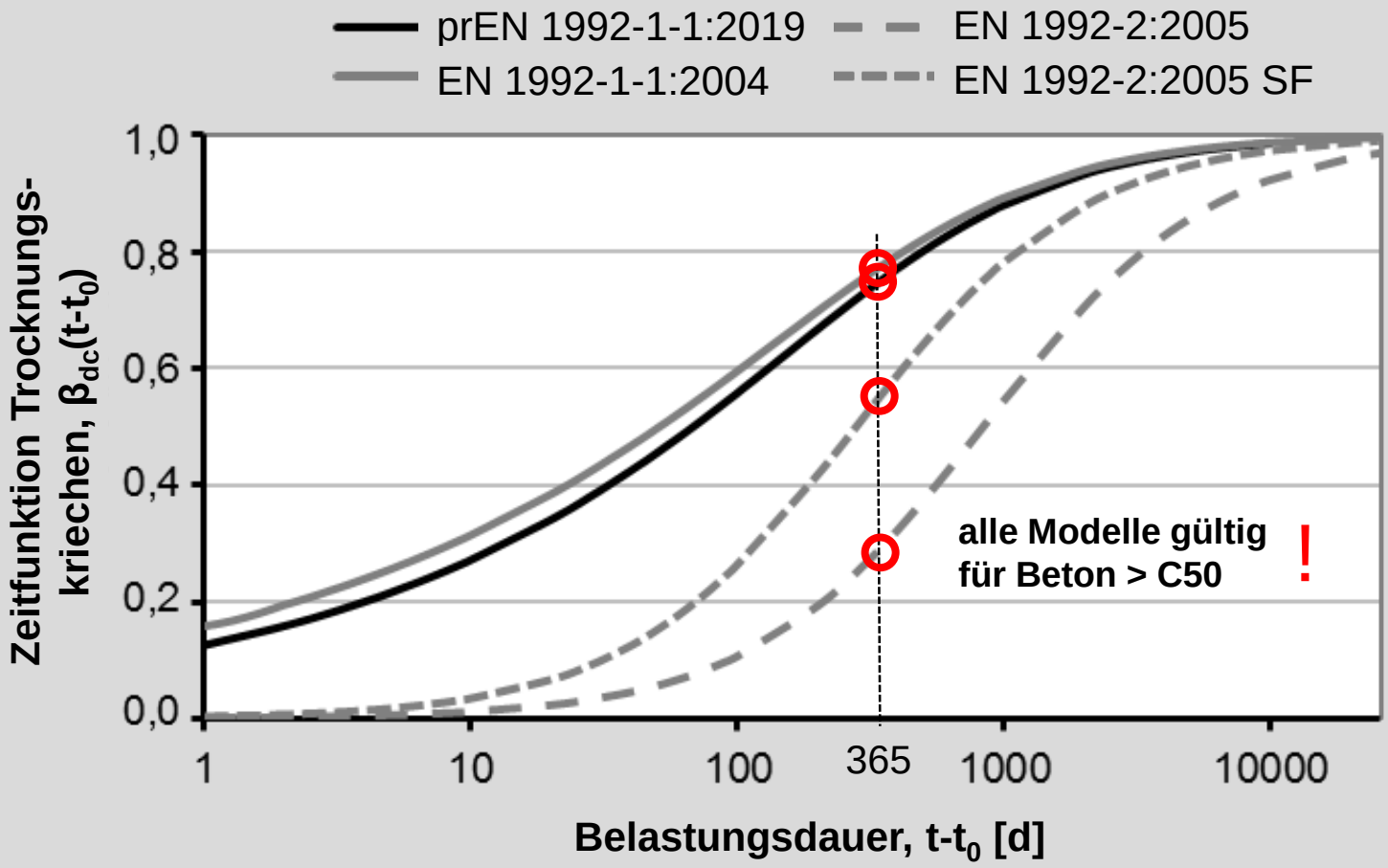
Zeitliche Entwicklung des Grundkriechens

Vergleich für t_0 = 28 d, h = 200 mm, bezogen auf den 70-Jahre-Wert (SF = Silikastaub)



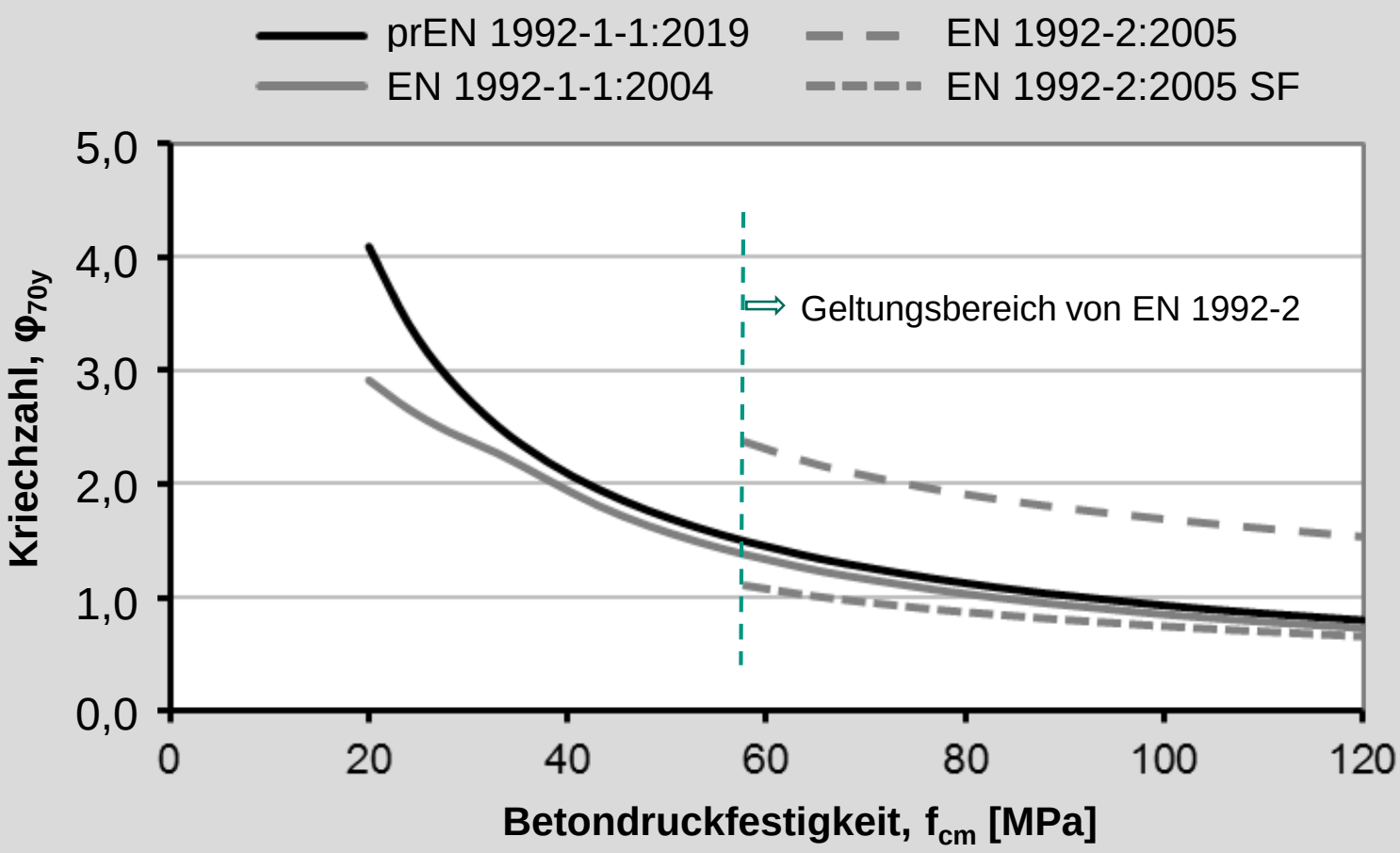
Zeitliche Entwicklung des Trocknungskriechens

Vergleich für t_0 = 28 d, h = 200 mm, RH = 65 %, f_{cm} = 80 N/mm² (SF = Silikastaub)



Gesamtkriechen nach 70 Jahren

Vergleich für t_0 = 28 d, h = 200 mm, RH = 65 % (SF = Silikastaub)



Konstitutive Modellierung des Kriechens

EN 1992-1-1:2004 und prEN 1992-1-1:2019

$$\varepsilon_{c\sigma}(t) = J(t,t_0)\cdot\sigma_c(t_o) + \int_{t_o}^{t} J(t,\tau)\cdot\frac{\partial\sigma_c(\tau)}{\partial\tau}\cdot d\tau$$

mit: $$J(t,t_0) = \frac{1}{E_c(t_0)} + \frac{\varphi(t,t_0)}{E_c}$$

$$\varphi(t,t_0) = \varepsilon_{cc}(t,t_0)\cdot\frac{E_c}{\sigma_c(t_0)}$$

- Der lineare Ansatz (Boltzmann-Prinzip) wird beibehalten; eine partielle nichtlineare Erweiterung ist enthalten
- Die Schwäche des Produktansatzes für die Kriechzahl wird durch die Wahl abgestimmter Zeitfunktionen minimiert bzw. eliminiert

Kriechzahl, Alterung u. zeitl. Entwickl.

Produktansatz:

prEN 1992-1-1:2019

$$\varphi(t,t_0) = \beta_{bc}(f_{cm})\cdot\beta_{bc}(t,t_0) + \beta_{dc}(f_{cm})\cdot\beta(RH)\cdot\beta_{dc}(t_0)\cdot\beta_{dc}(t,t_0)$$

Zeitfunktionen:

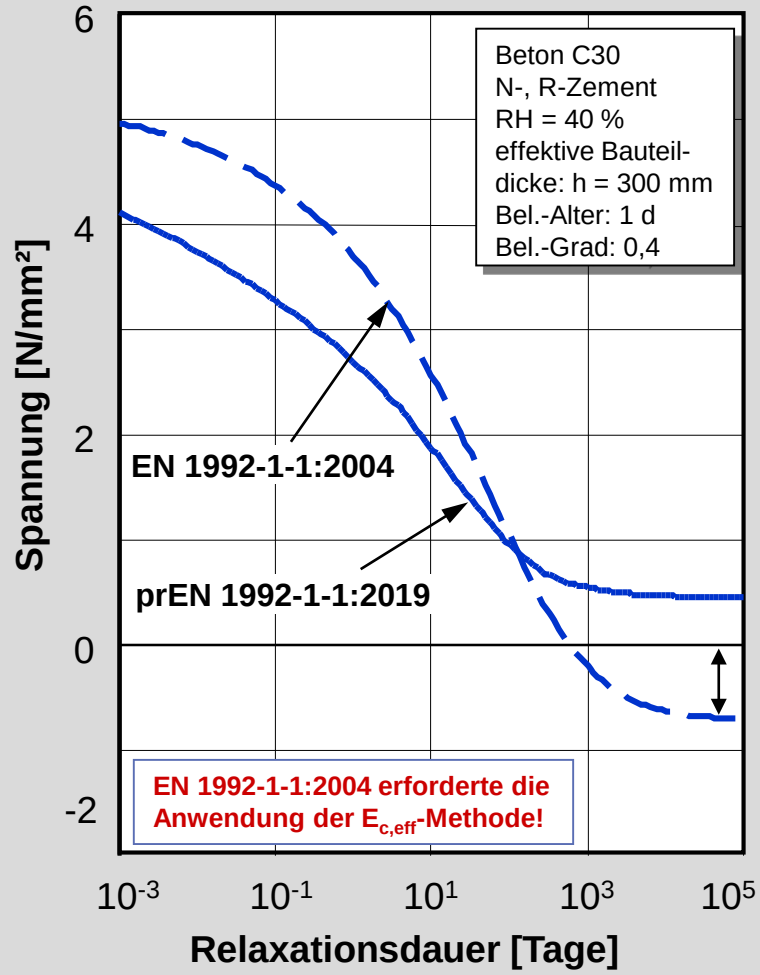
prEN 1992-1-1:2019

$$\beta_{bc}(t,t_0) = \ln\left(\left(\frac{30}{t_{0,adj}} + 0.035\right)^2\cdot(t-t_0)+1\right)$$

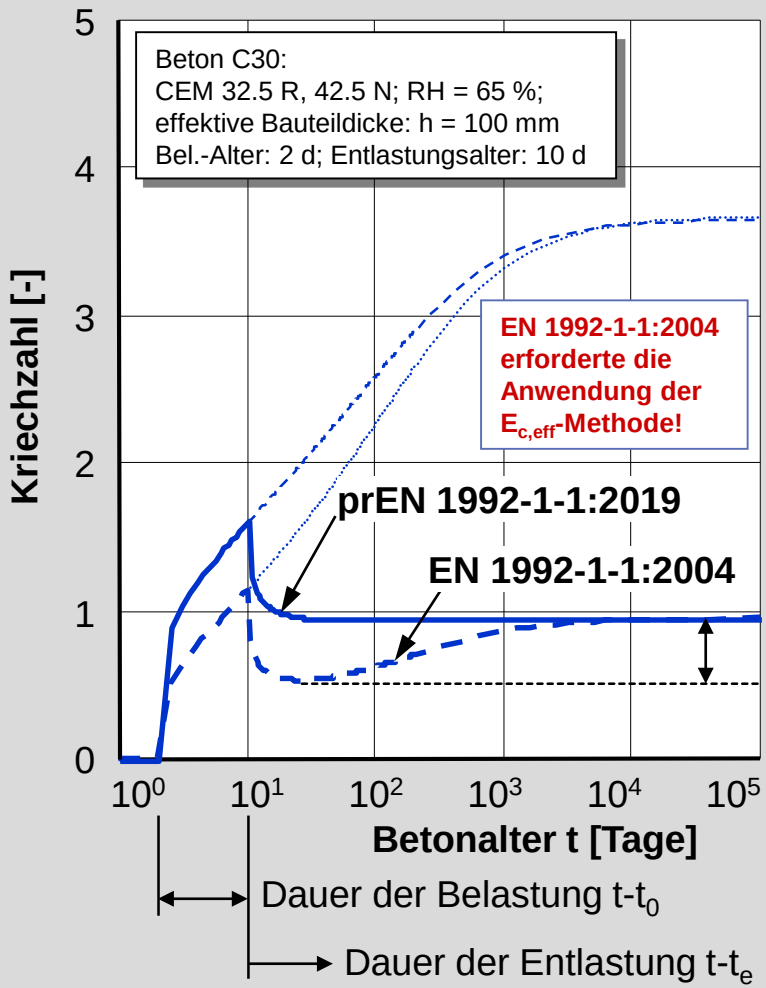
$$\beta_{dc}(t,t_0) = \left[\frac{(t-t_0)}{\beta_H + (t-t_0)}\right]^{\frac{1}{2.3+\frac{3.5}{\sqrt{t_{0,adj}}}}}$$

Vorhersagen bei Relaxation und Entlastung

Relaxation



Entlastung



Verbesserung der Kriechvorhersage durch Kurzzeitversuche nach prEN 1992-1-1:2019

Gesamtkriechen

$$\varphi(t,t_0) = \xi_{bc1} \cdot \varphi_{bc}(t,t_0) + \xi_{dc1} \cdot \varphi_{dc}(t,t_0)$$

Regressions-parameter

Zeitliche Entwicklung

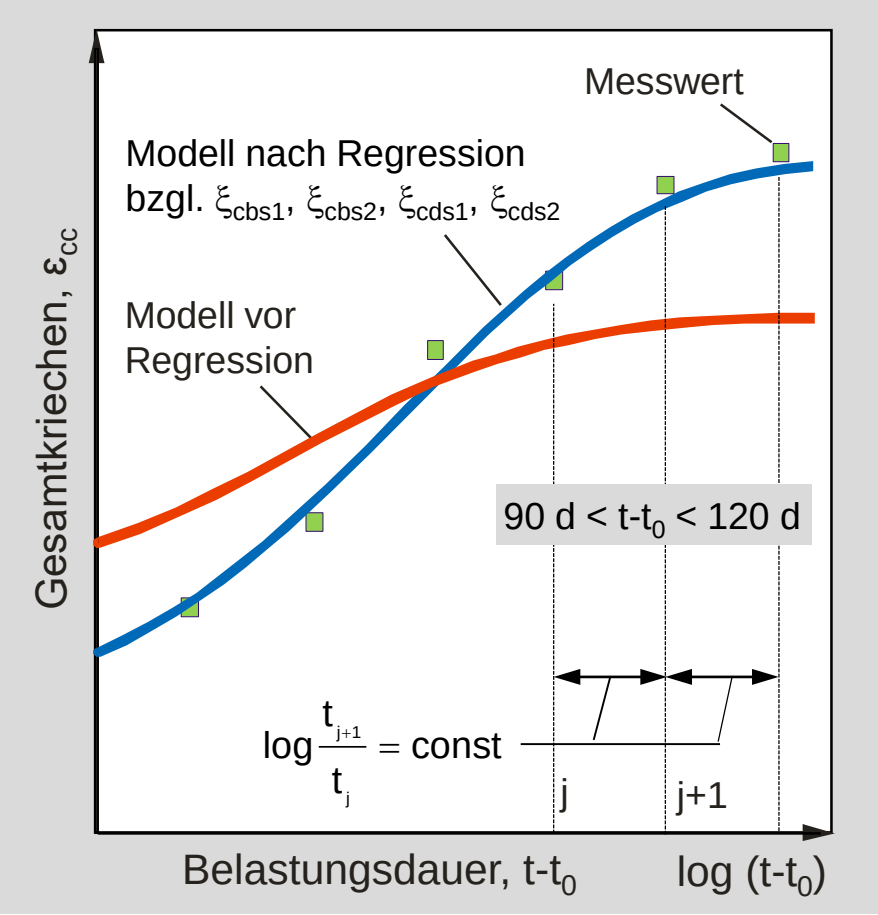
Grundkriechen:

$$\beta_{bc}(t,t_0) = \ln\left(\left(\frac{30}{t_{0,adj}} + 0{,}035\right)^2 \cdot \frac{(t-t_0)}{\xi_{bc2}} + 1\right)$$

Trocknungskriechen:

$$\beta_{dc}(t,t_0) = \left(\frac{(t-t_0)}{\beta_h \cdot \xi_{dc2} + (t-t_0)}\right)^{\gamma(t_0)}$$

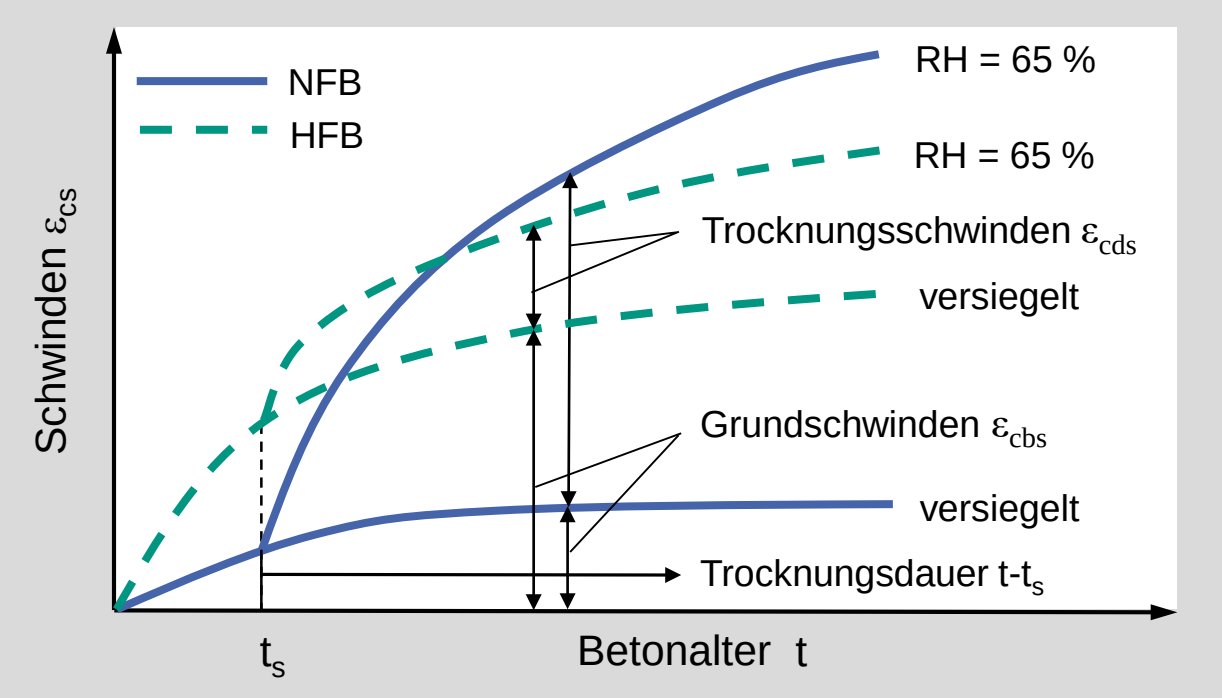
Regressions-parameter



Genauigkeitsgewinn durch Versuche: Variationskoeff. sinkt von ca. 30 % auf ca. 10 %

Modellierung des Schwindens

Konventionell (vor 1999)	Komponentenansatz (MC 1990-99, EN 1992-1-1:2004)
$\varepsilon_{cs}(t,t_s) = \underbrace{\varepsilon_s(f_{cm}) \cdot \beta_{RH} \cdot \beta_s(t-t_s)}_{\text{Gesamtschwinden } \varepsilon_{cs}}$	$\varepsilon_{cs}(t,t_s) = \underbrace{\varepsilon_{cbs0}(f_{cm}) \cdot \beta_{bs}(t)}_{\text{Grundschwinden } \varepsilon_{cbs}} + \underbrace{\varepsilon_{cds0}(f_{cm}) \cdot \beta_{RH}(t) \cdot \beta_{ds}(t-t_s)}_{\text{Trocknungsschwinden } \varepsilon_{cds}}$



NFB

$\varepsilon_{cbs} < 0.05 \cdot \varepsilon_{cs}$

→ vernachlässigbar

HFB

$\varepsilon_{cbs} >> 0.05 \cdot \varepsilon_{cs}$

→ Ansatz:

$$\varepsilon_{cs} = \varepsilon_{cbs} + \varepsilon_{cds}$$

Schwindangaben im Hauptkapitel der EN 1992-1-1

EN 1992-1-1:2004 – Tab. 3.2 and 3.4

Table 3.2 Nominal unrestrained drying shrinkage values $\varepsilon_{cd,0}$ (in ‰) for concrete with cement CEM Class N

$f_{ck}/f_{ck,cube}$ (MPa)	Relative Humidity (in %)					
	20	40	60	80	90	100
20/25	0.62	0.58	0.49	0.30	0.17	0.00
40/50	0.48	0.46	0.38	0.24	0.13	0.00
60/75	0.38	0.36	0.30	0.19	0.10	0.00
80/95	0.30	0.28	0.24	0.15	0.08	0.00
90/105	0.27	0.25	0.21	0.13	0.07	0.00

The development of the drying shrinkage strain in time follows from:

$$\varepsilon_{cd}(t) = \beta_{ds}(t, t_s) \cdot k_h \cdot \varepsilon_{cd,0} \quad (3.9)$$

where

k_h is a coefficient depending on the notional size h_0 according to Table 3.3

Table 3.3 Values for k_h in Expression (3.9)

h_0	k_h
100	1.0
200	0.85
300	0.75
≥ 500	0.70

$$\beta_{ds}(t, t_s) = \frac{(t - t_s)}{(t - t_s) + 0{,}04\sqrt{h_0^3}} \quad (3.10)$$

The autogenous shrinkage strain follows from:

$$\varepsilon_{ca}(t) = \beta_{as}(t)\, \varepsilon_{ca}(\infty) \quad (3.11)$$

where:

$$\varepsilon_{ca}(\infty) = 2{,}5\,(f_{ck} - 10)\, 10^{-6} \quad (3.12)$$

and

$$\beta_{as}(t) = 1 - \exp(-0{,}2t^{0{,}5}) \quad (3.13)$$

where t is given in days.

prEN 1992-1-1:2019 – Tab. 3.4

Table 5.3: Nominal total shrinkage values $\varepsilon_{cs,50y}$ (in ‰) for concrete after a duration of drying of 50 years

Cement [a]	Concrete strength f_{ck} [MPa]	Dry atmospheric conditions (*RH* = 50 %)				Humid atmospheric conditions (*RH* = 80 %)			
		Notional size, h_n [mm]							
		100	200	500	1000	100	200	500	1000
L	20	0,56	0,55	0,47	0,35	0,33	0,32	0,28	0,21
	35	0,51	0,50	0,44	0,34	0,33	0,32	0,29	0,23
	50	0,48	0,47	0,42	0,34	0,33	0,32	0,30	0,25
	80	0,46	0,45	0,41	0,35	0,35	0,34	0,32	0,29
N	20	0,67	0,66	0,57	0,41	0,39	0,38	0,33	0,25
	35	0,61	0,59	0,52	0,39	0,37	0,37	0,32	0,25
	50	0,56	0,55	0,49	0,38	0,37	0,36	0,32	0,26
	80	0,51	0,50	0,45	0,37	0,36	0,36	0,33	0,29
R	20	0,88	0,86	0,74	0,53	0,51	0,49	0,43	0,31
	35	0,77	0,75	0,65	0,48	0,46	0,45	0,39	0,30
	50	0,69	0,68	0,59	0,45	0,43	0,42	0,37	0,30
	80	0,59	0,58	0,52	0,41	0,40	0,39	0,36	0,30

Notes:

NOTE 1 The values are mean values with a coefficient of variation of about 30 %

NOTE 2 h_0 is defined in the notes to Table 5.2

[a] L, N and R stand for slowly, normal and rapid hardening cements, respectively.

Vergleich der Ansätze zum Grundschwinden

EN 1992-1-1:2004

$$\varepsilon_{cas}(t) = \varepsilon_{ca}(\infty) \cdot \beta_{as}(t)$$

$$\varepsilon_{ca}(\infty) = 2{,}5\left(f_{ck} - 10\right) \cdot 10^{-6}$$

$$\beta_{as}(t) = 1 - \exp\left(-0{,}2 \cdot t^{0{,}5}\right)$$

EN 1992-2:2005

für t < 28 Tage:

$$\frac{f_{cm}(t)}{f_{ck}} < 0{,}1 \;\rightarrow\; \varepsilon_{ca}(t) = 0$$

$$\frac{f_{cm}(t)}{f_{ck}} \geq 0{,}1 \;\rightarrow\; \varepsilon_{ca}(t) = \left(f_{ck} - 20\right) \cdot \left(2{,}2\frac{f_{cm}(t)}{f_{ck}} - 0{,}2\right) \cdot 10^{-6}$$

für t ≥ 28 Tage:

$$\varepsilon_{ca}(t) = \left(f_{ck} - 20\right) \cdot \left[2{,}8 - 1{,}1 \cdot \exp\left(-t/96\right)\right] \cdot 10^{-6}$$

prEN 1992-1-1:2019

$$\varepsilon_{cbs}(t) = \varepsilon_{cbs0}(f_{cm}) \cdot \beta_{bs}(t)$$

$$\varepsilon_{cbs0}(f_{cm}) = -\alpha_{bs}\left(\frac{0.1 \cdot f_{cm}}{6 + 0.1 \cdot f_{cm}}\right)^{2.5} \cdot 10^{-6}$$

$$\beta_{bs}(t) = 1 - \exp\left(-0{,}2 \cdot \sqrt{t}\right)$$

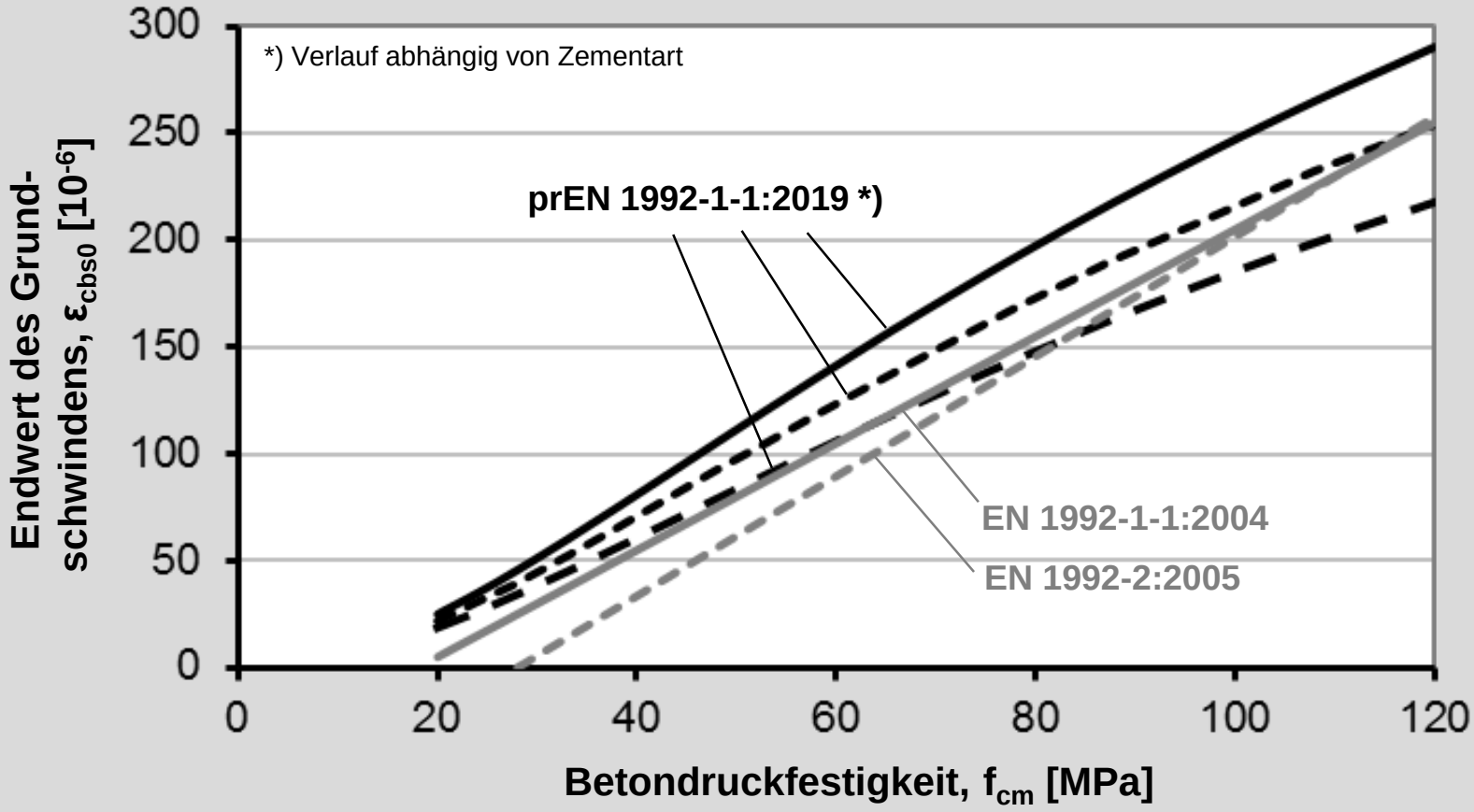
α_{bs} nach:

Zementart	α_{bs}
32.5 N	800
32.5 R, 42.5 N	700
42.5 R, 52.5 N, 52.5 R	600

Bem.: Bereits in der DIN 1045-1:2001 wurde der Begriff Grundschwinden (basic shrinkage) eingeführt; er ersetzt den früheren Begriff autogenes Schwinden (“autogeneous shrinkage”)

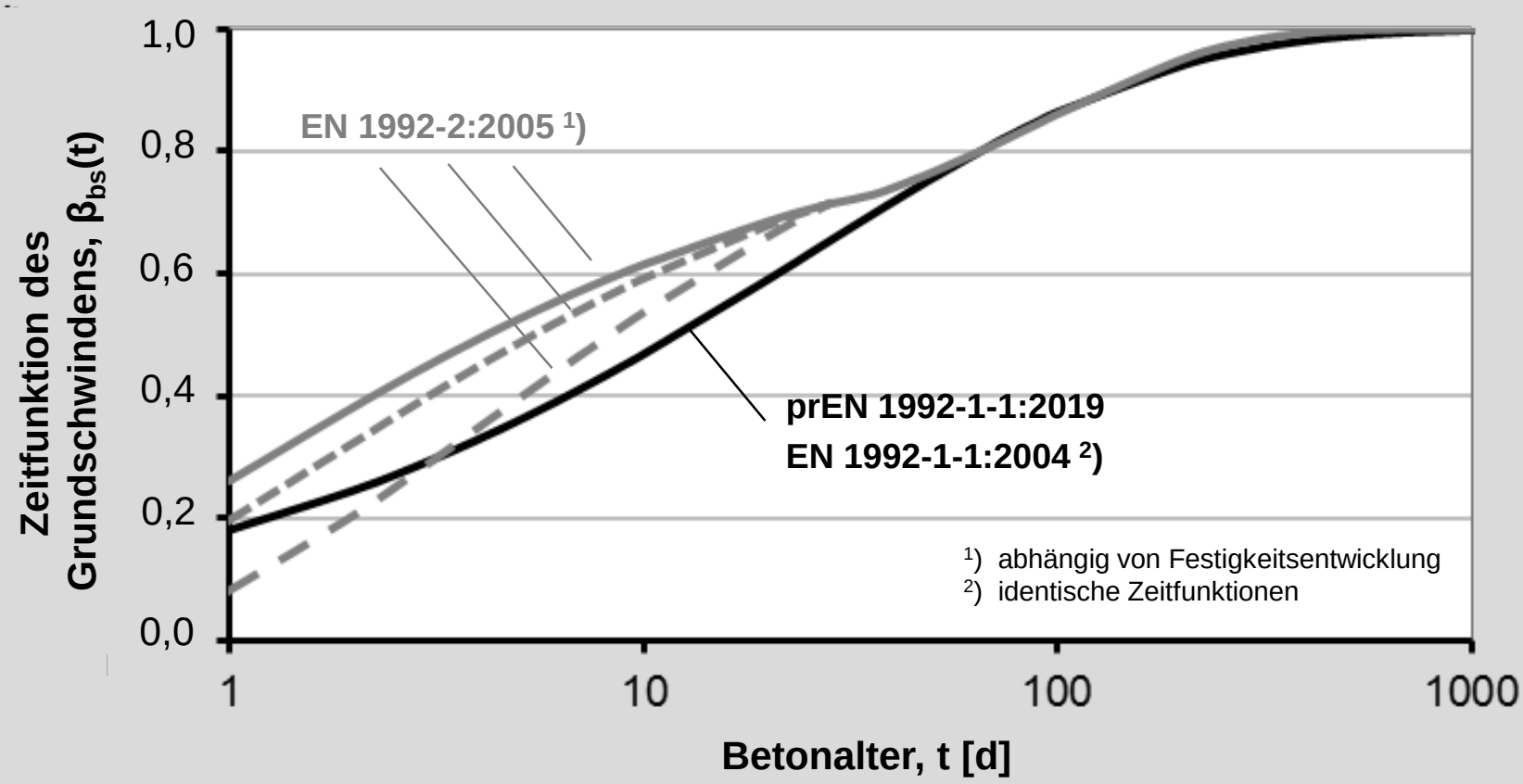
Vergleich der Endwerte des Grundschwindens

Einfluss der Betonfestigkeit f_{cm}



Zeitliche Entwicklung des Grundschwindens

Einfluss des Betonalters



Vergleich der Ansätze zum Trockungsschwinden

prEN 1992-1-1:2019 *)

$$\varepsilon_{cds}(t,t_s) = \varepsilon_{cds0}(f_{cm}) \cdot \beta_{RH}(RH) \cdot \beta_{ds}(t - t_s)$$

$$\varepsilon_{cds0}(f_{cm}) = \left[(220 + 110 \cdot \alpha_{ds1}) \cdot \exp(-\alpha_{ds2} \cdot f_{cm})\right] \cdot 10^{-6}$$

$$\beta_{RH} = \begin{cases} -1.55 \cdot \left[1 - \left(\frac{RH}{100}\right)^3\right] & for\ 40 \le RH < 99\% \cdot \beta_{s1} \\ 0.25 & for\ RH \ge 99\% \cdot \beta_{s1} \end{cases}$$

$$\beta_{s1} = \left(\frac{35}{f_{cm}}\right)^{0,1} \le 1,0$$

$$\beta_{ds}(t - t_s) = \left(\frac{(t - t_s)}{0.035 \cdot h^2 + (t - t_s)}\right)^{0.5}$$

Zeitfunktion identisch mit MC 1990; entspricht Lsg. der DGL für Diffusion

Zementart	α_{ds1}	α_{ds2}
32.5 N	3	0.013
32.5 R, 42.5 N	4	0.012
42.5 R, 52.5 N, 52.5 R	6	0.012

*) entspricht MC 2010 (= MC 1990-99 = prENV 1992-1-1:2001)

EN 1992-1-1:2004

$$\varepsilon_{cd}(t) = \varepsilon_{cd,0} \cdot k_h \cdot \beta_{ds}(t, t_s)$$

$$\varepsilon_{cd,0} = 0,85 \cdot \left[(220 + 110 \cdot \alpha_{ds1}) \cdot \exp\left(-\alpha_{ds2} \cdot \frac{f_{cm}}{f_{cm0}}\right)\right] \cdot 10^{-6} \cdot \beta_{RH}$$

$$\beta_{RH} = 1,55\left[1 - \left(\frac{RH}{RH_0}\right)^3\right]$$

$$\beta_{ds}(t, t_s) = \frac{(t - t_s)}{(t - t_s) + 0,04\sqrt{h_o^3}}$$

h_0	k_h
100	1,0
200	0,85
300	0,75
≥ 500	0,70

EN 1992-2:2005

$$\varepsilon_{cd}(t) = \frac{K(f_{ck}) \cdot \left[72 \cdot \exp(-0,046 \cdot f_{ck}) + 75 - RH\right] \cdot (t - t_s) \cdot 10^{-6}}{(t - t_s) + \beta_{cd} \cdot h_0^2}$$

$K(f_{ck}) = 18$ if $f_{ck} \le 55\,MPa$

$K(f_{ck}) = 30 - 0,21 \cdot f_{ck}$ if $f_{ck} > 55\,MPa$

$$\beta_{cd} = \begin{cases} 0,007 & \text{for silica – fume concrete} \\ 0,021 & \text{for non silica – fume concrete} \end{cases}$$

Vergleich der Ansätze zum Trockungsschwinden

prEN 1992-1-1:2019 *)

$$\varepsilon_{cds}(t,t_s) = \varepsilon_{cds0}(f_{cm}) \cdot \beta_{RH}(RH) \cdot \beta_{ds}(t - t_s)$$

$$\varepsilon_{cds0}(f_{cm}) = \left[(220 + 110 \cdot \alpha_{ds1}) \cdot \exp(-\alpha_{ds2} \cdot f_{cm})\right] \cdot 10^{-6}$$

$$\beta_{RH} = \begin{cases} -1.55 \cdot \left[1 - \left(\frac{RH}{100}\right)^3\right] & for\ 40 \le RH < 99\% \cdot \beta_{s1} \\ 0.25 & for\ RH \ge 99\% \cdot \beta_{s1} \end{cases}$$

$$\beta_{s1} = \left(\frac{35}{f_{cm}}\right)^{0,1} \le 1,0$$

$$\beta_{ds}(t - t_s) = \left(\frac{(t - t_s)}{0.035 \cdot h^2 + (t - t_s)}\right)^{0.5}$$

Zeitfunktion identisch mit MC 1990; entspricht Lsg. der DGL für Diffusion

Zementart	α_{ds1}	α_{ds2}
32.5 N	3	0.013
32.5 R, 42.5 N	4	0.012
42.5 R, 52.5 N, 52.5 R	6	0.012

*) entspricht MC 2010 (= MC 1990-99 = prENV 1992-1-1:2001)

EN 1992-1-1:2004

$$\varepsilon_{cd}(t) = \varepsilon_{cd,0} \cdot k_h \cdot \beta_{ds}(t,t_s)$$

$$\varepsilon_{cd,0} = 0,85 \cdot \left[(220 + 110 \cdot \alpha_{ds1}) \cdot \exp\left(-\alpha_{ds2} \cdot \frac{f_{cm}}{f_{cm0}}\right)\right] \cdot 10^{-6} \cdot \beta_{RH}$$

$$\beta_{RH} = 1,55\left[1 - \left(\frac{RH}{RH_0}\right)^3\right]$$

$$\beta_{ds}(t,t_s) = \frac{(t - t_s)}{(t - t_s) + 0,04\sqrt{h_o^3}}$$

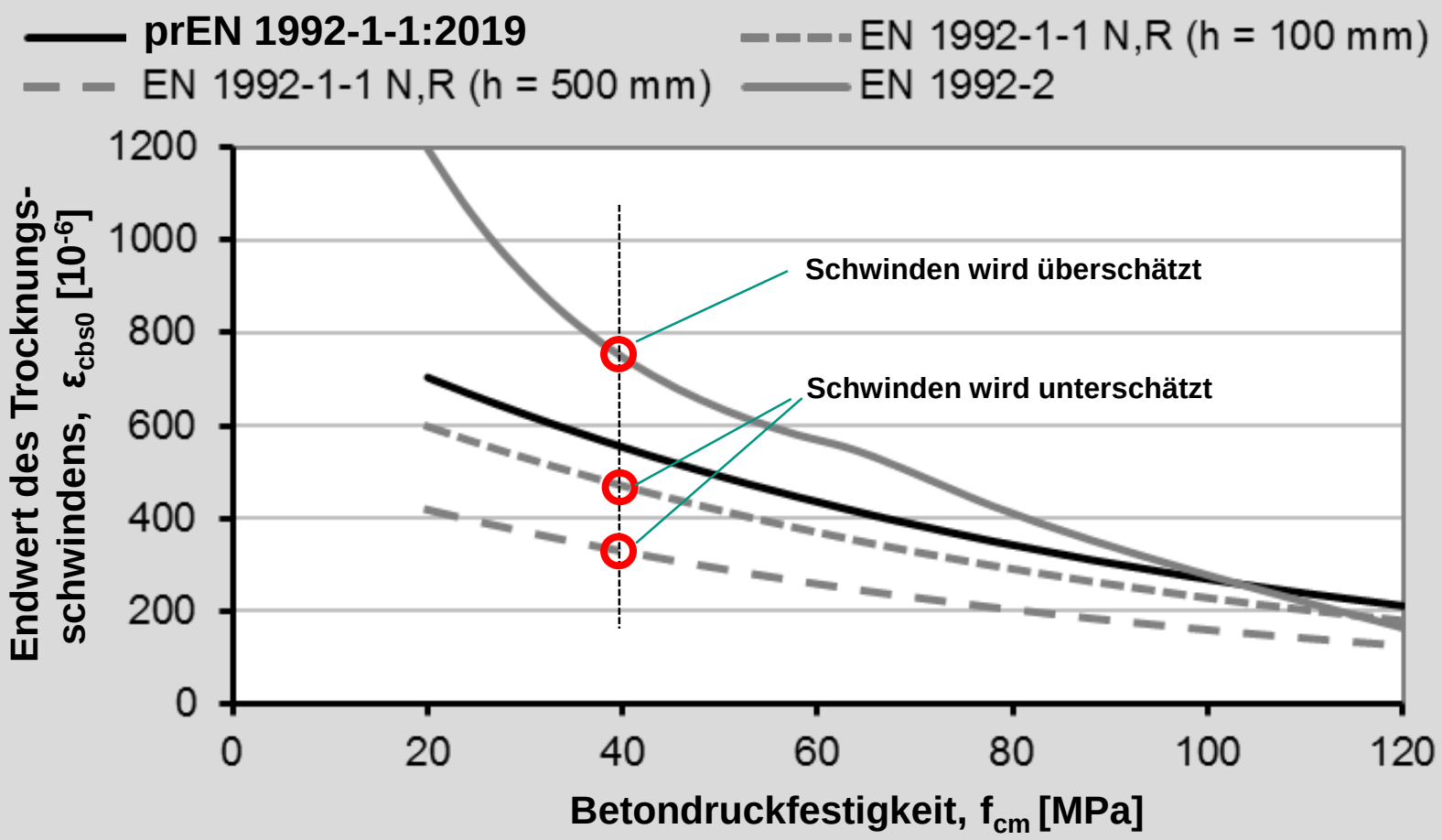
h_0	k_h
100	1,0
200	0,85
300	0,75
≥ 500	0,70

Warum Abweichung vom MC 1990-99?

- Die Schwindwerte des MC 1990-99 wurden als zu hoch „empfunden“, insb. im Vergleich mit früheren Modellen, z. B. CEB 70 und CEB 78.
- Der bekannte Einfluss der Bauteildicke ist im Ansatz des MC 1990-99 nicht enthalten.

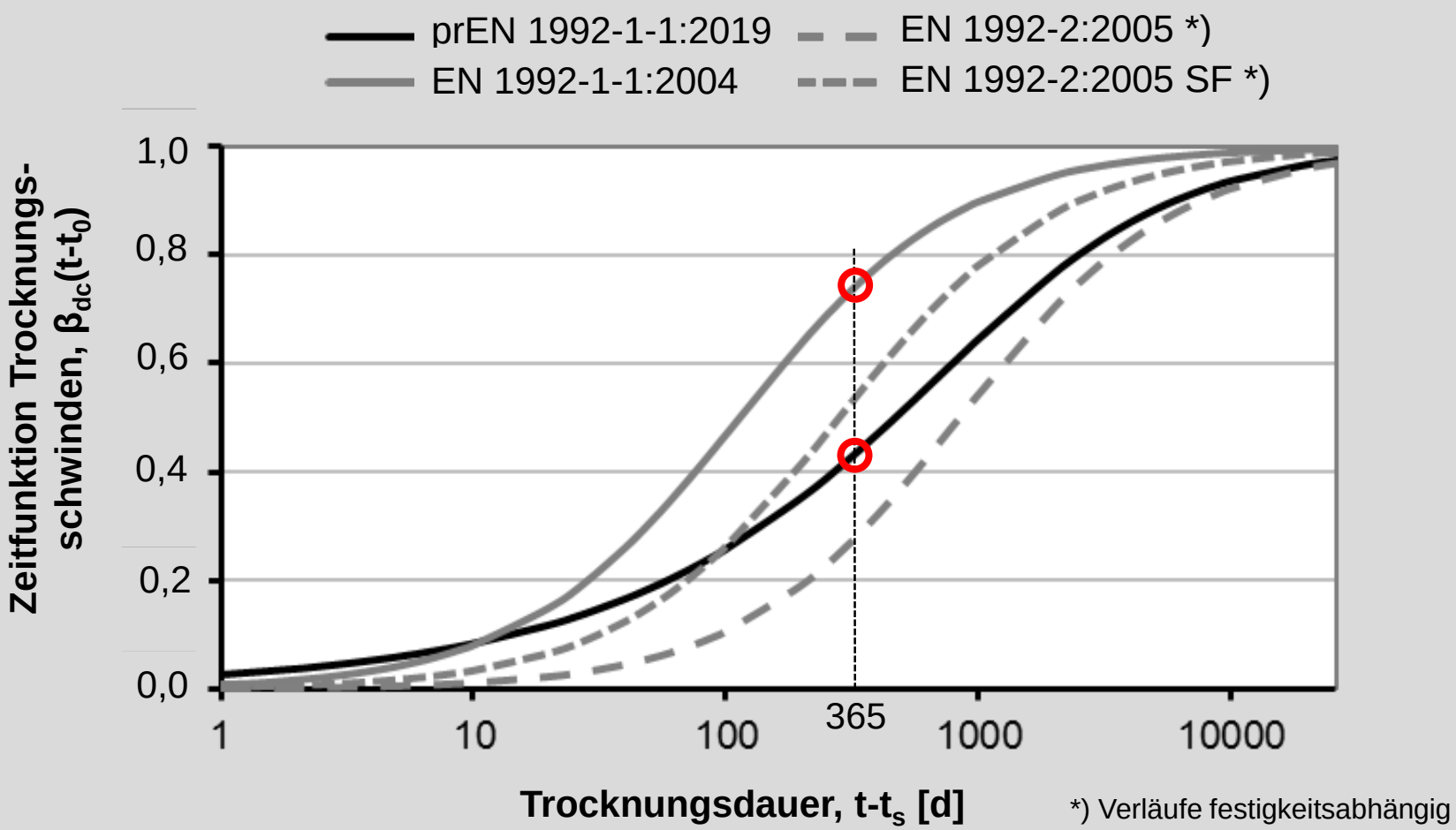
Vergleich der Endwerte des Trocknungsschwindens

Einfluss der Betonfestigkeit f_{cm} für RH = 50 %



Zeitliche Entwicklung des Trocknungsschwindens

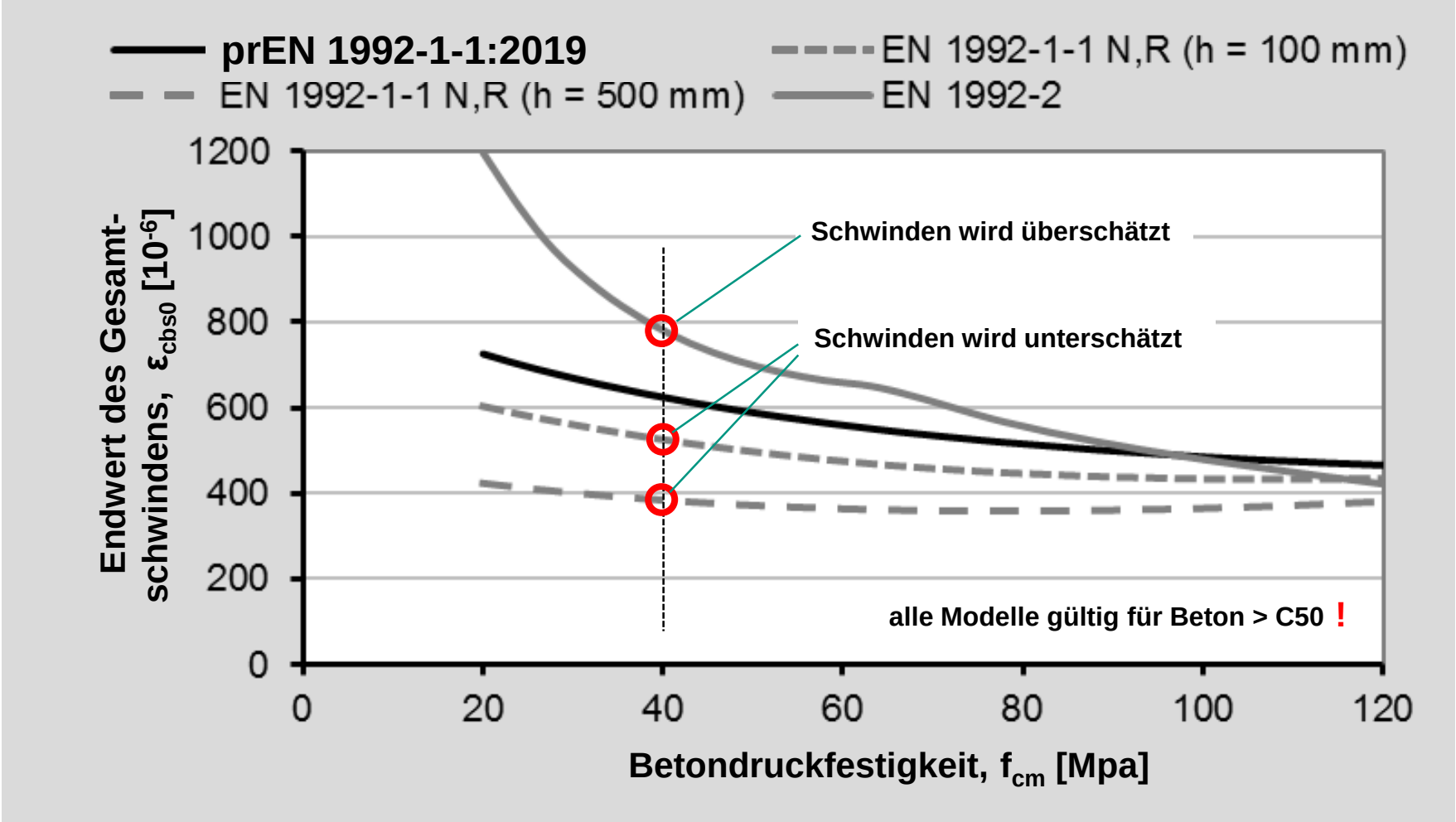
Vergleich für RH = 50 % und h_0 = 200 mm



*) Verläufe festigkeitsabhängig

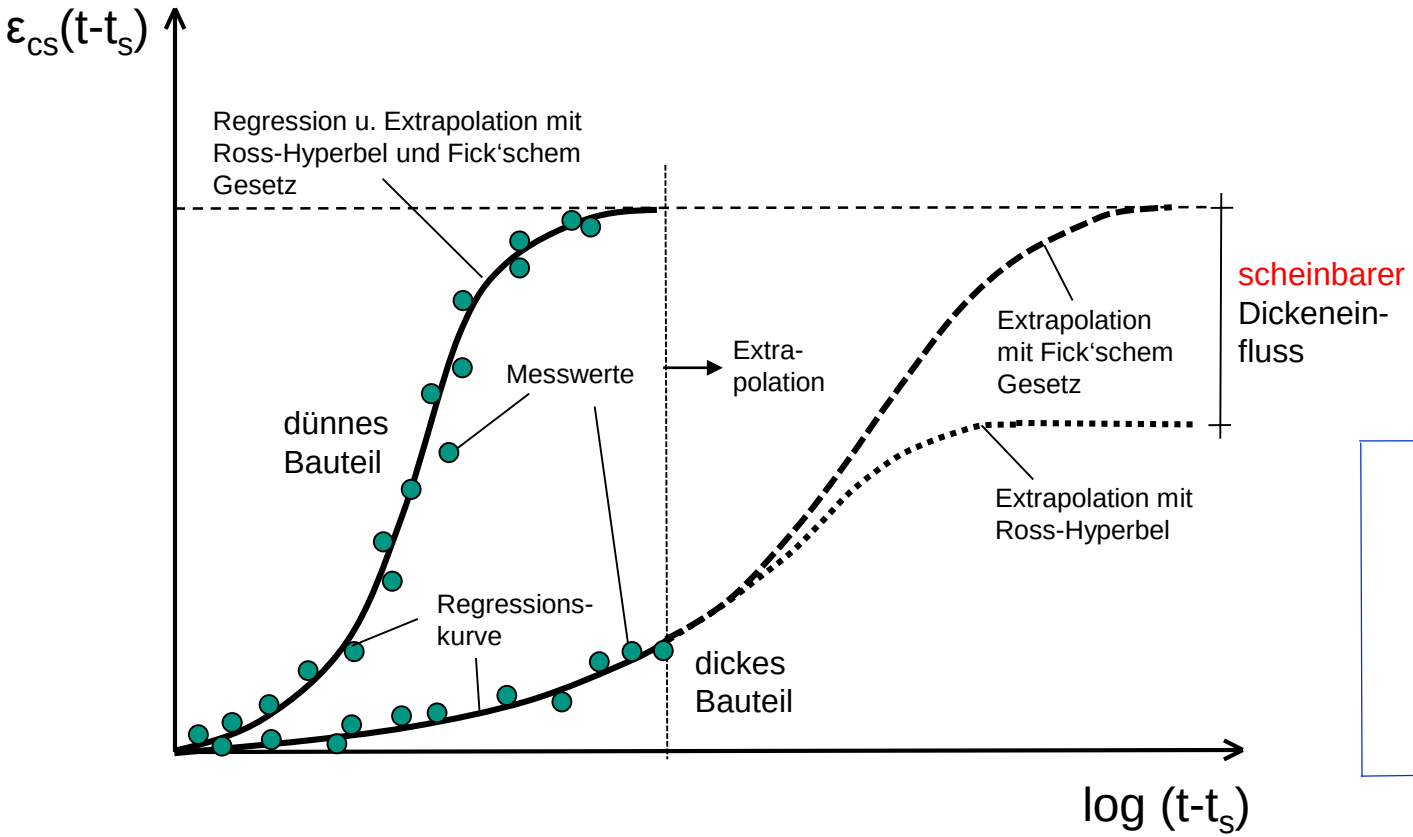
Vergleich der Endwerte des Gesamtschwindens

Einfluss der Betonfestigkeit f_{cm} für RH = 50 %



Schwindmessungen früher und heute

Auswertung von Schwindmessungen



Wagner, 1958
→ CEB 1970

h_0 [mm]	k_h
50	1,20
100	1,00
200	0,85
300	0,75
≥ 500	0,70

Die Bauteildicke beeinflusst nur den Verlauf, nicht den Endwert des Schwindens (Fick'sches Gesetz; MC 1990)

Dickeneinfluss wieder eingeführt in EN 1992-1-1:2004, um Werte abzusenken

Schwindwerte für Betone vor 1970:

(1) Scheinbar geringer wegen der Anwendung der Ross-Hyperbel
(2) Tatsächlich geringer, insb. wegen der Verwendung gröberer Zemente

Aktueller Vorschlag: Dickeneinfluss für prEN 1992-1-1:2019 beibehalten, „um Bauteilkosten zu sparen"

Einfluss von Umgebungs- und innerer Feuchte auf das Trockungsschwinden – Koeffizient β_{RH}

MC 2010:

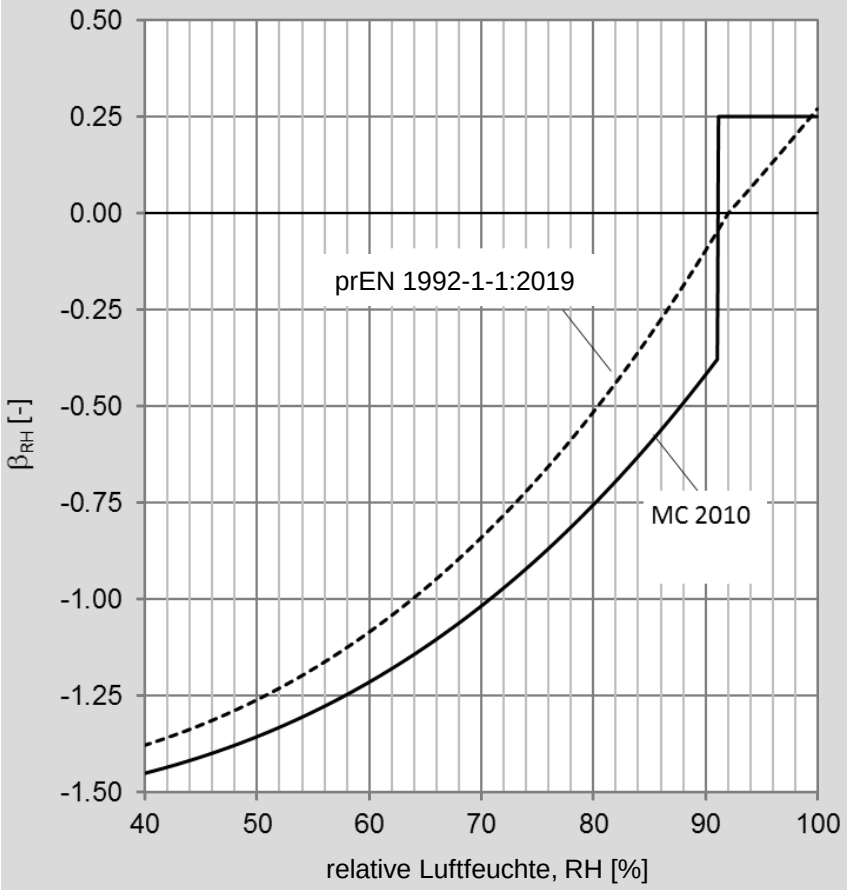
$$\beta_{RH} = \begin{cases} -1{,}55\left[1-\left(\frac{RH}{100}\right)^3\right] & \text{für } 40 \le RH < 99\ \% \cdot \beta_{s1} \\ 0{,}25 & \text{für } RH \ge 99\ \% \cdot \beta_{s1} \end{cases}$$

$$\beta_{s1} = \left(\frac{35}{f_{cm}}\right)^{0{,}1} \le 1.0$$

Verbesserung für prEN 1992-1-1:2019

$$\beta_{RH} = \begin{cases} -a\left[1-\left(\frac{RH}{RH_{eq}}\right)^3\right] & \text{für } 40 \le RH < RH_{eq} \\ -a\left[1-\left(\frac{RH}{RH_{eq}}\right)^b\right] & \text{für } RH \ge RH_{eq} \end{cases}$$

$RH_{eq} = 72 \bullet \exp[-c \cdot f_{ck}] + 75$



Verbesserung der Schwindvorhersage durch Kurzzeitversuche nach prEN 1992-1-1:2019

Gesamtschwinden

$$\varepsilon_{cs}(t,t_s) = \xi_{cbs1} \cdot \varepsilon_{cbs}(t) + \xi_{cds1} \cdot \varepsilon_{cds}(t,t_s)$$

Regressions-parameter

Zeitliche Entwicklung

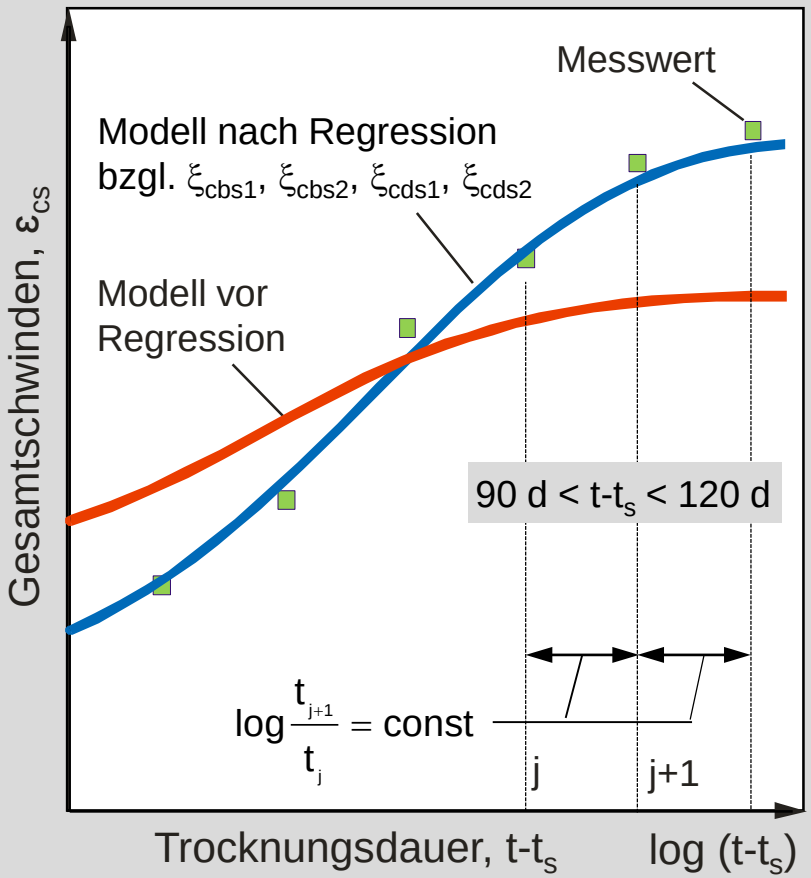
Grundschwinden:

$$\beta_{bs}(t) = 1 - \exp\left(-0{,}2 \cdot \xi_{cbs2} \cdot \sqrt{t}\right)$$

Trocknungsschwinden:

$$\beta_{ds}(t,t_s) = \left(\frac{(t-t_s)}{0{,}035 \cdot \xi_{cds2} \cdot h^2 + (t-t_s)}\right)^{0,5}$$

Regressions-parameter



Genauigkeitsgewinn durch Versuche: Variationskoeff. sinkt von ca. 30 % auf ca. 10 %

Schlussfolgerungen

- Der Normentwurf prEN 1992-1-1:2019 stellt eine grundlegende Revision der EN 1992-1-1:2004 dar.
- Die neuen Betonmodelle genügen dem Format einer Norm für die Praxis.
- Trotz der Einfachheit der phänomen-basierten Modelle werden physikalische Prozesse korrekt wiedergegeben.
- Die konstitutiven Ansätze sind im Anwendungsbereich thermodynamisch widerspruchsfrei.
- Die Genauigkeit der Modelle stellt ein Optimum in Bezug auf die gewählten Ansätze dar.
- Die angegebenen Ansätze sind performance-orientiert, so dass mittels geeigneter Versuche die Genauigkeit der Modelle erheblich verbessert werden kann.
- Wenn Deutschland die EN 1992-2 beibehalten will, sollten zumindest die darin enthaltenen Betonmodelle kritisch geprüft bzw. verworfen werden.

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!

Kontakt:

Harald S. Müller
h.mueller@smp-ing.de

Büro: 0721 91319-40
Mobil: 0172 7643443

SMP Ingenieure
im Bauwesen GmbH

Stephanienstr. 102
76133 Karlsruhe
www.smp-ing.de