

Diploma Thesis

Analysis of the rheological effects of large concrete specimens affected by changing environment conditions

Submitted in satisfaction of the requirements for the degree of
Diplom-Ingenieur
of the TU Wien, Faculty of Civil Engineering

DIPLOMARBEIT

Untersuchung von rheologischen Effekten an großformatigen Betonkörpern unter veränderlichen Umgebungsbedingungen

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines
Diplom-Ingenieurs
eingereicht an der Technischen Universität Wien, Fakultät für Bauingenieurwesen

von

Márk Máté

Matr.Nr.: 01607464

unter der Anleitung von

O. Univ. Prof.- Ing, Dr. techn. **Johann Kollegger**
Projektass. **Dominik Suza**, Ph. D.

E 212 Institut für Tragkonstruktionen
Forschungsbereich Stahlbeton- und Massivbau
Technische Universität Wien,
Karlsplatz 13, A-1040 Wien

Wien, im Februar 2019

Danksagung

Ich möchte mich bei **Herrn O. Univ. Prof.- Ing, Dr. techn. Johann Kollegger** bedanken, dass er ermöglichte, diese Arbeit an dem Institut für Tragkonstruktionen, Forschungsbereich für Stahlbeton- und Massivbau verfassen zu können.

Ich bin sehr dankbar für **Projektass. Dominik Suza, Ph. D** für seine Betreuung und für seine Geduld und Toleranz.

Ich möchte mich bei *Dipl. Ing. Andreas Müller* für die grammatische Überwachung und Korrektur der Diplomarbeit bedanken.

Ich möchte mich bei

- Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft mbH (FFG);
- Autobahnen- und Schnellstraßen- Finanzierung- Aktiengesellschaft GmbH (ASFINAG);
- ÖBB Infrastruktur AG;
- Rohrdorfer Baustoffe Austria GmbH;
- ARGE Beton Innsbruck;
- Swietelsky Baugesellschaft m.b.H.;
- Strabag AG;
- Porr Bau GmbH;
- HABAU Hoch- und Tiefbaugesellschaft m.b.H.;
- Vereinigung der Österreichischen Zementindustrie (VÖZ);
- Güterverband Transportbeton (GVTB)

für die finanzielle Unterstützung des Experimentes bedanken.

Ich möchte mich bei

- Firma Franz Oberndorfer GmbH &Co KG;
- Swietelsky Baugesellschaft m.B.H.;
- Ing. Hans Lang GmbH;
- RED Bernard GmbH

für die gute Kooperation während des Baus der Betonkörper bedanken.

Ich danke auch *meiner Familie*, dass sie mich während meiner Diplomarbeit unterstützt hat.

Zusätzlich möchte ich mich bei *Bodnár Miskolczi Péter* für die Überwachung der Teile: Kurzfassung; Einleitung und Zusammenfassung der Diplomarbeit bedanken.

Kurzfassung

Die Planung von dauerhaften und wirtschaftlichen Bauerwerken aus Stahlbeton und Spannbeton erfordert die Bereitstellung von wirklichkeitsnahen und praxistauglichen Modellen zur Beschreibung des Materialverhaltens von Beton für Kriechen und Schwinden. Die Phänomene Kriechen und Schwinden des Betons sind unter veränderlichen Umgebungsbedingungen aber noch nicht völlig bekannt.

Es wurde ein Experiment mit großformatigen Betonkörpern unter veränderlichen Umgebungsbedingungen in dieser Diplomarbeit ausgewertet. Bei dem betrachteten Experiment waren die Betonkörper viel größer als die in Laborexperimenten verwendeten Körpern, und sie wurden draußen gelagert, so dass die relative Luftfeuchtigkeit und die Temperatur sich über die Messperiode änderten.

Die bisherigen Betonmodelle wurden nach Laborexperimenten kalibriert, die annäherungsweise einer konstanten Temperatur und relativen Luftfeuchtigkeit ausgesetzt sind. Die in dieser Diplomarbeit betrachteten Versuche sind deshalb wichtig, um das Verhalten des Kriechens und Schwindens bei sich verändernder Temperatur und Luftfeuchte noch besser verstehen und beschreiben zu können.

In einer Diplomarbeit ist es schwierig, sogar eher unmöglich neue Theorien und Modelle auszuarbeiten, deswegen konzentrierte sich diese Arbeit nur auf den Vergleich der Ergebnisse des Experiments mit drei vorhandenen Modellen.

Die Ergebnisse des Experiments wurden mit Eurocode 2: EN 1992-1-1; mit dem fib Model Code für Betonkonstruktionen 2010, und mit RILEM Modell B4 verglichen.

Abstract

The planning of durable and economical reinforced concrete and prestressed concrete structures requires the provision of concrete models for describing the material behaviour of concrete for creep and shrinkage. However, the phenomena of creep and shrinkage of the concrete are not fully known under changing environmental conditions.

An experiment of large-sized concrete bodies under varying environmental conditions was analysed in this diploma thesis. In the experiment under consideration, the concrete bodies were much larger than the bodies used in the laboratory experiments, and they were stored outside so that the relative humidity and temperature changed over the measurement period.

The previous concrete models were calibrated after laboratory experiments that are exposed to approximately constant temperature and relative humidity. The experiment considered in this diploma thesis is therefore important to understand and describe better the behaviour of creep and shrinkage of concrete with changing temperature and humidity.

In a thesis it is difficult, or even impossible, to work out new theories and models, so this work focused only on comparing the results of the experiment with three existing ones.

The results of the experiment were then compared to Eurocode 2: EN 1992-1-1; with fib Model Code for Concrete Structures 2010, and with RILEM Model B4.

Inhaltverzeichnis

1. Einleitung	7
2. Theorie- Zeitabhängige Verformungen des Betons	8
2.1. Lastunabhängige Verformungen	9
2.1.1. Temperaturdehnung	9
2.1.2. Quellen	10
2.1.3. Schwinden	10
2.2. Lastabhängige Verformungen	12
2.2.1. Kriechen	12
3. Experiment	16
3.1. Beschreibung des betrachteten Experiments für Kriechen und Schwinden	16
3.2. Beton Eigenschaften	24
3.2.1. Beton Eigenschaften nach Laborergebnissen	24
3.2.2. Eigenschaften des geplanten Betons	24
3.2.3. Werte des Elastizitätsmoduls	25
3.2.3.1. <i>Elastizitätsmodul des Betons nach den Laborergebnissen</i>	25
3.2.3.2. <i>Ausgewerteter Elastizitätsmodul des Betons nach den Messwerten des Experiments (In-situ-Messungen)</i>	25
3.3. Ergebnis des betrachteten Experiments	26
3.3.1. Umgebungsbedingungen	27
3.3.1.1. Berücksichtigung der Umgebungsbedingungen bei dem Experiment	27
3.3.2. Temperatur innerhalb der Betonkörper	28
3.3.2.1. Berücksichtigung der Temperatur innerhalb der Betonkörper	28
3.3.3. Spannkraftverluste	30
3.3.3.1. Sofortige Spannkraftverluste	30
3.3.3.1.1. <i>Verluste infolge Keilschlupf</i>	30
3.3.3.1.2. <i>Spannkraftverluste aus elastischer Verformung des Betons</i>	31
3.3.3.2. Zeitabhängige Spannkraftverluste	31
3.3.3.3. Kompensierung der Spannkraftverluste	31
3.3.3.4. Messwerte der Spannkraftverluste	32
3.3.3.5. Berücksichtigung der Spannkraftverluste bei dem Experiment	34
3.3.4. Schwinden nach den gemessenen Stauchungen	35
3.3.5. Kriechen nach den gemessenen Stauchungen	36
4. Theoretische Modelle des Kriechens und Schwindens des Betons	40
4.1. Einleitung	40
4.1.1. Eurocode	40

4.1.2.	fib Model Code für Betonkonstruktionen 2010	41
4.1.3.	RILEM Modell B4	41
4.2.	Eurocode 2: Teil 1-1 (EN 1992-1-1)	42
4.2.1.	Schwinden nach EN 1992-1-1	42
4.2.2.	Kriechen nach EN 1992-1-1	46
4.2.3.	Temperatureffekte nach EN 1992-1-1	52
4.2.3.1.	Die Auswirkung von Zementart und Hydratationswärme	52
4.2.3.2.	Temperatureffekt auf die Reife des Betons:	53
<i>4.2.3.2.1.</i>	<i>Anmerkung zu der Gleichung (4.2.26)</i>	54
4.2.4.	Elastizitätsmodul nach EN 1992-1-1	55
4.2.5.	Vergleich der Ergebnisse des Experiments mit EN 1992-1-1	58
4.2.5.1.	Schwinden	58
4.2.5.2.	Kriechen	60
4.3.	fib Model Code für Betonkonstruktionen 2010	66
4.3.1.	Anwendungsbereich – MC 2010-	66
4.3.2.	Schwinden nach MC 2010	67
4.3.3.	Kriechen nach MC 2010	70
4.3.4.	Elastizitätsmodul nach MC 2010	75
4.3.5.	Temperatureffekte nach MC 2010	78
4.3.5.1.	Die Auswirkung von Zementart und Hydratationswärme	78
4.3.5.2.	Temperatureffekt auf die Reife des Betons	78
4.3.5.3.	Temperatureffekt auf das Schwinden des Betons	78
4.3.5.4.	Temperatureffekt auf das Kriechen des Betons	81
4.3.6.	Vergleich der Ergebnisse des Experiments mit Model Code 2010	83
4.3.6.1.	Schwinden	83
4.3.6.2.	Kriechen	86
4.4.	RILEM Modell B4	91
4.4.1.	Anwendungsbereich- Modell B4	91
4.4.2.	Schwinden nach Modell B4	92
4.4.3.	Kriechen nach Modell B4	100
4.4.4.	Elastizitätsmodul nach Modell B4	109
4.4.5.	Temperatureffekte nach Modell B4	110
4.4.6.	Vergleich der Ergebnisse des Experiments mit dem Modell B4	115
4.4.6.1.	Schwinden	115
4.4.6.2.	Kriechen	118

5. Vergleich der Modelle nach EN 1992-1-1, MC 2010 und RILEM Modell B4 miteinander und mit den Ergebnissen des Experiments	125
6. Zusammenfassung und Ausblick	130
7. Literaturverzeichnis	132
8. Anhang	134
8.1. Anhang A: Aufbau des Experiments	134
8.2. Anhang B: Messergebnisse	137
8.3. Anhang C: Ergebnisse nach EN 1992-1-1 (Eurocode 2)	154
8.4. Anhang D: Ergebnisse nach Model Code 2010.....	158
8.5. Anhang E: Ergebnisse nach RILEM Modell B4.....	162

1. Einleitung

Die üblichen Kriech- und Schwindversuche von Beton werden gewöhnlich in einem Labor an Zylinderproben mit einem Durchmesser von 150 [mm] und einer Höhe von 300 [mm] durchgeführt. Bei diesen Experimenten herrschen Laborbedingungen, die annäherungsweise konstante Temperatur und Feuchtigkeit bedeuten.

Die andere verbreitete Methode für die Betrachtung des Kriechens und Schwindens des Betons ist die Überwachung realer Brücken. Bei dieser Analyse ist die Auswertung und Interpretation der Messwerte sehr schwierig und kompliziert, weil es sehr viele Parameter gibt, die die Messergebnisse beeinflussen.

Der Gedanke für das Experiment, das in dieser Diplomarbeit betrachtet wurde -für die Beobachtung des Kriechens und Schwindens des Betons- war ein solches Experiment durchzuführen, das die Vorteile der oben genannten Methoden kombiniert. Das Ziel war, ein solches Experiment zu konstruieren, wo die Abmessungen der Betonkörper viel größer als bei Laborexperimenten sind, es aber nicht so viele Einflussparameter gibt, wie bei der Überwachung der realen Brücke. Die relative Luftfeuchte und die Temperatur sollten sich auch im Laufe der Zeit verändert können.

In dieser Diplomarbeit wurde deshalb ein Kriechen und Schwinden Experiment realisiert. Der Versuch wurde von der *TU Wien* und *Karlsruhe Institut für Technologie- KIT* ausgearbeitet.

Die Ergebnisse des Experiments wurden dann mit Eurocode 2, EN 1992-1-1; mit fib Model Code für Baukonstruktionen 2010 und mit RILEM Modell B4 verglichen. Die drei Modelle wurden mit Diagrammen dargestellt, um ein besseres Bild zu bekommen, wie die Eingangsparameter die Ergebnisse beeinflussen.

2. Theorie- Zeitabhängige Verformungen des Betons

Die Verformungen von dem Beton können zeitabhängig oder zeitunabhängig sein. Zeitunabhängige Dehnungen entwickeln sich in Kürze, während die Entwicklung von den zeitabhängigen Verformungen auch mehrere Jahrzehnte dauern können. Zu den zeitabhängigen Verformungen des Betons gehört Kriechen, Relaxation, Schwinden und Quellen. Schwinden und Quellen sind lastunabhängig, während Kriechen und Relaxation lastabhängige Verformungen des Betons sind. Mathematisch können deswegen die gesamten Verformungen des Betons $\varepsilon_c(t)$ zum Zeitpunkt t mit den Gleichungen (2.1) - (2.5) beschreiben werden:

$$\varepsilon_c(t) = \varepsilon_{ce}(t_0) + \varepsilon_{ck}(t) + \varepsilon_{cs}(t) + \varepsilon_{cT}(t) \quad (2.1)$$

$$\varepsilon_c(t) = \varepsilon_{c\sigma}(t) + \varepsilon_{cn}(t) \quad (2.2)$$

$$\varepsilon_{c\sigma}(t) = \varepsilon_{ce}(t_0) + \varepsilon_{ck}(t) \quad (2.3)$$

$$\varepsilon_{cn}(t) = \varepsilon_{cs}(t) + \varepsilon_{cT}(t) \quad (2.4)$$

$$\varepsilon_{ce}(t_0) = \frac{\sigma(t_0)}{E(t_0)} \quad (2.5)$$

Dabei ist

$\varepsilon_{ce}(t_0)$	die elastische Dehnung;
$\varepsilon_{ck}(t)$	die Kriechverformung;
$\varepsilon_{cs}(t)$	die Schwind- bzw. Quellverformung;
$\varepsilon_{cT}(t)$	die Temperaturdehnung;
$\varepsilon_{c\sigma}(t)$	die gesamte lastabhängige Verformung bei einem Betonalter von t ;
$\varepsilon_{cn}(t)$	die gesamte lastunabhängige Verformung bei einem Betonalter von t ;
$\sigma(t_0)$	die Spannung zum Belastungszeitpunkt t_0 ;
$E(t_0)$	der Elastizitätsmodul des Betons zum Belastungszeitpunkt t_0 .

Einfluss der Gesteinskörnung auf den Elastizitätsmodul:

Der Elastizitätsmodul des Betons hängt von dem Elastizitätsmodul des Zementsteins und von dem Elastizitätsmodul der Gesteinskörnung ab. Das Mischungsverhältnis zwischen den beiden Komponenten beeinflusst auch den Elastizitätsmodul des Betons. Der E-Modul von dem Zementstein liegt zwischen 10 000 und 20 000 [N/mm²], während der E-Modul der Gesteinskörnung zwischen 25 000 und 100 000 [N/mm²] ist. Der Elastizitätsmodul des Betons hängt also hauptsächlich von der Art und Menge der verwendeten Gesteinskörnung ab, aber bei gleicher Festigkeitsklasse, und gleichem Wasserzementwert kann der Elastizitätsmodul von zementsteinreichem Beton zweimal so groß sein, als bei zementsteinarmen Beton.

2.1. Lastunabhängige Verformungen

Unter lastunabhängige Verformungen des Betons versteht man die Verformungen einer unbelasteten Betonprobe. Diese Verformungen passieren vorrangig wegen der Temperaturänderung, und wegen der Änderung des Wassergehalts.

2.1.1. Temperaturdehnung

Die Verformung zufolge der Temperaturänderung ist proportional mit der Temperaturdehnzahl und mit der Temperaturänderung im mittlerem Temperaturbereich, nach Gleichung (2.6).

$$\varepsilon_T = \alpha_{bT} \cdot \Delta T \quad (2.6)$$

Dabei ist

ε_T	die Temperaturdehnung;
α_{bT}	die Temperaturdehnzahl des Betons;
ΔT	die Temperaturänderung des Betons.

Nach Eurocode 2 und Model Code 2010 darf die Temperaturdehnzahl für den Beton mit $10 \times 10^{-6} [1/K]$ angesetzt werden, wenn kein genauere Wert verfügbar ist.

Die Temperaturdehnzahl des Betons kann von den Eigenschaften der Gesteinskörnung und des Zementsteins bestimmt werden, aber dazu sollte die Temperaturdehnzahl und der Volumenanteil der Gesteinskörnung und des Zementsteins bekannt sein, nach Gleichung (2.7).

$$\alpha_{bT} = \alpha_{gT} \cdot v_{gT} + \alpha_{zsT} \cdot v_{zsT} \quad (2.7)$$

Dabei ist

α_{gT}	die Temperaturdehnzahl der Gesteinskörnung;
α_{zsT}	die Temperaturdehnzahl des Zementsteins;
v_{gT}	der Volumenanteil der Gesteinskörnung;
v_{zsT}	der Volumenanteil des Zementsteins.

Die Temperaturdehnzahl des Betons hängt von dem Feuchtegehalt des Betonkörpers ab, weil die Temperaturdehnzahl des Zementsteins mit zunehmender Feuchte signifikant zunimmt.

Bei höherer Temperatur gilt die Proportionalität nach Gleichung (2.6) zwischen Temperaturdehnung und Temperaturänderung nicht mehr. Die Temperaturdehnung nimmt mit steigender Temperatur eher zu.

Infolge der Temperaturdehnung können Zwangsspannungen entstehen, wenn die Temperaturdehnung durch Festhaltung behindert wird.

2.1.2. Quellen

Die Volumenzunahme infolge Wassereinlagerung in das Zementsteingefüge wird als Quellen bezeichnet.

2.1.3. Schwinden

Schwinden ist eine lastunabhängige Verformung, die durch die Änderung des Wasserhaushaltes des Betons hervorgerufen wird. Es ist ein sehr langsamer Prozess, weil die Austrocknung des Betons auch ein sehr langsam ablaufender Diffusionsprozess ist. Nach Experimenten nähert sich die Schwinddehnung bei konstanten Umgebungsbedingungen mit zunehmender Zeit asymptotisch zu einem Endwert an.

Die Größe des Schwindens hängt von vielen Faktoren ab, wie von dem Wassergehalt, von dem Wasserzementwert, von der Art des Zements, von den Zuschlägen, von der Gesteinskörnung, von der relativen Luftfeuchte und von der Form und Größe des Betonkörpers. Je größer der Wassergehalt des Betons und die Mahlfineinheit des Zementsteins ist, desto größer ist die Schwinddehnung. Mit zunehmender Umgebungsfeuchte und Elastizitätsmodul der Gesteinskörnung wird das Schwinden kleiner sein.

Ein anderer wesentlicher Faktor für das Schwindverhalten des Betons, ist das Volumen zu Oberfläche Verhältnis des Betonkörpers. Dicke Bauteile schwinden viel langsamer.

Infolge des Schwindens können Zwangsspannungen entstehen, wenn Schwinden durch Festhaltung oder durch Bewehrung des Stahlbetonquerschnitts behindert wird. In dem Stahlbetonquerschnitt löst Schwinden in allgemeinem Zugspannungen in dem Beton, und Druckspannungen in der Bewehrung aus.

Die physikalischen Hintergründe des Schwindens können in Kategorien wie Trocknungsschwinden, chemisches Schwinden, autogenes Schwinden, Grundschrwinden, plastisches Schwinden und Karbonatisierungsschwinden eingeteilt werden.

a) Trocknungsschwinden

Trocknungsschwinden ist die Austrocknung des Bauteils, wenn Beton in trockener Umgebung Feuchtigkeit abgibt, und als Folge sein Volumen reduziert. In allgemeinem dauert es mehrere Jahrzehnte bis ein Betonkörper über seinem ganzen Querschnitt die Ausgleichsfeuchte mit der Umgebung erreicht, deswegen ist die Verteilung der Feuchtigkeit über den Querschnitt ungleich. Die Feuchtigkeit nimmt von außen nach innen zu, denn die Schwindverformungen sind über den Betonquerschnitt nicht konstant. Die Verzerrungen nehmen von außen nach innen

ab, deshalb entstehen Eigenspannungen. Es gibt Zugspannungen an der Oberfläche, und Druckspannungen in dem Kern des Querschnitts nach Bild 2.1, weil der Kern, der langsamer schwindet, die freie Schwindkürzung der Ränder behindert.

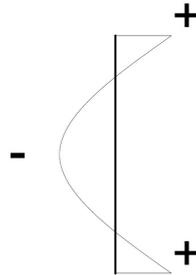


Bild 2.1: Die Verteilung der Spannungen innerhalb eines Querschnittes infolge von Trocknungsschwinden

Für normalfestem Beton ist das Trocknungsschwinden der maßgebende Anteil des Schwindens.

b) Chemisches Schwinden

Das bei der Hydratation des Zements entstehende Zementgel hat ein kleineres Volumen als die Summe des Volumens von Wasser und Zement, aus denen es entstanden ist. Dieses Phänomen ist bekannt als chemisches Schwinden oder Le Chatelier Kontraktion nach dem Namen des Wissenschaftlers, der dieses zuerst entdeckt hat.

c) Autogenes Schwinden

Bei einem Wasserzementwert niedriger als ca. 0.4, ist die Wassermenge für eine vollständige Hydratation nicht ausreichend, deswegen entsteht eine innere Austrocknung des Betons die zu einer Volumenabnahme führt. Hochfester Beton hat einen niedrigeren Wasserzementwert, deshalb ist die Verzerrung infolge von autogenem Schwinden besonders bei hochfestem Beton von Bedeutung. Bei hochfestem Beton kann die Schwindstauchung infolge von dem autogenen Schwinden größer sein, als die Stauchung infolge von dem Trocknungsschwinden.

d) Grundswinden

Grundswinden ist die Summe aus chemischem und autogenem Schwinden. Die Verteilung des Grundswindens über den Querschnitt ist gleichmäßig.

e) Plastisches Schwinden

Plastisches Schwinden heißt, dass der Beton nach der Aushärtung nicht durch ausreichende Nachbehandlung gegen Austrocknung geschützt ist, und zufolge eine Volumenminderung entsteht. Plastisches Schwinden wird mit zunehmendem Wasserzementwert und Zementgehalt größer. Die Zusammensetzung des Mehlkorns, und die Art und Menge von Betonzusatzmittel

beeinflussen die Größe des plastischen Schwindens. Mit geeigneten technologischen Maßnahmen kann plastisches Schwinden geringgehalten werden.

f) Karbonatisierungsschwinden

Karbonatisierungsschwinden ist die Volumenabnahme des Betons während der Karbonatisierung. Wichtig für die Beschreibung der Karbonatisierung des Betons, ist die Erfassung der Feuchtigkeit und CO₂-Diffusion.

Der Anteil des Karbonatisierungsschwindens ist unter normalen Umgebungsbedingungen sehr klein.

2.2. Lastabhängige Verformungen

Unter Kriechen versteht man die allmähliche Zunahme der Verzerrung unter konstanter Spannung, während Relaxation die allmähliche Abnahme der Spannung bei vorgegebener konstanter Dehnung bedeutet. Kriechen und Relaxation haben die gleiche mechanische Bedeutung, deshalb werden in der Literatur oft mit Kriechen die zeit- und lastabhängigen Verformungen des Betons bezeichnet. Relaxation wird oft als ein Sonderfall des Kriechens unter veränderlichen Spannungen genannt.

2.2.1. Kriechen

Die physikalischen Hintergründe des Kriechens sind nach der Literatur weit weniger bekannt als die physikalischen Hintergründe des Schwindens. Sicher ist, dass das Kriechen des Betons fast ausschließlich im Zementstein stattfindet. Obwohl Normalzuschläge nicht, oder unwesentlich kriechen, wirken sich ihre Eigenschaften auf das Kriechverhalten aus. Das Kriechen des Betons ist von der Betonzusammensetzung abhängig. Kriechen wird größer mit niedrigem Hydratationsgrad bei Belastungsbeginn, und mit niedrigem Wasserzementwert. Auch der Wassergehalt des Betons bei Belastungsbeginn und der mögliche Wasserverlust während der Belastung beeinflussen das Kriechverhalten des Betons. Da Kriechen von dem Feuchtezustand des Betons abhängig ist, so beeinflussen Bauteilabmessungen und die relative Luftfeuchte der Umgebung auch das Kriechverhalten. Je dünner ein Bauteil ist, desto schneller kriecht er.

Äußeren Einflussgrößen, wie die Größe der Belastung, Beginn und Dauer der Belastung, und auch die Temperatur der Umgebung beeinflussen das Kriechen. Mit größerer und längerer Belastung oder mit früherem Belastungsbeginn wird das Kriechen größer sein. Mit steigender Umgebungstemperatur wird das Kriechen auch größer sein.

a) Grundkriechen und Trocknungskriechen

Physikalisch kann das Kriechen in Grundkriechen und Trocknungskriechen aufgeteilt werden. Grundkriechen bedeutet die Verformung des Betons während der Betonquerschnitt mit der Umgebungsfeuchte im Gleichgewicht ist. Bei dem Grundkriechen gibt es keinen Feuchtaustausch zwischen der Umgebung und dem Betonquerschnitt. Das Grundkriechen nimmt mit abnehmendem Wassergehalt ab.

Unter Trocknungskriechen ist die Zunahme der Kriechverformung während der Austrocknung des Betons zu verstehen.

b) Lineares- und Nichtlineares Kriechen

Bis zur Proportionalitätsgrenze, die ca. bei 45% der Betondruckfestigkeit liegt, sind die Kriechverformungen proportional mit den aufgetragenen Spannungen. In diesem Bereich heißt das Kriechen lineares Kriechen. Wenn die Spannungen die Proportionalitätsgrenze überschreiten, steigen die Kriechdehnungen wegen der verstärkten Mikrorissbildung unter der Belastung überproportional an.

c) Reversibler und irreversibler Verformungsanteil des Kriechens

Das Kriechen des Betons setzt sich aus zwei Anteilen zusammen, aus einem reversiblen Anteil und aus einem irreversiblen Verformungsanteil. Der reversible Anteil wird oft als verzögerte elastische Elastizität und der irreversible Anteil wird oft als Fließen bezeichnet. Das Alter des Betons beeinflusst den reversiblen Anteil weniger und sein Endwert wird schon nach relativ kurzer Zeit erreicht. Der Endwert des irreversiblen Fließanteils wird dagegen nach langer Zeit erreicht und er ist stark von dem Betonalter abhängig.

d) Zeitlicher Ablauf des Kriechens

Der zeitliche Ablauf des Kriechens des Betons kann in zwei Kategorien unterteilt werden. Die erste Kategorie ist die Belastung unterhalb der Dauerstandfestigkeit und die zweite Kategorie ist die Belastung oberhalb der Dauerstandfestigkeit. Dauerstandfestigkeit bedeutet die Abnahme der Druckfestigkeit bei Dauerbelastung aufgrund von Schädigungen und Mikrorissbildungen. Die Größe der Dauerstandfestigkeit im Alter von 28 Tagen beträgt ca. 80% der einaxialen Betondruckfestigkeit.

Bei Belastungen unterhalb der Dauerstandfestigkeit steigen die Dehnungen degressiv mit der Zeit. Ob bei diesem Fall die Kriechverformungen in $t \rightarrow \infty$ gegen einen Grenzwert konvergieren, ist noch nicht vollständig geklärt [15]. Sicher ist, dass die Kriechgeschwindigkeit mit zunehmender Belastungsdauer deutlich abnimmt. Nach einer Belastungsdauer von 70 Jahren,

ist die Kriechgeschwindigkeit so klein, dass nach einer weiteren 70-jährigen Belastung, die Kriechverformung höchstens um 5% steigt. Deswegen ist es vernünftig bei Kriechmodellen von einer Endkriechzahl auszugehen.

Bei Belastungen oberhalb der Dauerstandfestigkeit kann der zeitliche Ablauf des Kriechens des Betons in drei Phasen, in Primär-, Sekundär und Tertiärkriechen, wie in Bild 2.2 dargestellt, aufgeteilt werden.

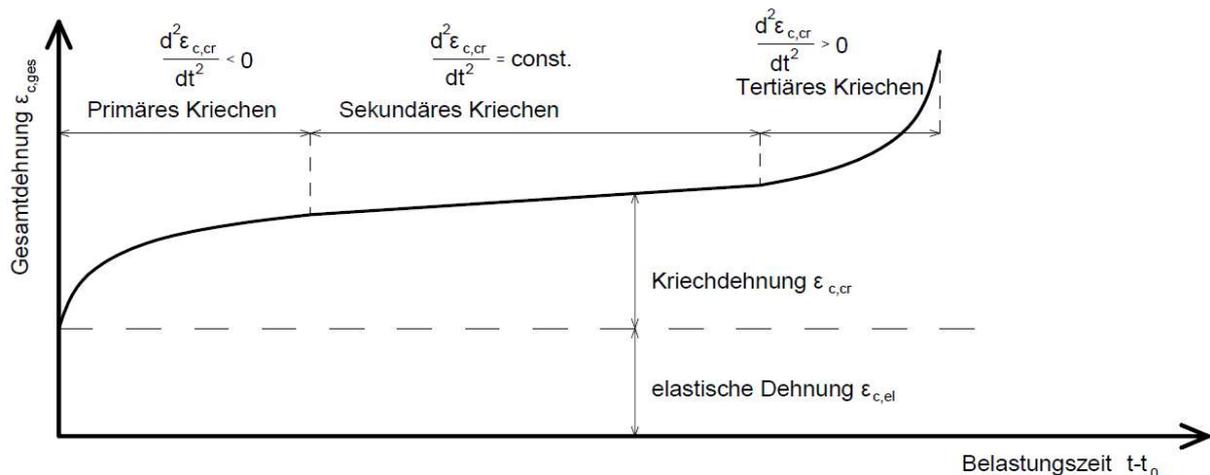


Bild 2.2: Kriechphasen des Betons bei Belastungen oberhalb der Dauerstandfestigkeit

Grund für das sekundäre Kriechen sind die entstehenden Trennrisse in der Zementmatrix. In dem sekundären Kriechen ist die Kriechrate konstant, und dieser Bereich stellt den Übergang zur Tertiärphase dar. In der Tertiärphase gibt es eine Beschleunigung der Kriechdehnungen, die zu dem Versagen des Betons führen können.

e) Temperatureffekt auf das Kriechen des Betons

Der Einfluss der Temperatur auf das Kriechen des Betons ist zweifach und wird durch zwei verschiedene Mechanismen erzeugt.

- Eine Temperaturerhöhung beschleunigt die Bindungsbrüche.
- Je höher die Temperatur, desto schneller ist der chemische Prozess der Zementhydratation und damit die Alterung des Betons.

f) Kriechmaß, Kriechzahl und Kriechfunktion

Kriechmaß, Kriechzahl und Kriechfunktion werden verwendet, um die Kriechverformungen des Betons infolge einer konstanten Spannung σ_c zu beschreiben. Bei dem Kriechmaß wird die Kriechverformung nach Gleichung (2.8) auf die kriecherzeugende Spannung bezogen während die Kriechzahl nach Gleichung (2.9) auf die elastische Dehnung des Betons im Alter von 28 Tagen bezogen wird. Mit der Kriechfunktion wird die Gesamtnachgiebigkeit des Betons mit

den Gleichungen (2.10) - (2.11) erfasst. Die Kriechfunktion kann nach Gleichung (2.12) berechnet werden.

$$\bar{\varepsilon}_{ck}(t, t_0) = \frac{\varepsilon_{ck}(t, t_0)}{\sigma(t_0)} \quad (2.8)$$

$$\varphi(t, t_0) = \frac{\varepsilon_{ck}(t, t_0)}{\varepsilon_{ci,28}} = \varepsilon_{ck}(t, t_0) \cdot \frac{E_{c,28}}{\sigma(t_0)} \quad (2.9)$$

$$\varepsilon_{c\sigma}(t, t_0) = \varepsilon_{ci,28}(t_0) + \varepsilon_{ck}(t, t_0) = \sigma_c(t_0) \cdot \left[\frac{1}{E_{c,t_0}} + \frac{\varphi_c(t, t_0)}{E_{c,28}} \right] \quad (2.10)$$

$$\varepsilon_{c\sigma}(t, t_0) = \sigma_c(t_0) \cdot J(t, t_0) \quad (2.11)$$

$$J(t, t_0) = \frac{1}{E_{c,t_0}} + \frac{\varphi_c(t, t_0)}{E_{c,28}} \quad (2.12)$$

Dabei ist

$\bar{\varepsilon}_{ck}(t, t_0)$	das Kriechmaß;
$\varepsilon_{ck}(t, t_0)$	die Kriechverformung;
$\varepsilon_{c\sigma}(t, t_0)$	die lastabhängige Verformung;
$\sigma(t_0)$	die kriecherzeugende Spannung;
$\varphi(t, t_0)$	die Kriechzahl;
$\varepsilon_{ci,28}$	die elastische Dehnung des Betons im Alter von 28 Tagen;
$E_{c,28}$	der Tangentenmodul im Alter von 28 Tagen;
E_{c,t_0}	der Tangentenmodul im Belastungsalter t_0 ;
$J(t, t_0)$	die Kriechfunktion.

3. Experiment

Wie schon in der Kurzfassung und Einleitung geschrieben wurde, wurde ein Experiment für Kriechen und Schwinden des Betons von großformatigen Betonkörpern unter veränderlichen Umgebungsbedingungen durchgeführt. Die Betonkörper waren viel größer als bei den in Laborexperimenten verwendeten Körper, und sie wurden draußen gelagert, so dass die Luftfeuchte und die Temperatur sich über die Messperiode änderten.



Bild 3.1: Ein Foto über die betrachteten Betonkörper (Versuchsserie S3 und S4)

3.1. Beschreibung des betrachteten Experiments für Kriechen und Schwinden

Während des Experiments wurden vier Serien (Serie S1; Serie S2; Serie S3; Serie S4) von Betonkörpern hergestellt, wobei die Verzerrungen und auch die eingeleiteten Kräfte gemessen wurden. Je Serie wurden sechs Betonkörper hergestellt, zweimal mit der Abmessung $1,0 \times 1,0 \times 3,0$ [m] (im Nachstehenden großer Körper genannt), zweimal mit der Abmessung $0,5 \times 0,5 \times 3,0$ [m] (im Nachstehenden mittlerer Körper genannt) und zweimal mit der Abmessung $0,25 \times 0,25 \times 2,9$ [m] (im Nachstehenden kleiner Körper genannt). Die Hälfte der Betonkörper wurde vorgespannt (siehe Bild 3.2).

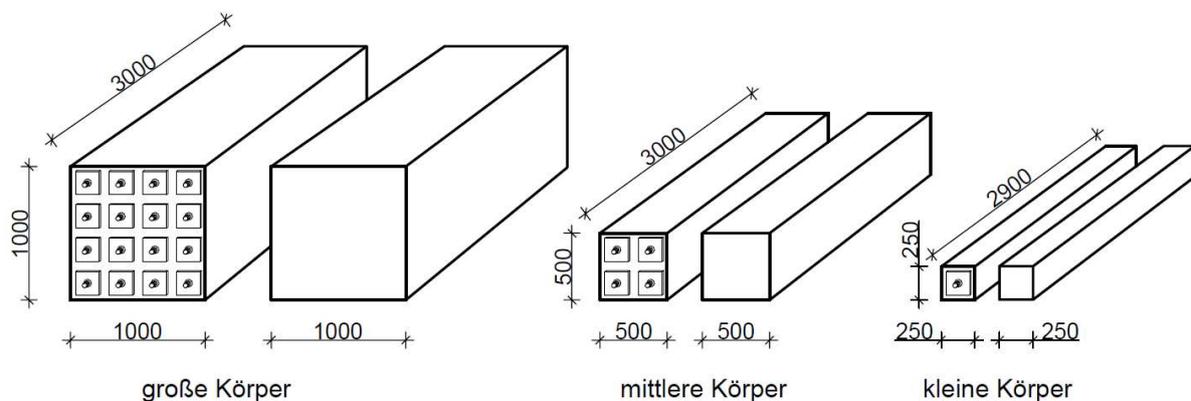


Bild 3.2: Übersichtsbild des Experiments; Abmessungen in [mm] einer Versuchsserie.
Die Hälfte der Körper ist vorgespannt.

a) **Körper ohne Vorspannung**

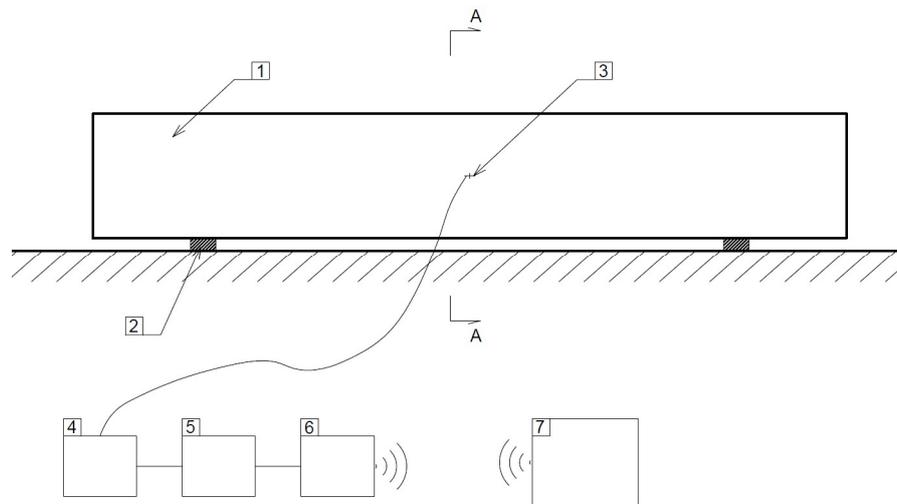


Bild 3.3: Systemskizze für den Versuch der Körper ohne Vorspannung.

In den Betonkörpern (1) wurden die Verzerrungen mit Schwingsaitensensoren (3) gemessen. Die Messwerte der Schwingsaitensensoren wurden durch den Multiplexer (4) dem Datalogger (5) aufgenommen und mit dem Modem (6) in das Internet hochgeladen. Die Daten wurden via Internet dem PC (7) zugeschickt.

Die Betonkörper wurden auf Elastomerlagern gelagert (2).

Bild 3.4 zeigt den Querschnitt A-A mit der geplanten Position der Schwingsaitensensoren.

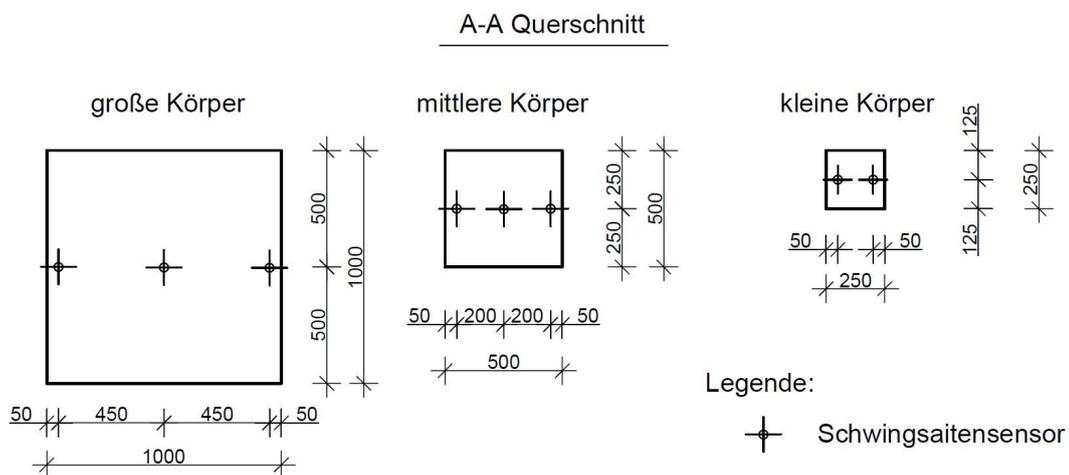


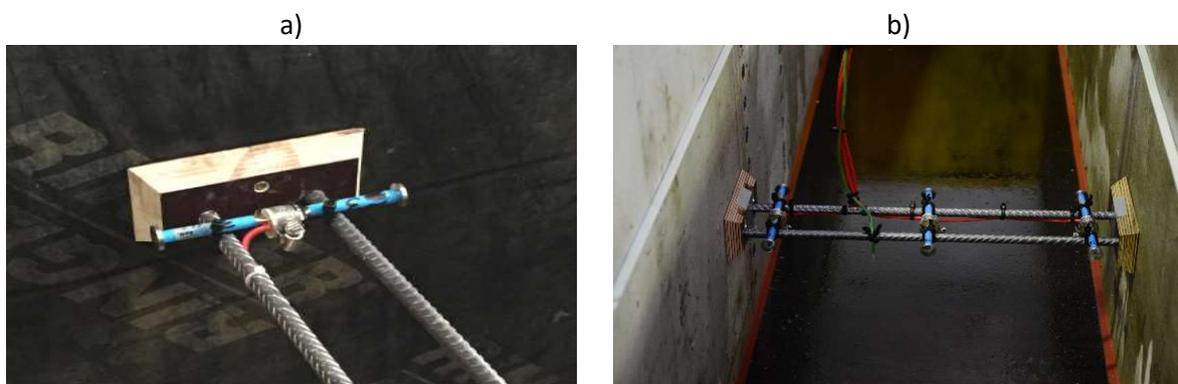
Bild 3.4: die geplante Anordnung der Schwingsaitensensoren der Versuchsserie S3 und S4; Körper ohne Vorspannung; die Einheiten sind in [mm]

Die gebaute Position der Schwingsaitensensoren wird im Anhang A gezeigt. Der Unterschied zwischen geplanten und gebauten Abmessungen war immer innerhalb von 2 [cm].

In den Betonkörpern wurden Schwingsaitensensoren einbetoniert, um alle maßgebenden Stauchungsänderungen des Betons infolge von Vorspannung, rheologischen Prozessen und Umwelteinflüssen zu bemessen. Ein wesentlicher Vorteil der Messung mit

Schwingsaitensensoren ist, dass die Entwicklung der Stauchungen ab einem Zeitpunkt Null kontinuierlich aufgezeichnet werden kann (bei dem betrachteten Experiment war Zeitpunkt der Null der Zeitpunkt der Betonierung). Schwingsaitensensoren sind temperaturkompensiert und messen auch die Temperatur im Betonkörper. Bild 3.5 zeigt vier in dem betrachteten Experiment verwendete Schwingsaitensensoren.

Bild 3.5/b und Bild 3.6 zeigen, dass die Betonkörper in Längsrichtung nicht bewehrt wurden. Die Betonkörper wurden in Längsrichtung nicht bewehrt, um die Schwindverzerrung und die Temperaturdehnung des Betons nicht zu behindern. In den nicht vorgespannten Probekörpern wurden nur zwei Bewehrungsstäbe $\phi 12$ in Querrichtung eingelegt, auf welchen die Schwingsaitensensoren befestigt wurden.



*Bild 3.5/a: ein Schwingsaitensensor mit den zwei Bewehrungsstäben in Querrichtung;
Bild 3.5/b: großer Körper (mit 1000x1000 [mm] Querschnitt) der Serie S3 vor der Betonierung*



*Bild 3.6/a: mittlerer Körper (mit 500x500 [mm] Querschnitt) der Serie S3 vor der Betonierung
Bild 3.6/b: großer Körper (mit 1000x1000 [mm] Querschnitt) der Serie S3 vor der Betonierung*



Bild 3.7/a und 3.7/b: Verbindung der Schwingsaitensensoren mit dem Multiplexer



Bild 3.8/a und 3.8/b: Die fertige Körper ohne Vorspannung der Serie S3

b) Körper mit Vorspannung:

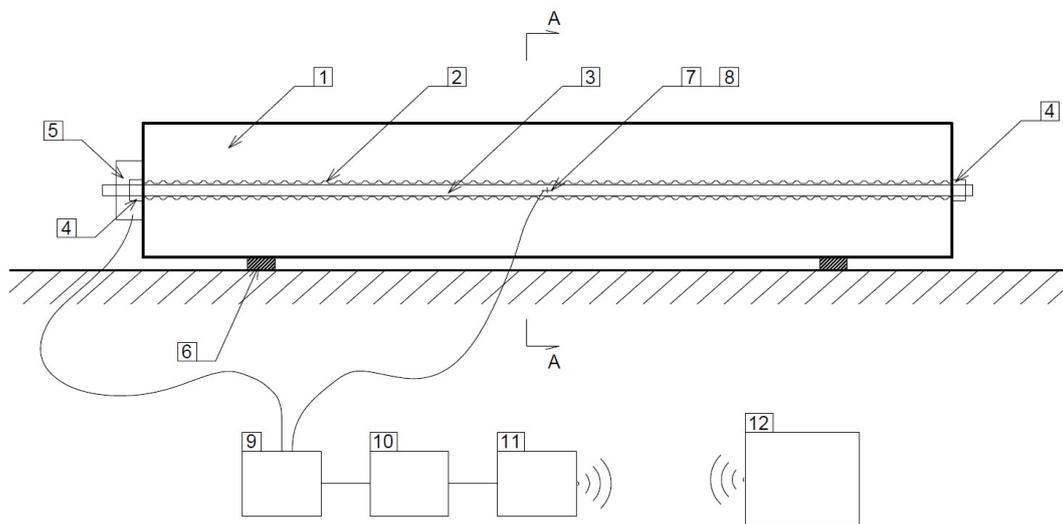


Bild 3.9: Systemskizze für den Versuch der Körper mit Vorspannung

In den Betonkörpern (1) wurden in die Hüllrohre (2) Spannstanzen (3) eingebaut. Die Vorspannung erfolgte ohne Verbund, und die Verankerung mittels aufgeschraubter Mutter mit feinem Gewinde (4). Die Spannkraften wurden mit Kraftmessdosen (5) und mit Dehnmessstreifen (7) gemessen. Die Verformungen des Betons wurden mit Schwingsaitensensoren (8) gemessen. Die Daten von den Kraftmessdosen, Dehnmessstreifen und Schwingsaitensensoren wurden durch den Multiplexer (9) dem Datalogger (10) und dann dem Modem (11) zugeschickt. Von dem Modem wurden dann die Daten via Internet dem PC (12) zugeschickt.

Die Betonkörper wurden auf Elastomerlagern gelagert (6).

Bild 3.10 zeigt den Querschnitt A-A mit der geplanten Position der Schwingsaitensensoren und auch die Anordnung der Spannstäbe. Bei den Körpern mit Vorspannung wurde die gleiche Art von Schwingsaitensensoren und Multiplexer, wie bei den Körpern ohne Vorspannung, verwendet.

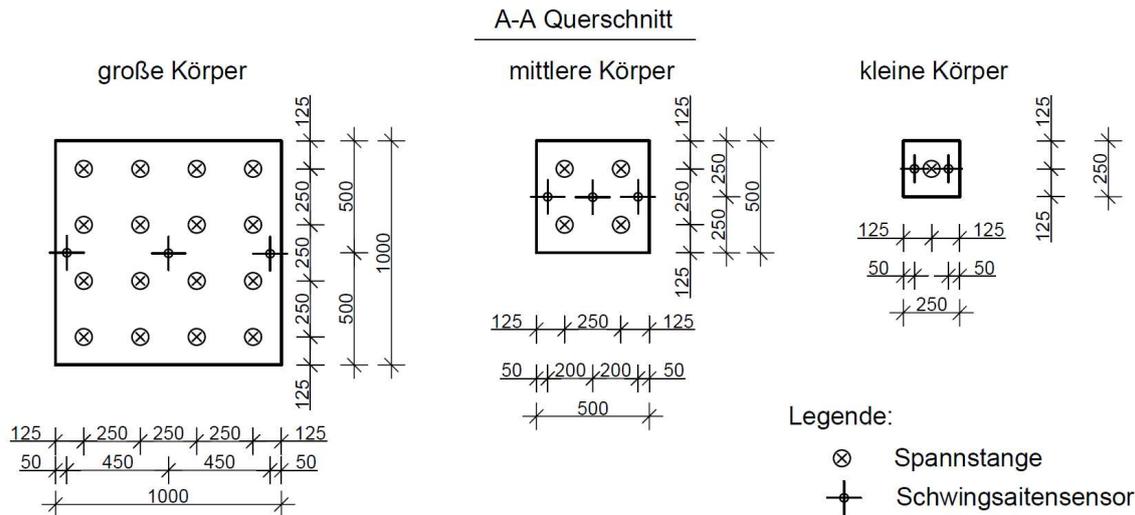


Bild 3.10: die geplante Anordnung der Spannstangen, Schwingsaitensensoren der Versuchsserie S3 und S4; Körper mit Vorspannung; die Einheiten sind in [mm]

Die gebaute Position der Kraftmessdosen, und Schwingsaitensensoren ist in Anhang A gezeigt. Der Unterschied zwischen geplanten und gebauten Abmessungen war immer innerhalb von 2 [cm].

Bild 3.11 zeigt einen in dem betrachteten Experiment verwendeten Dehnmessstreifen (DMS) und den Schutz dieser DMS.

Die Installation einer verwendeten Kraftmessdose sieht man im Bild 3.12.



Bild 3.11/a und 3.11/b: Fotos von einem Dehnmessstreifen (DMS)



Bild 3.12: Kraftmessdosen an den kleinen Körpern der Serien S1 und S2

Die Vorspannung erfolgte ohne Verbund, wobei die Spannstange parallel mit der Längsachse der Körper liegen.

Um bei den Versuchen nur die Kriech- und Schwindverformung des Betons zu untersuchen, ist es von essentieller Bedeutung, dass die schlaffe Bewehrung die Stauchung der Probekörper nicht beeinflusst. Aus diesem Grund ist in jedem Probekörper nur ein Minimum an Bewehrung eingelegt. Es wurden, wie bei den nicht vorgespannten Probekörpern, zwei Bewehrungsstäbe $\phi 12$ in Querrichtung eingelegt, auf welchen die Schwingsaitensensoren befestigt wurden. Bei den vorgespannten Körpern wurde aber noch im Bereich der Verankerungen der Spannstangen auf einer Länge von 380 [mm] ein Bewehrungskorb zur Aufnahme der Verankerungskräfte aus der Vorspannung eingelegt. Mit Ausnahme der beschriebenen Bereiche wurde keine Bewehrung in die Betonkörper eingelegt.

Bild 3.13 zeigt Fotos von den Körpern mit dem 1000x1000 [mm] Querschnitt vor der Betonierung.



Bild 3.13/a und 3.13/b: großer Körper (mit 1000x1000 [mm] Querschnitt) vor der Betonierung; Serie S4

Bild 3.14 zeigt Fotos von den Hüllrohren und den Verankerungen mittels eingeschraubter Mutter mit feinem Gewinde. Bild 3.15 zeigt Fotos von den fertigen Betonkörpern der Serie S3.

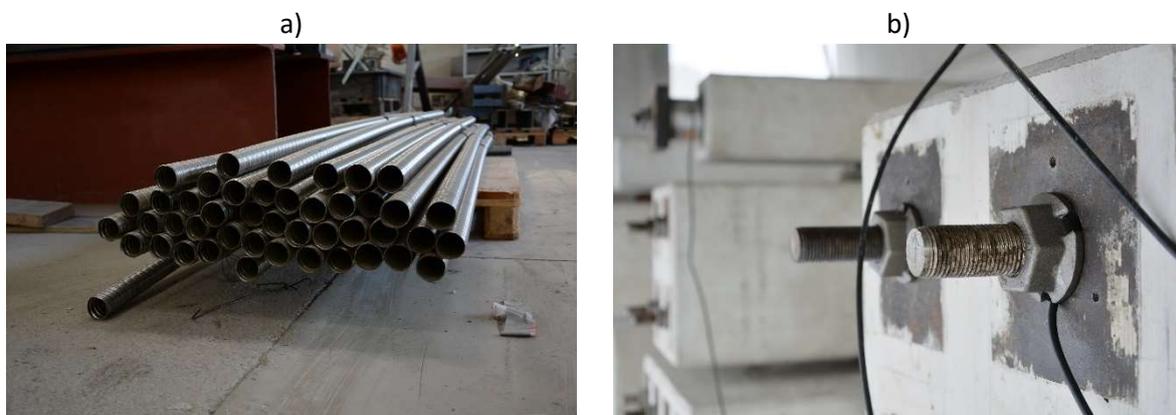


Bild 3.14/a: in dem Experiment verwendete Hüllrohre; 3.14/b: die Verankerung mittels eingeschraubter Mutter mit feinem Gewinde



Bild 3.15/a und 3.15/b: Die fertigen Körper mit Vorspannung der Serie S3

c) Lagerung der Betonkörper:

Die Betonkörper wurden im Freien gelagert, wobei sie aber durch eine Überdachung vor direkter Sonnenstrahlung und vor Niederschlag geschützt waren. Die relative Luftfeuchtigkeit und Temperatur änderten sich mit der Zeit. Bild 3.16 und Bild 3.17 zeigen Fotos, wie und wo die Betonkörper gelagert wurden.



*Bild 3.16/a: Stütze und Hauptträger der Überdachung (für die Lagerung der Betonkörper)
Bild 3.16/b: die Lagerung der Betonkörper der Serie S1 und S2
(das Foto zeigt auch für die Vor- und Nachspannung verwendetes Gerät)*



*Bild 3.17/a: die gebaute Konstruktion für die Überdachung der Betonkörper
Bild 3.17/b: die Lagerung der Betonkörper
(das Foto wurde innerhalb der Überdachungskonstruktion gemacht)*

Die Betonkörper wurden übereinander gelagert und auf Elastomerlager gelegt nach Bild 3.19.
Die Anordnung der Elastomerlager wurden vorher geplant nach Bild 3.18.

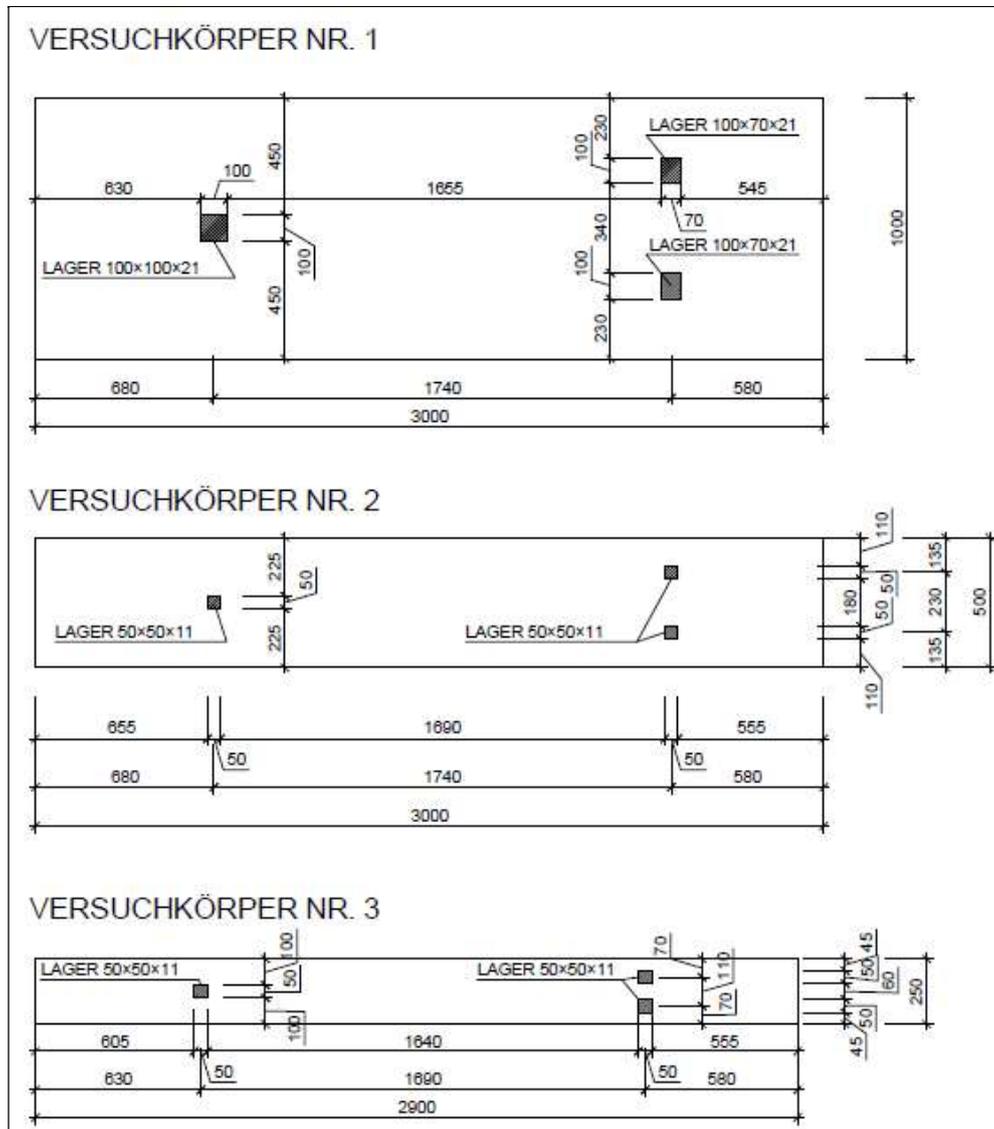


Bild 3.18: Die Anordnung der Elastomerlager



Bild 3.19/a: Elastomerlager

Bild 3.19/b: Foto über die Lagerung eines Betonkörpers
(mit Elastomerlager und mit Beton Kraftverteilungskörper)

Eigenschaften der Serie

Die wichtigsten Eigenschaften der einzelnen Versuchsserien sind in Tabelle 3.1 dargestellt.

	Versuchsserie			
	S1	S2	S3	S4
Betongüte	C30/37	C50/60	C30/37	C30/37
Herstellung	Sommer	Sommer	Winter	Winter
Gesteinskörnung	Ostösterreich	Ostösterreich	Westösterreich	Ostösterreich

Tabelle 3.1: Eigenschaften der Versuchsserie

Die Versuchsserie S4 wurde mit dem gleichen Beton wie die Versuchsserie S1 hergestellt.

In der Diplomarbeit betrachtete Serie

Diese Diplomarbeit konzentrierte sich auf die Winterserien (Serie S3 und Serie S4). Der Unterschied zwischen Serie S3 und Serie S4 ist die Gesteinskörnung. Bei der Versuchsserie S1 und S3 wurden Untersuchungen zur petrographischen Charakterisierung der Gesteinskörnung durchgeführt. Bei den untersuchten Proben handelt es sich um Kies/Sande mit gut gerundeten Komponenten.

In Tirol wurde die Versuchsserie S3 hergestellt, während Serie S4 in Gars am Kamp hergestellt wurde. Der Beton wurde von einem Betonmischer pro Serie geliefert, so wurde garantiert, dass alle Betonkörper von der gleichen Serie, die gleichen Eigenschaften haben. Die Körper wurden an dem 6. Tag vorgespannt.

3.2. Beton Eigenschaften

3.2.1. Beton Eigenschaften nach Laborergebnissen

Im Labor wurde die Zylinderdruckfestigkeit und Rohdichte im Betonalter von 6 und auch von 28 Tagen bestimmt. Die Laborergebnisse der Betoneigenschaften sind in Tabelle 3.2 dargestellt.

	Serie S3		Serie S4	
	t=6 [Tage]	t=28 [Tage]	t=6 [Tage]	t=28 [Tage]
Zylinderdruckfestigkeit [MPa]	29,6	42,1	31,0	44,4
Rohdichte [kg/m ³]	2420	2440	2290	2280

Tabelle 3.2: Betoneigenschaften nach Laborergebnissen

3.2.2. Eigenschaften des geplanten Betons

Der Beton wurde für Serie S3 und für Serie S4 mit folgenden Eigenschaften geplant:

Bezeichnung:	C30/37 B5 GK22 F52 CEMII 42,5 N
Wasser für W/B:	167 [kg/m ³]
Bindemittel für W/B:	350 [kg/m ³]

W/B:	0,48	[-]
Rohdichte:	2329	[kg/m ³]
Bindemittel:	365	[kg/m ³]
Leimvolumen:	0,285	[m ³]
Mehlkorngehalt:	394	[kg/m ³]
Mehlkorn- Feinstsand:	468	[kg/m ³]

3.2.3. Werte des Elastizitätsmoduls

Die Werte des Elastizitätsmoduls wurden im Labor von Karlsruhe Institut für Technologie- KIT und von der TU Wien nach den Messwerten des Experiments (von den Verzerrungen infolge von Vorspannung) bestimmt (weilers als „Ausgewerteter Elastizitätsmodul des Betons nach den Messwerten des Experiments“ oder als „E-Modul nach den in situ Messungen“ bezeichnet). Die Laborergebnisse und die Ergebnisse nach den In-situ-Messungen sind in Kapitel 3.2.3.1 und in Kapitel 3.2.3.2 dargestellt.

3.2.3.1. Elastizitätsmodul des Betons nach den Laborergebnissen

Serie S3

im Betonalter von 6 Tagen:	28 428	[MPa]
im Betonalter von 28 Tagen:	38 000	[MPa]

Serie S4

im Betonalter von 6 Tagen:	27 333	[MPa]
im Betonalter von 28 Tagen:	30 950	[MPa]

3.2.3.2. Ausgewerteter Elastizitätsmodul des Betons nach den Messwerten des Experiments (In-situ-Messungen)

Serie S3

im Betonalter von 6 Tagen		
großer Körper (1000x1000 [mm]):	24 500	[MPa]
mittlerer Körper (500x500 [mm]):	19 000	[MPa]
kleiner Körper (250x250 [mm]):	19 000	[MPa]

Serie S4

im Betonalter von 6 Tagen		
großer Körper (1000x1000 [mm]):	26 500	[MPa]
mittlerer Körper (500x500 [mm]):	24 000	[MPa]
kleiner Körper (250x250 [mm]):	21 000	[MPa].

3.3. Ergebnis des betrachteten Experiments

Um die Ergebnisse des Experiments mit den verschiedenen Betonmodellen vergleichen zu können, sollten die Tagesschwankungen zufolge der Temperaturänderung und zufolge der Änderung der Luftfeuchtigkeit mit Tagesmittelwerten ersetzt werden. Die relative Luftfeuchtigkeit, die Temperatur der Betonkörper, die Dehnungswerte der Betonkörper und die Kräfte der Spannstangen wurden deswegen mit einem Wert pro Tag mit den Tagesmittelwerten berücksichtigt. Es wurde angenommen, dass sich die Tagesmittelwerte der Temperatur und Verzerrungen homogen über den Querschnitt verteilen.

Die Tagesmittelwerte wurden nach Gleichung (3.1) und nach Gleichung (3.2) berechnet (Mittelungsregel):

$$X(t_i) = \frac{1}{n} \cdot \sum_{j=1}^n x_j \quad (3.1)$$

$$X_{Tag} = \frac{1}{m} \cdot \sum_{t_i=1}^m X(t_i) \quad (3.2)$$

Dabei ist:

$X(t_i)$	der Mittelwert, zu einem Zeitpunkt t_i gehörender Wert;
n	die Anzahl der Sensoren in einem Querschnitt;
x_j	der Messwert in Sensor „j“;
X_{Tag}	der Tagesmittelwert;
m	die Anzahl der Messzeitpunkte pro Tag.

Für die Berücksichtigung der relativen Luftfeuchtigkeit, Temperatur und Spannkkräfte wurden auch Mittelwerte über die ganze Messperiode verwendet, die von den Tagesmittelwerten, nach Gleichung (3.3) berechnet wurden.

$$X_M = \frac{1}{k} \cdot \sum_{i=1}^k X_{Tag}(i) \quad (3.3)$$

Dabei ist:

X_M	der Mittelwert über die ganze Messperiode;
k	Anzahl der Tage in der Messperiode.

3.3.1. Umgebungsbedingungen

Die Außentemperatur, und die relative Luftfeuchtigkeit wurden gemessen. Das Ergebnis der Messung ist in Bild 3.20 dargestellt.

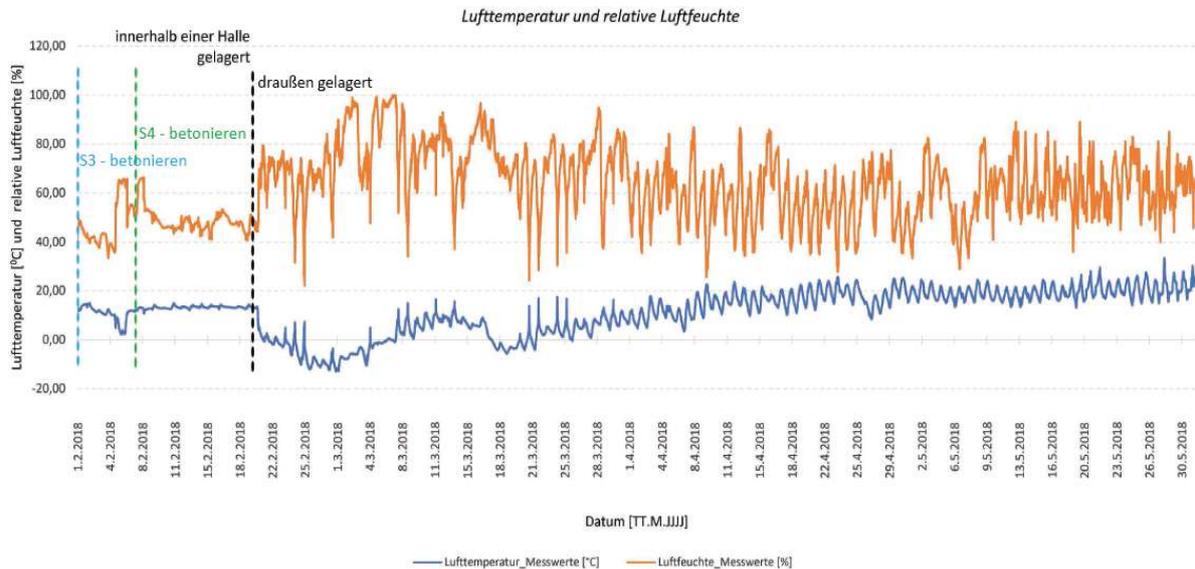


Bild 3.20: Messwerte der Außentemperatur (blaue Linie), und Messwerte der relativen Luftfeuchte (orange Linie)

3.3.1.1. Berücksichtigung der Umgebungsbedingungen bei dem Experiment

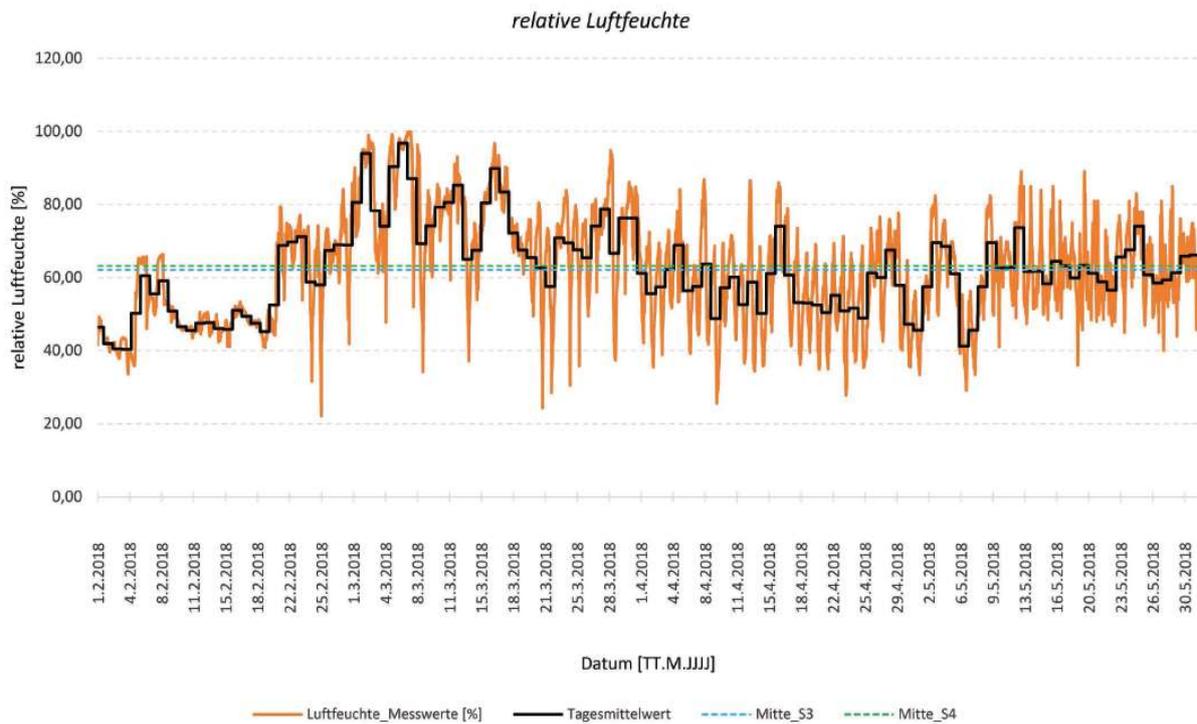
In den Körpern wurde die Temperatur gemessen, deswegen wurde für die Auswertung weiters die Temperaturen innerhalb der Körper verwendet.

Bild 3.21 zeigt wie die Luftfeuchte mit den verschiedenen Modellen berücksichtigt wurde. Die Luftfeuchte wurde mit den verschiedenen Modellen mit Tagesmittelwerten (durchgehende schwarze Linie in Bild 3.21) nach der Gleichung (3.2), oder mit einem Mittelwert über die ganze Trocknungs- oder Belastungsperiode (gestrichelte schwarze Linie in Bild 3.21) nach der Gleichung (3.3) berücksichtigt. Der Mittelwert der relativen Luftfeuchte über die ganze Messperiode ergab sich nach Gleichung (3.4):

$$RH_{M,S3} = 62,17 \text{ [%]} \quad (3.4-1)$$

$$RH_{M,S4} = 63,22 \text{ [%]} \quad (3.4-2)$$

wobei sich $RH_{M,S3}$ auf Serie S3 und $RH_{M,S4}$ auf Serie S4 bezieht. Es gibt Unterschiede zwischen $RH_{M,S3}$ und $RH_{M,S4}$ weil die Messperiode der Versuchsserie S4 um eine Woche kleiner als die Messperiode der Versuchsserie S3 ist.



*Bild 3.21: die Messwerte der relativen Luftfeuchte (orange Linie);
die durchgehende schwarze Linie bezeichnet die Tagesmittelwerte der relativen Luftfeuchte nach
Gleichung (3.2);
die gestrichelte blaue Linie bezeichnet einen Mittelwert über die ganze Messperiode nach
Gleichung (3.3) für Serie S3, $RH_{M,S3} = 62,17$ [%];
die gestrichelte grüne Linie bezeichnet einen Mittelwert über die ganze Messperiode nach
Gleichung (3.3) für Serie S4, $RH_{M,S4} = 63,22$ [%]*

3.3.2. Temperatur innerhalb der Betonkörper

Die Temperatur innerhalb der Betonkörper wurde mit den Schwingsaitensensoren gemessen und nach den Gleichungen (3.1) - (3.2) wurden Tagesmittelwerte berechnet. Die Anordnung der Sensoren je Betonkörper ist in Anhang A angegeben.

3.3.2.1. Berücksichtigung der Temperatur innerhalb der Betonkörper

Die Temperatur wurde mit den verschiedenen Modellen mit Tagesmittelwerten nach Bild 3.22, Bild 3.23, Bild B.13, Bild B.14 oder mit einem Mittelwert über die ganze Trocknungs- oder Belastungsperiode nach Tabelle 3.3 berücksichtigt. Die Mittelwerte über die ganze Trocknungs- oder Belastungsperiode wurden nach Gleichung (3.3) berechnet.

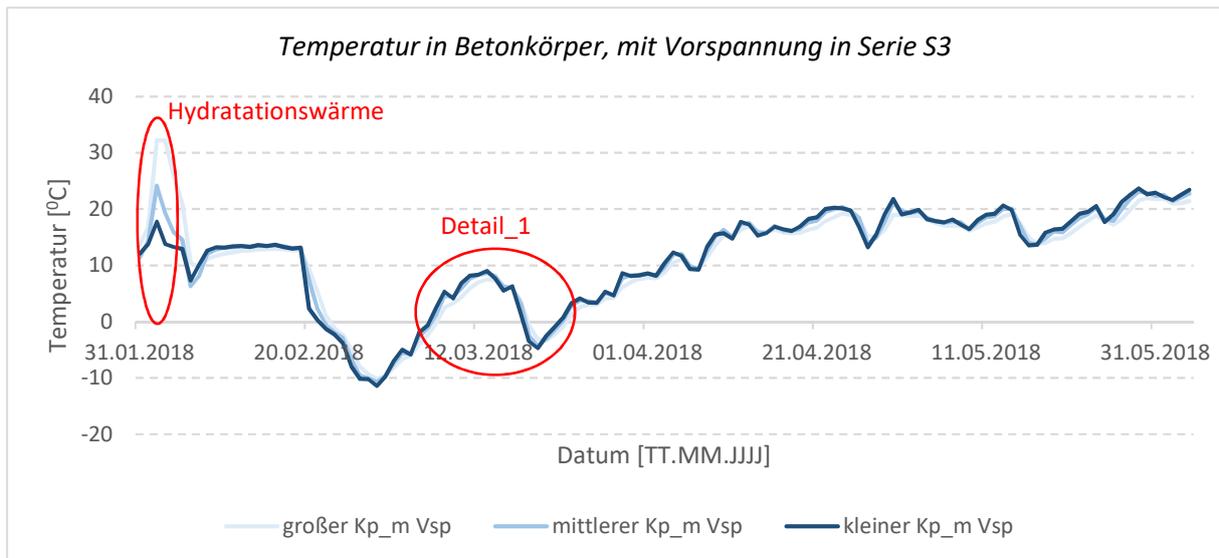


Bild 3.22: Tagesmittelwerte der Temperatur innerhalb der Betonkörper mit Vorspannung; Serie S3

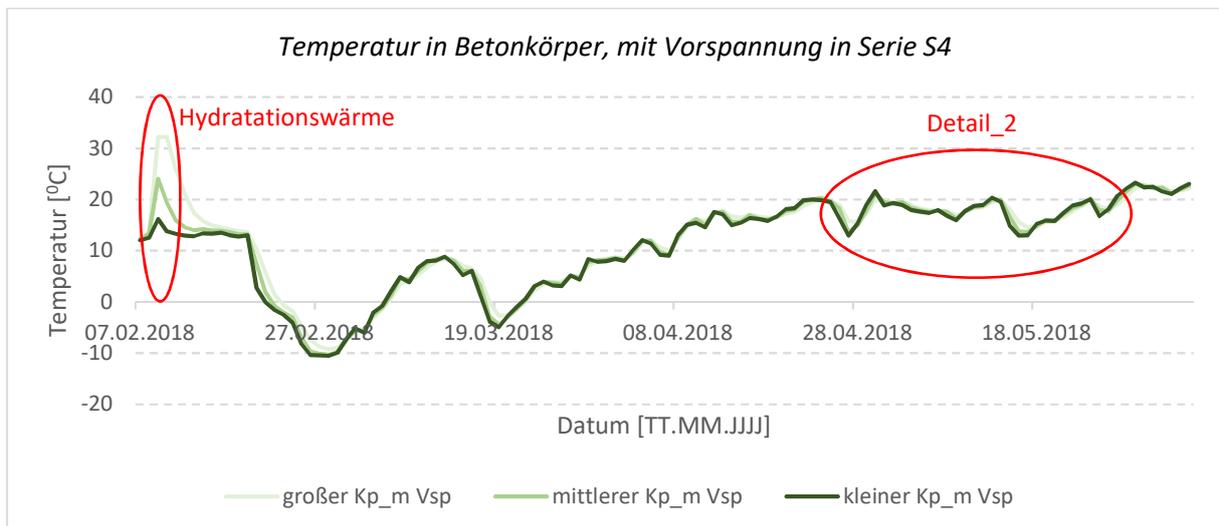


Bild 3.23: Tagesmittelwerte der Temperatur innerhalb der Betonkörper mit Vorspannung; Serie S4

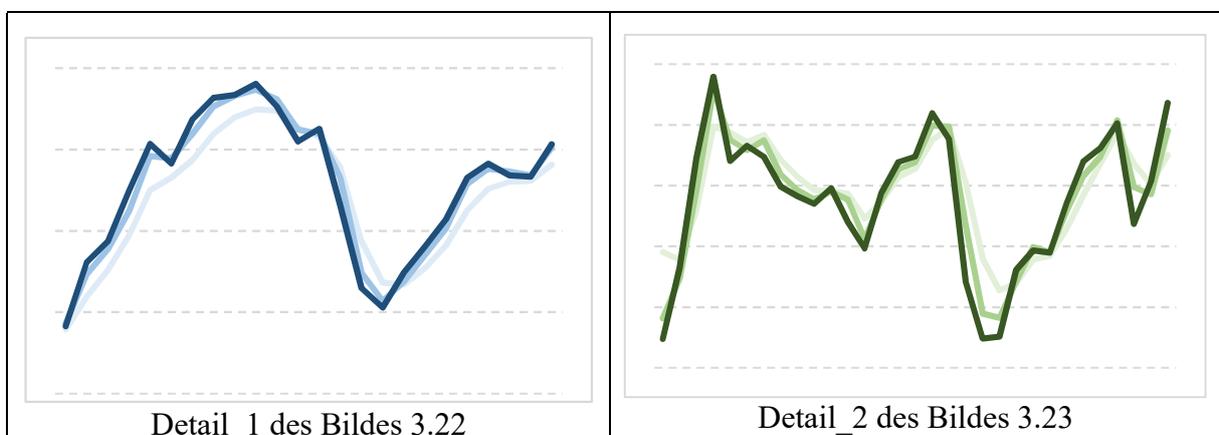


Bild 3.22 und Bild 3.23 zeigen, dass die Temperatur in den einzelnen Betonkörpern ganz gut übereinstimmen, weil sie den gleichen Umgebungsbedingungen ausgesetzt sind. Die zwei

Bilder (Bild 3.22; Bild 3.23) zeigen auch, dass je größer ein Querschnitt ist, desto höher ist die Temperatur zufolge der Hydratationswärme. Die Temperaturschwankungen nach der Aushärtung sind kleiner für die größeren Querschnitte als für die kleineren nach den Details (Detail_1; Detail_2).

Die Temperaturwerte der Körper ohne Vorspannung sehen sehr ähnlich aus, wie die Temperaturwerte der Betonkörper mit Vorspannung, deswegen sind sie in dem Anhang A enthalten.

	T Mittelwert über den ganzen Messperiode [°C]	
	Körper mit Vorspannung	Körper ohne Vorspannung
S3_große Querschnitt (1000x1000 [mm])	10,67	10,79
S3_mittlere Querschnitt (500x500 [mm])	10,79	10,41
S3_kleine Querschnitt (250x250 [mm])	10,70	10,57
S4_große Querschnitt (1000x1000 [mm])	12,05	12,19
S4_mittlere Querschnitt (500x500 [mm])	11,43	11,90
S4_kleine Querschnitt (250x250 [mm])	11,05	11,26

Tabelle 3.3: Mittelwerte der Temperatur über die ganze Messperiode innerhalb der Betonkörper (Messperiode der Serie S3: 01.02.2018- 31.05.2018; Messperiode der Serie S4: 08.02.2018- 31.05.2018)

3.3.3. Spannkraftverluste

In diesem Kapitel werden die Spannkraftverluste bei Vorspannung ohne Verbund betrachtet, weil das betrachtete Experiment als Vorspannung ohne Verbund ausgeführt wurde.

3.3.3.1. Sofortige Spannkraftverluste

Unter sofortigen Spannkraftverlusten versteht man Spannungsverluste, die gleich nach der Vorspannung auftreten. Es gibt verschiedene Arten von sofortigen Spannkraftverlusten, wie Reibungsverluste an den Umlenkungen (in unserem Fall gibt es keine), Verluste infolge des Keileinzugs und Spannkraftverluste aus elastischer Verformung des Betons.

In dem betrachteten Experiment sollte die Vorspannkraft 610 [kN] pro Stab, nach dem Abklingen der kurzzeitigen Verluste betragen. Diese Kraft verursacht am Nettoquerschnitt eine Spannung von 10 [MPa].

3.3.3.1.1. Verluste infolge Keilschlupf

Zwar werden die Keile in den Keilkonus eingedrückt, es entsteht Bewegung von Spannstäben und Keilen gegen die Spannrichtung. Die Keile werden in den Konus gezogen, und gewährleisten so eine kraft- und formschlüssige Verankerung.

In dem betrachteten Experiment wurden Spannstäben mit aufgerolltem feinem Gewinde benutzt, um die Spannkraftverluste infolge von Keilschlupf zu reduzieren.

3.3.3.1.2. *Spannkraftverluste aus elastischer Verformung des Betons*

Zum Zeitpunkt t_0 (*Belastungszeitpunkt*) wurden die Spannstäbe nicht gleichzeitig, sondern mehrstufig vorgespannt, um die *Spannkraftverluste aus elastischer Verformung des Betons* zu reduzieren. Wegen dieser mehrstufigen Vorspannung entstehen aber auch Längsstauchungen bzw. wegen der exzentrischen Lage der Spannstäbe zusätzliche Verkrümmungen, die zu einer Entspannung der schon vorgespannten Spannglieder führt.

3.3.3.2. **Zeitabhängige Spannkraftverluste**

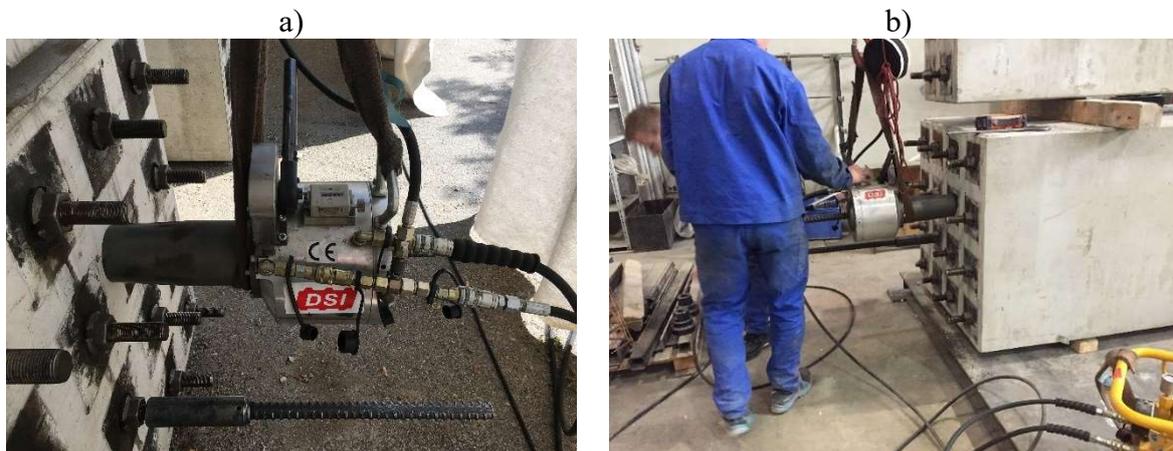
Die Kürzung des Konstruktionsmaterials mit der Zeit durch Kriechen und Schwinden führt zu einer Abnahme der Vorspannkraft.

Über die zeitabhängigen Verformungen des Betons wurde in Kapitel 2 geschrieben.

3.3.3.3. **Kompensierung der Spannkraftverluste**

Die sofortigen Spannkraftverluste wurden so kompensiert, dass statt der gewünschten 610 [kN]/Stange mit ca. 660 [kN]/Stange gespannt wurde, sodass nach den sofortigen Spannkraftverlusten ca. 610 [kN]/Stange Spannkraft blieb, nach Bild 3.25 und Bild 3.26 (es wurde während des Experiments geprüft).

Die zeitabhängigen Spannkraftverluste wurde so kompensiert, dass die Körper nach einer Senkung von ca. 5-7% unterhalb der gewünschten Spannkraft nachgespannt wurden.



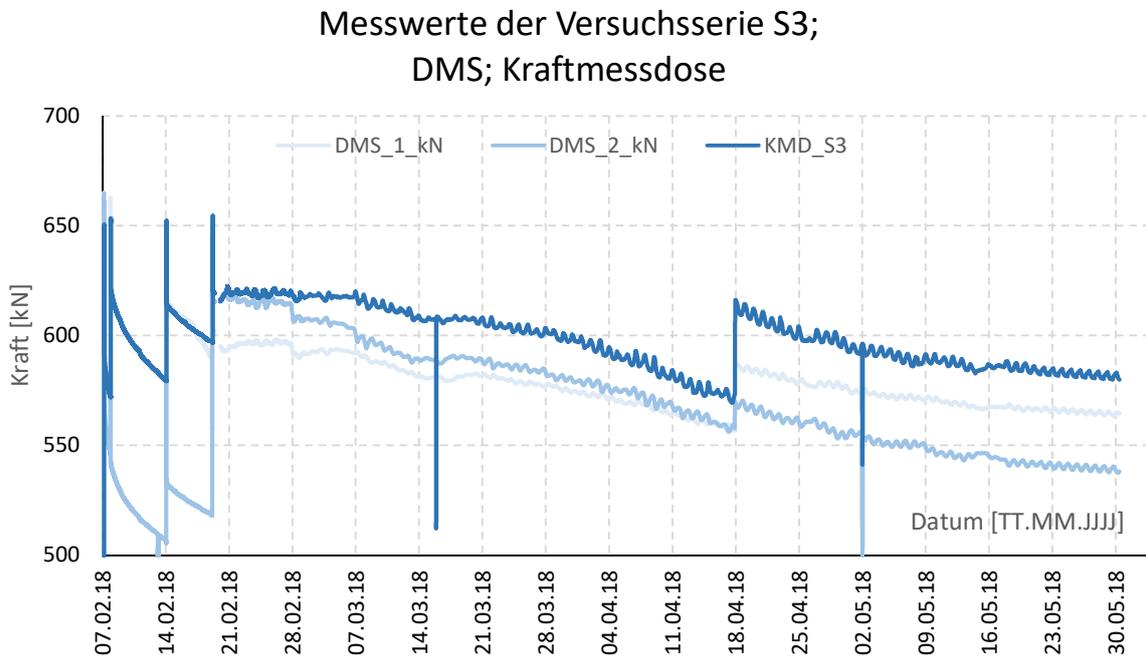
*Bild 3.24/a: Nachspannung eines Betonkörpers
Bild 3.24/b: Für die Vor- und Nachspannung verwendetes Gerät*

Bild 3.24 zeigt die Nachspannung eines Betonkörpers.

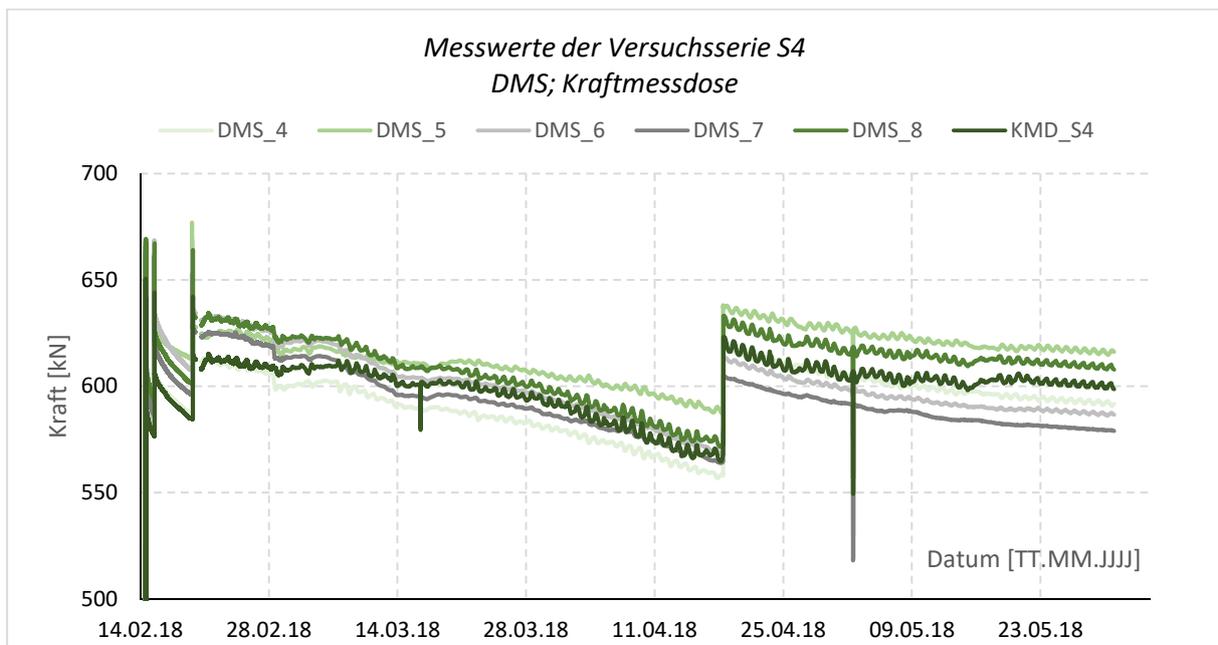
In dem Anhang A gibt es noch Fotos von dem betrachteten Experiment.

3.3.3.4. Messwerte der Spannkraftverluste

Die Spannkräfte wurden mit Dehnmessstreifen und Kraftmessdosen gemessen, und das Ergebnis der Messung ist in Bild 3.25 und in Bild 3.26 dargestellt.



*Bild 3.25: Messwerte der Spannkräfte, Serie S3
(DMS_1 und DMS_2 sind in dem großen Körper (mit 1000x1000 [mm] Querschnitt; nach Bild 3.27
Kraft_S3 ist in dem kleinen Körper (mit 250x250 [mm] Querschnitt; nach Bild 3.30)*



*Bild 3.26: Messwerte der Spannkräfte, Serie S4
(DMS_4 und DMS_5 sind in dem großen Körper (mit 1000x1000 [mm] Querschnitt; nach Bild 3.28
DMS_6 und DMS_7 sind in dem mittleren Körper (mit 500x500 [mm] Querschnitt; nach Bild 3.29
DMS_8 und KMD_16 sind in dem kleineren Körper (mit 250x250 [mm] Querschnitt; nach Bild 3.31)*

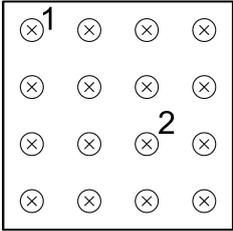
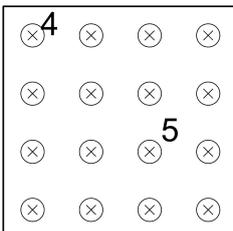
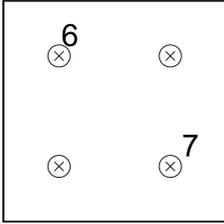
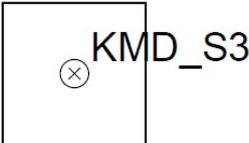
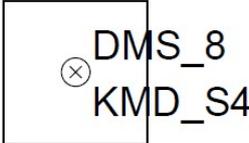
Bild 3.25 und Bild 3.26:

Die Bilder zeigen die Messwerte der Vorspannkkräfte. Die Spannkraftverluste resultieren in der Abnahme der Spannkkräfte, deswegen wurden die Körper nachgespannt. Tabelle 3.4 zeigt die Daten, wenn die Körper nachgespannt wurden.

Daten der Nachspannungen	
Serie S3	Serie S4
07.02.2018	14.02.2018
08.02.2018	15.02.2018
14.02.2018	19.02.2018
19.02.2018	18.04.2018
18.04.2018	

Tabelle 3.4: Daten der Nachspannungen für Serie S3 und Serie S4

Die Bilder (Bild 3.25; Bild 3.26) zeigen, dass die Spannkkräfte sich innerhalb von einem Tag ändern, weil sich die Länge der Betonkörper auch ändert. Innerhalb von einem Tag gibt es Längenänderungen wegen Temperatur- und Luftfeuchteänderung.

	
<p><i>Bild 3.27: DMS in dem großen Körper; Serie S3</i></p>	<p><i>Bild 3.28: DMS in dem großen Körper; Serie S4</i></p>
	
<p><i>Bild 3.29: DMS in dem mittleren Körper; Serie S4</i></p>	
	
<p><i>Bild 3.30: KMD in dem kleinen Körper; Serie S3</i></p>	<p><i>Bild 3.31: KMD, DMS im kleinen Kp.; Serie S4</i></p>

3.3.3.5. Berücksichtigung der Spannkraftverluste bei dem Experiment

Die Tagesmittelwerte der Spannkräfte nach Bild 3.32 (durchgehende Linie) weichen nicht bedeutend von den Mittelwerten über die ganze Belastungsperiode (gestrichelte Linie und Tabelle 3.5) ab, deswegen wurden die Spannkräfte mit einem Wert pro Körper mit dem Mittelwert über die Belastungsdauer (gestrichelte Linie in Bild 3.32) nach Tabelle 3.5 berücksichtigt.

	Mittlere Spannkraft/Stange [kN]		Mittlere Spannung in Körper [N/mm ²]	
	Serie S3	Serie S4	Serie S3	Serie S4
großer Körper (1000x1000 [mm] Querschnitt)	575,5	604,1	9,43	9,90
mittlerer Körper (500x500 [mm] Querschnitt)	610,0*	597,7	10,00*	9,80
kleiner Körper (250x250 [mm] Querschnitt)	599,8	604,6	9,83	9,91

Tabelle 3.5: Die mittleren Spannkräfte über die Belastungsdauer, und davon die Spannungen in den Körpern

*Anmerkung:

In dem mittleren Betonkörper (mit 500x500 [mm] Querschnitt) wurden keine Dehnmessstreifen (DMS) installiert, deswegen wurde da die Vorspannkraft mit 610 [kN] pro Stange berücksichtigt. (Nach dem Abklingen der kurzzeitigen Verluste sollte die Vorspannkraft 610 [kN] pro Stab betragen.)

Die Werte der Tabelle 3.5 wurden nach den Gleichungen (3.1) – (3.3) berechnet.

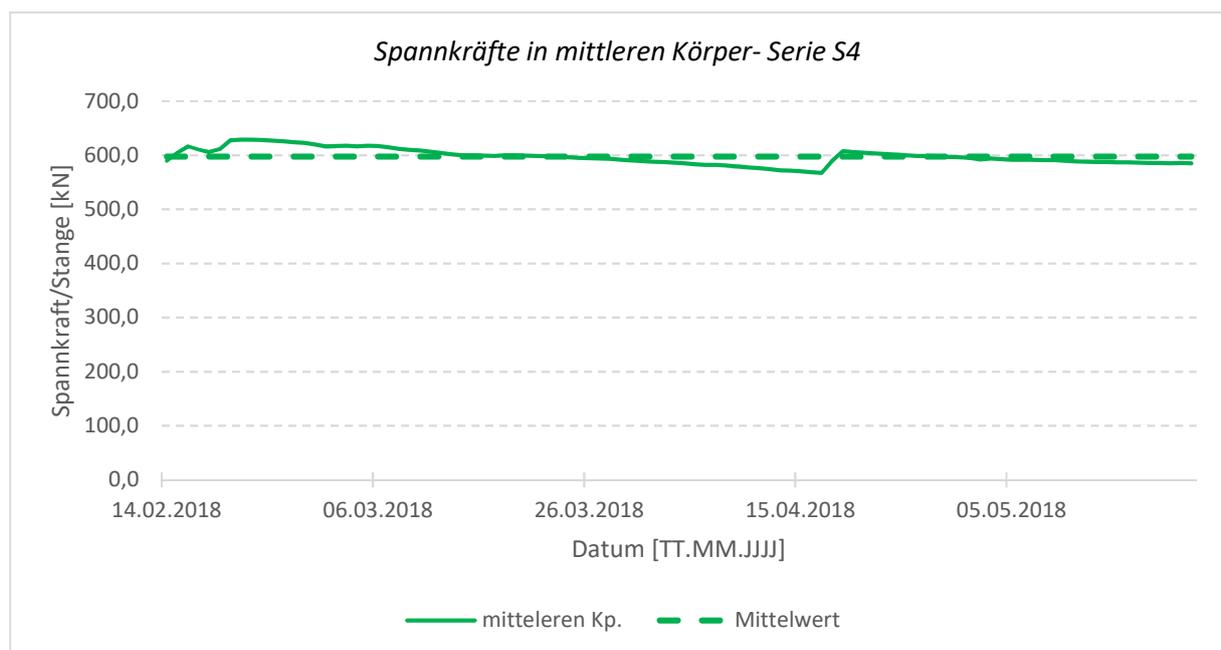


Bild 3.32: Messwerte- Tagesmittelwerte der Spannkräfte, und die Mittelwerte deren über die ganze Belastungsperiode in dem mittleren Körper (mit 500x500[mm] Querschnitt) - Serie S4

Die Tagesmittelwerte der Spannkkräfte, nach Bild 3.32 wurden nach den Gleichungen (3.1) – (3.2) berechnet.

Anmerkung:

Um die Menge der Diagramme in dem Hauptteil der Diplomarbeit reduzieren zu können, damit die Diplomarbeit klarer und übersichtlicher wird, werden weiters nur zu dem kleinen Körper (mit 250x250 [mm] Querschnitt) und nur zu dem großen Körper (mit 1000x1000 [mm] Querschnitt) gehörende Diagramme in dem Anhang dargestellt.

Messwerte- Tagesmittelwerte der Spannkkräfte, und die Mittelwerte über die ganze Belastungsperiode

in dem großen Körper (mit 1000x1000[mm] Querschnitt) der Serie S4;

in dem kleinen Körper (mit 250x250[mm] Querschnitt) der Serie S4;

in dem großen Körper (mit 1000x1000[mm] Querschnitt) der Serie S3;

in dem kleinen Körper (mit 250x250[mm] Querschnitt) der Serie S3

wurden in dem Anhang B dargestellt.

3.3.4. Schwinden nach den gemessenen Stauchungen

In den Körpern ohne Vorspannung entstehen Verzerrungen infolge der Temperaturänderung und des Schwindens. Die Schwingensaitensensoren, die die Verzerrungen des Betons messen, sind aber temperaturkompensiert, deswegen sollten die Verzerrungen infolge der Temperaturänderung nicht von den gesamten Verzerrungen abgezogen werden um reine Schwindkurven zu bekommen. Bild 3.33 und Bild 3.34 zeigen die Schwindkurve für die Serie S3 und Serie S4.

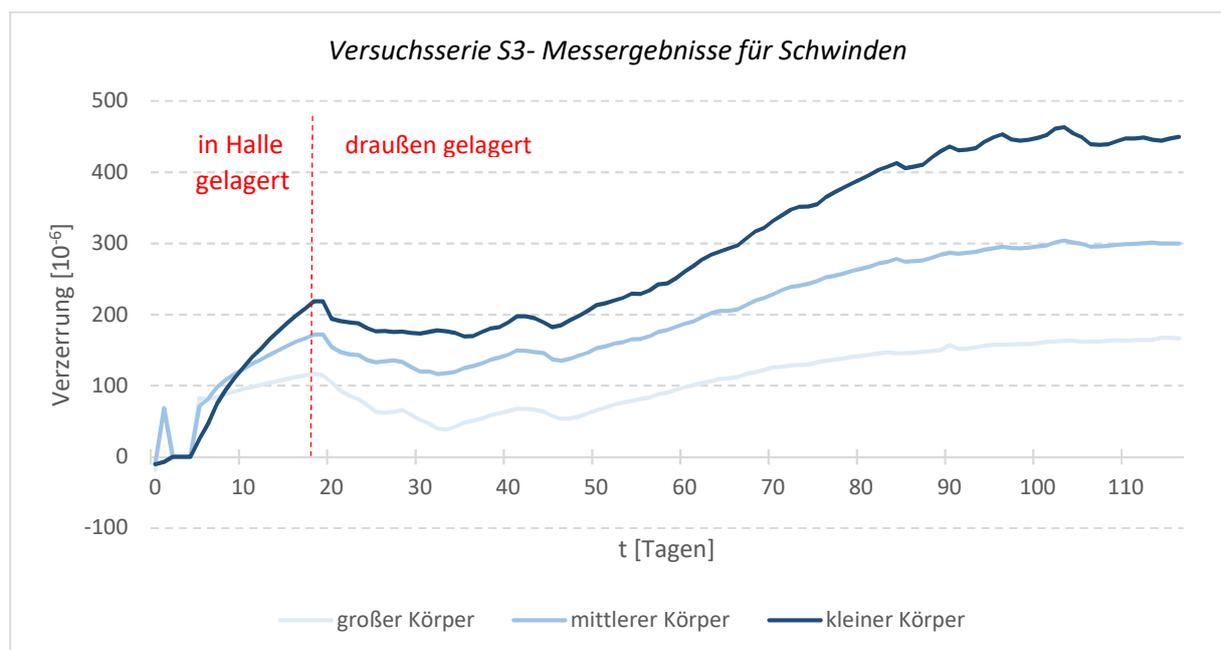


Bild 3.33: Schwindverzerrungen nach den Messwerten; Serie S3

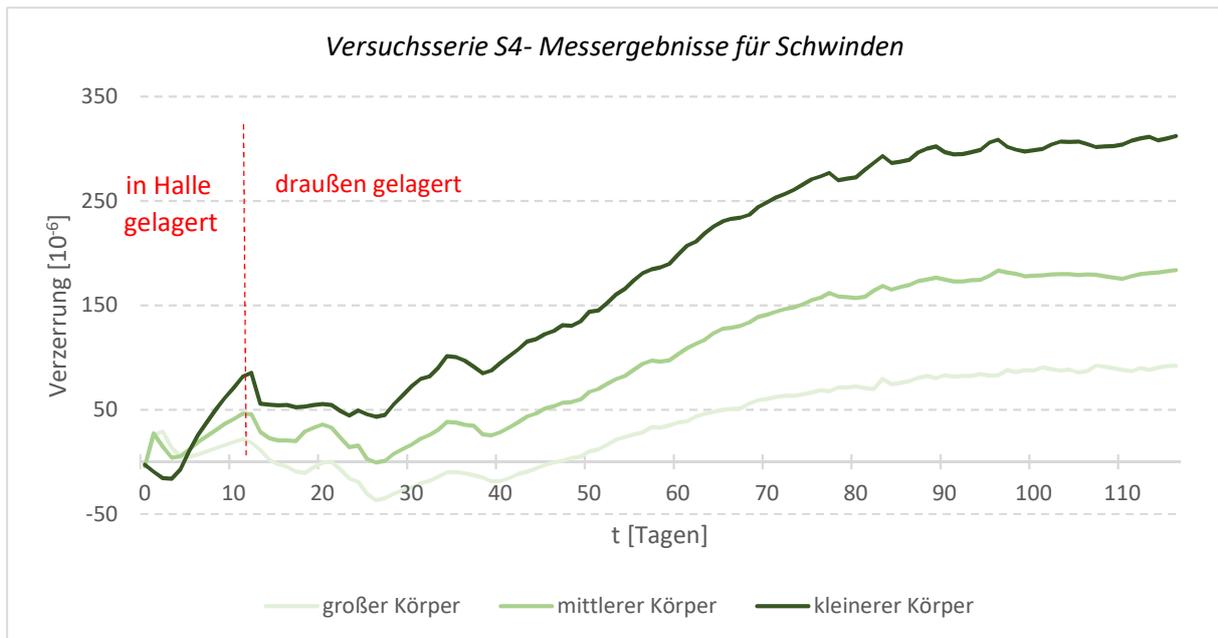


Bild 3.34: Schwindverzerrungen nach den Messwerten; Serie S4

Bild 3.33 und Bild 3.34 zeigen, dass es auch eine Abnahme in den Schwindverzerrungen gibt. Der Grund für die Abnahme der Verzerrungen ist wahrscheinlich, dass bei den betrachteten Betonkörpern nicht nur Schwinden sondern auch Quellen stattfindet.

3.3.5. Kriechen nach den gemessenen Stauchungen

In den Körpern mit Vorspannung entstehen Verzerrungen infolge von Temperaturänderung, Schwinden, Kriechen; während in den Körpern ohne Vorspannung Verformungen infolge von Temperaturänderung und Schwinden entstehen. Der Maß des Schwindens und der Temperaturdehnung ist theoretisch gleich für die Querschnitte mit der gleichen Dimension der gleichen Serie, weil sie aus Beton mit gleichen Eigenschaften sind und weil sie den gleichen Umgebungsbedingungen ausgesetzt sind. Reine Kriechkurven wurden deswegen so erstellt, dass die Verzerrungen der Körper ohne Vorspannung von den Verzerrungen der Körper mit Vorspannung subtrahiert wurden.

Beispiel (mittlerer Körper):

Die Kriechkurven des Bildes 3.37 (mittlerer Körper) wurden so erstellt, dass von den Werten des Bildes 3.35 die Werte des Bildes 3.36 abgezogen wurden. Bild 3.35 stellt die Verzerrungswerte der Körper mit Vorspannung dar (mittlerer Körper; mit 500x500 [mm] Querschnitt), und Bild 3.36 zeigt die Verzerrungswerte der Körper ohne Vorspannung (mittlerer Körper; mit 500x500 [mm] Querschnitt).

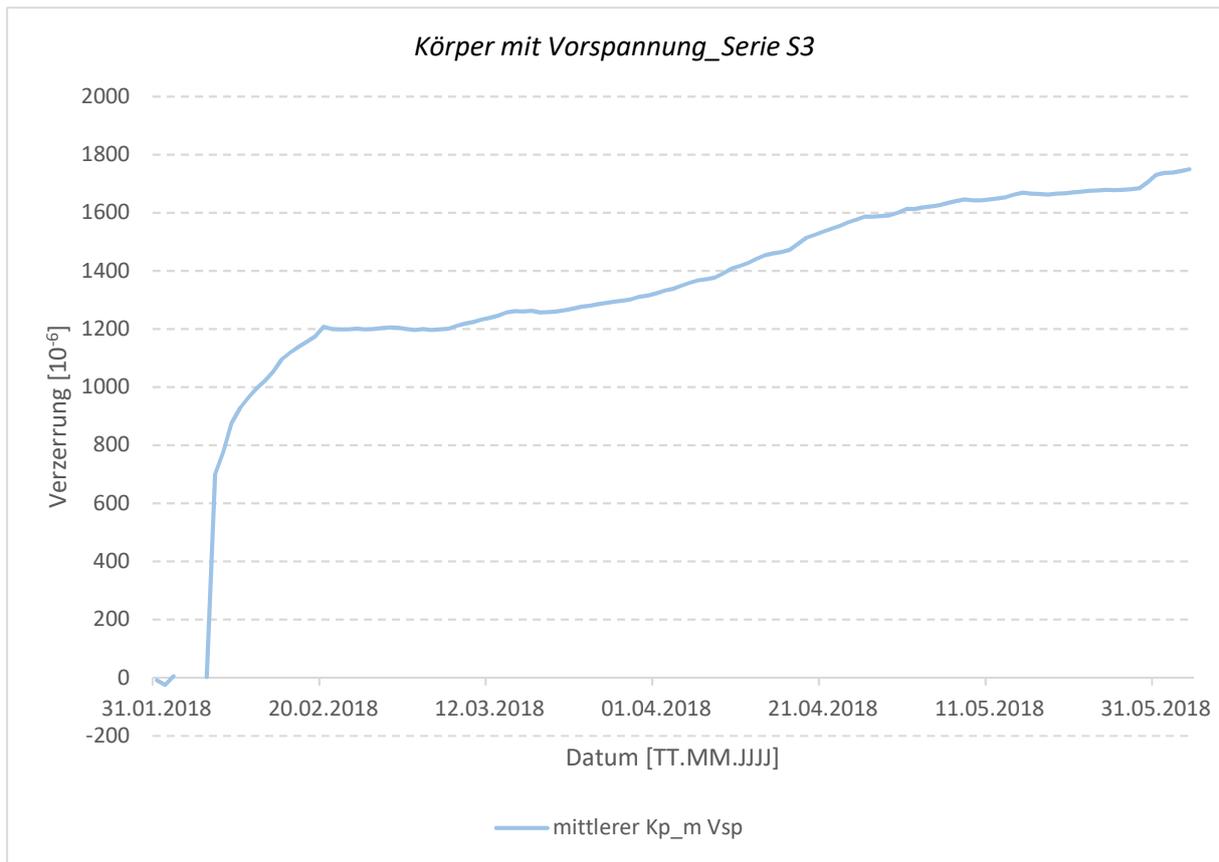


Bild 3.35: Die gemessenen Stauchungen in den Körpern mit Vorspannung der Serie S3; mittlerer Körper (mit 500x500 [mm] Querschnitt)

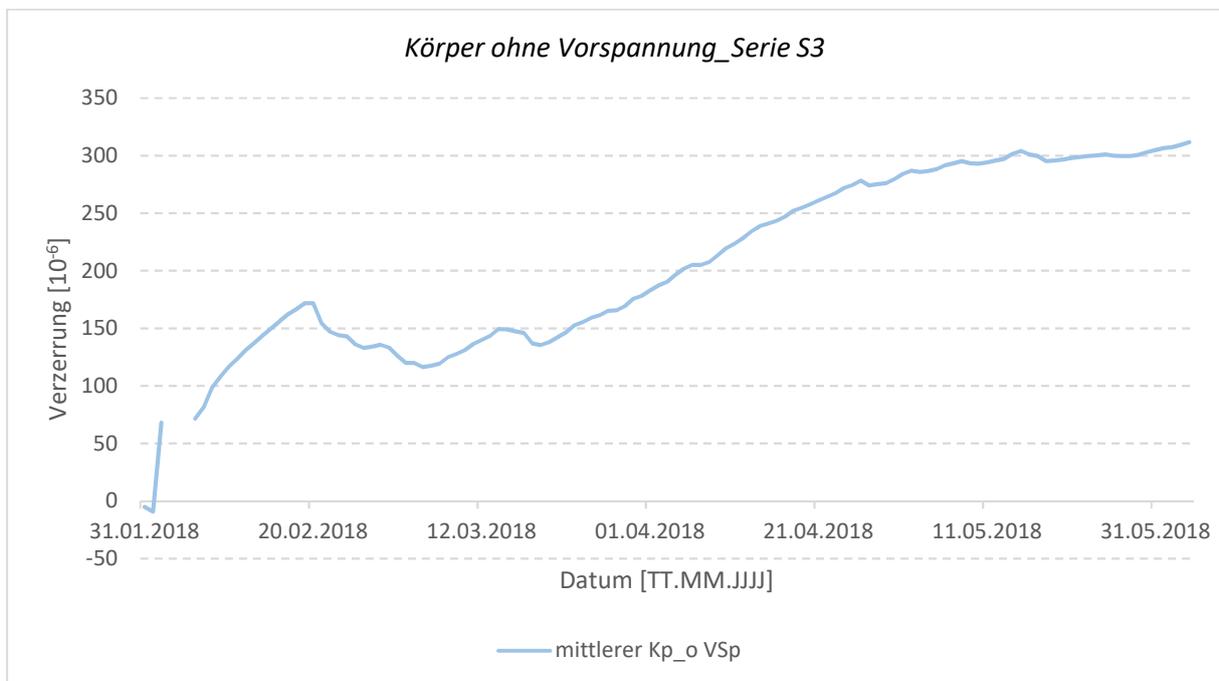


Bild 3.36: Die gemessenen Stauchungen in den Körpern ohne Vorspannung der Serie S3; mittlerer Körper (mit 500x500 [mm] Querschnitt)

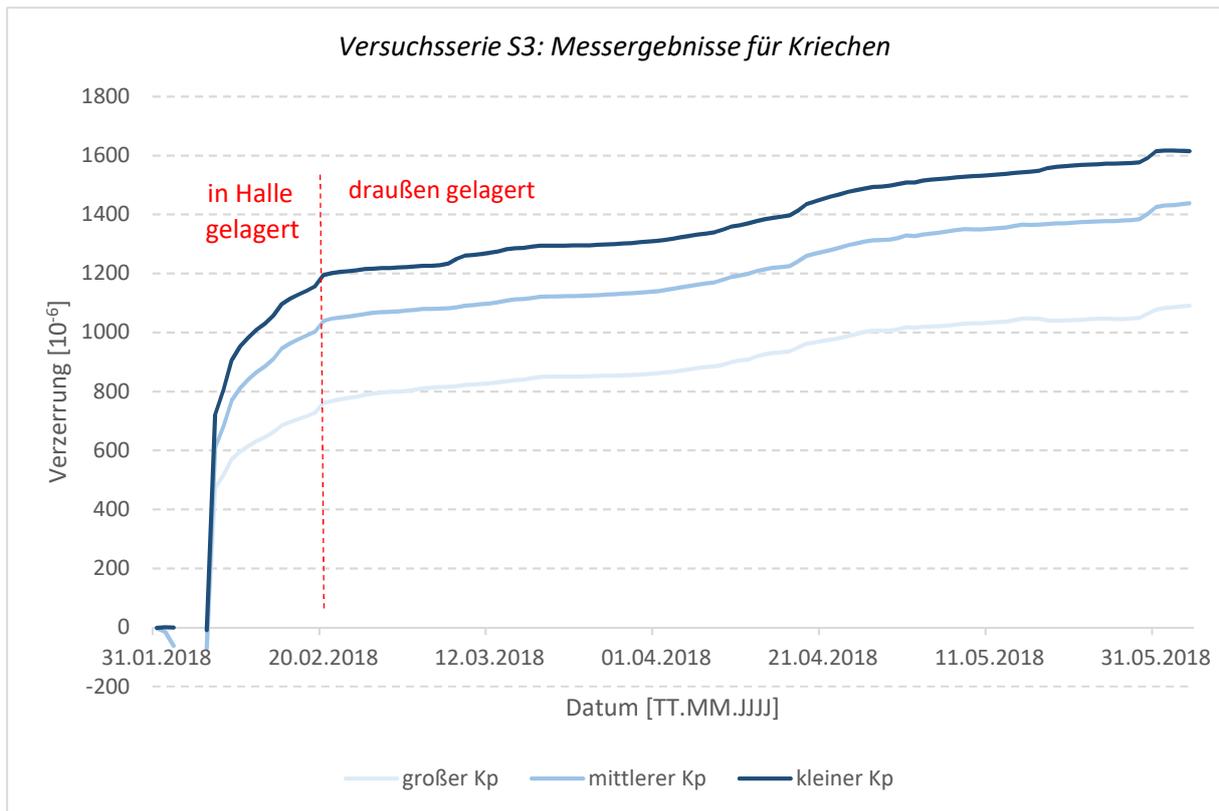


Bild 3.37: Die elastische Verzerrung und Kriechstauchung nach den Messwerten; Serie S3

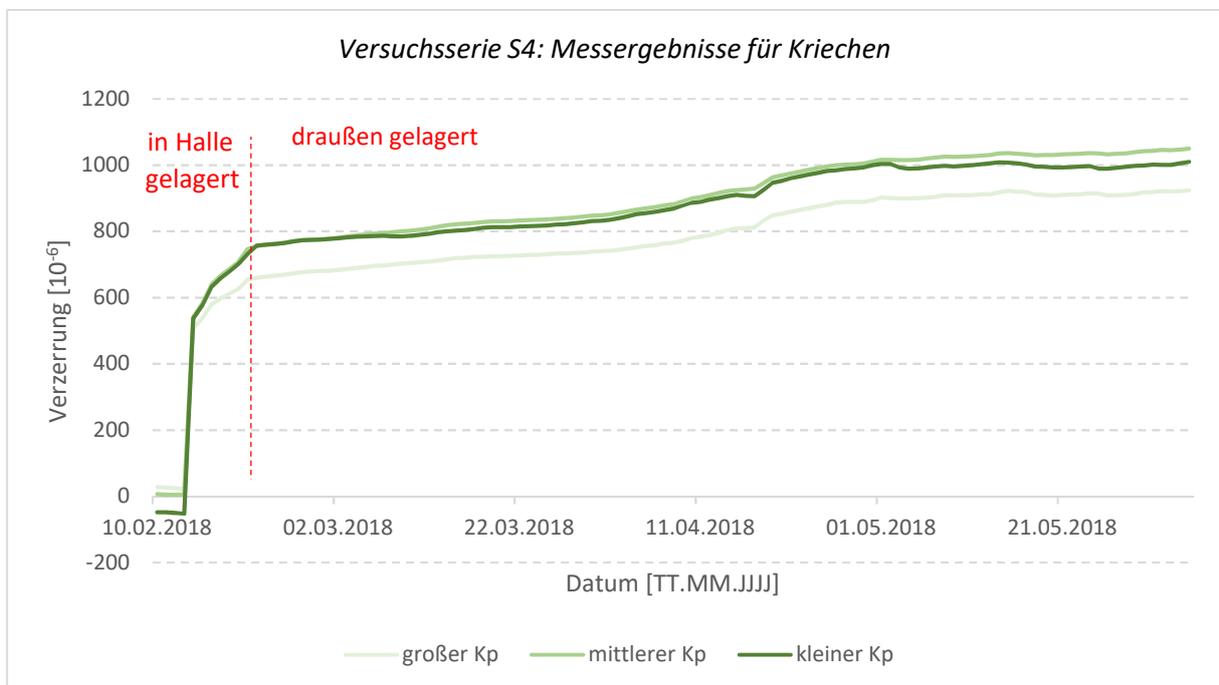


Bild 3.38: Die elastische Verzerrung und Kriechstauchung nach den Messwerten; Serie S4

Die gemessenen Verzerrungen der Betonkörper der Serie S4 sind im Anhang B beinhalten.

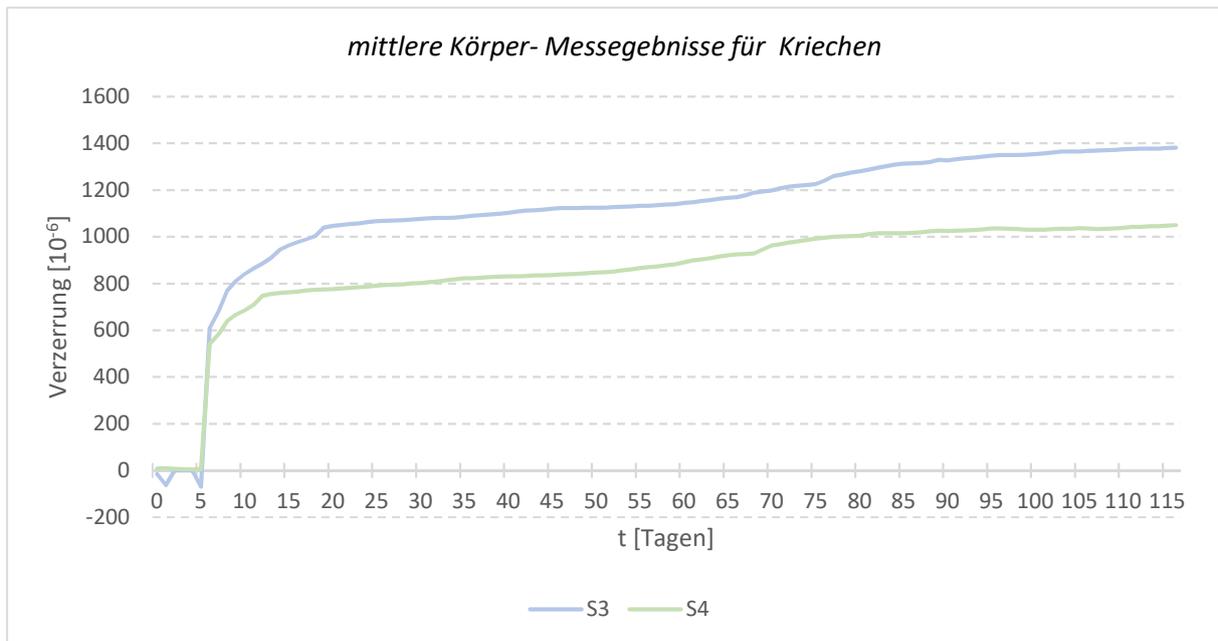


Bild 3.39: Vergleich der Verzerrungen des Kriechens in dem mittleren Körper (mit 500x500 [mm] Querschnitt) von Serie S3 und Serie S4

Bild 3.39 zeigt, dass der Verlauf des Kriechens bei der Versuchsserie S3 und Versuchsserie S4 ganz ähnlich ist. Der bei der Serie S3 verwendete Beton hat einen kleineren Elastizitätsmodul, wodurch nach Gleichung (2.5) eine größere elastische Dehnung bei näherungsweise gleicher Spannung entsteht. Der Versuchsserie S3 und S4 wurden nicht aus dem gleichen Beton gemacht, die dann die Eigenschaften des Betons wie Elastizitätsmodul beeinflusste.

4. Theoretische Modelle des Kriechens und Schwindens des Betons

4.1. Einleitung

Die Ergebnisse des Experiments, wurden mit folgenden Modellen, nach:

- Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken – Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau (weilers auch als Eurocode 2, oder EN 1992-1-1 genannt);
- fib Model für Betonkonstruktionen 2010 (weilers auch als Model Code 2010 oder als MC 2010 genannt);
- dem RILEM Modell B4 (weilers auch als Modell B4 genannt)

ausgewertet.

4.1.1. Eurocode

Im Jahr 1990 beschloss die Kommission der Europäischen Union, die Mitgliedstaaten der Europäischen Union (EU), die Europäische Freihandelsassoziation (EFTA), und die europäische Normungsorganisation (CEN) die Ausarbeitung der Eurocodes, um ihnen künftig den Status europäischer Normen zu geben.

Die Eurocodes wurden durch die europäische Normungsorganisation, das technische Komitee CEN/TC 250 „Structural Eurocodes“ ausgearbeitet und für jeden Teilbereich wurde ein eigenes Subkomitee gegründet. Die erste Generation der Eurocodes wurde ab Mitte der 1990er-Jahre als europäische Vornorm (ENV) gefertigt und im Jahr 2003 wurden die ersten Teile herausgegeben.

Die Mitgliedsländer der EU und EFTA betrachten die Eurocodes als Bezugsdokumente für folgende Zwecke:

- als Mittel zum Nachweis der Übereinstimmung der Hoch- und Ingenieurbauten mit den wesentlichen Anforderungen
- als Grundlage für die Spezifizierung von Verträgen für die Ausführung von Bauwerken und dazu erforderlichen Ingenieurleistungen
- als Rahmenbedingung für die Herstellung harmonisierter, technischer Spezifikationen für Bauprodukte

4.1.2. fib Model Code für Betonkonstruktionen 2010

Im Jahr 1953 wurde das Euro-Internationale Beton-Komitee (CEB- Comité Euro-Internationale du Béton) begründet, um eine harmonisierte Europäische Norm auf wissenschaftlicher Grundlage zu erstellen. Während der Ausarbeitung dieser Norm hat die europäische Normungsorganisation (CEN) mit einem anderen großen internationalen Verband, FIP (Fédération Internationale de la Précontrainte) zusammengearbeitet um die Norm zu erstellen.

Wichtigste Meilensteine waren:

1964: 1. CEB Internationale Empfehlungen für Stahlbeton

1970: CEB/FIP Internationale Empfehlungen für Stahlbeton und Spannbeton

1978: 1. CEB/FIP Model Code

1990: 2. CEB/FIP Model Code

Das zweite CEB/FIP Modell (Model Code 1990) gilt als das wichtigste Referenzdokument für den aktuellen Eurocode 2 (Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken).

Im Jahr 1998 wurde Fib (fédération international du béton) gegründet, durch die Vereinigung von CEB und FIP, und im Jahr 2010 wurde die erste vollständige Fassung des fib Model Code 2010 publiziert (Model Code 2010).

4.1.3. RILEM Modell B4

Modell B4 ist das weiterentwickelte Modell von dem RILEM Modell B3 (weilers als Modell B3 genannt). Modell B3 und B4 wurden von dem gleichen Wissenschaftler, Z. P. Bazant ausgearbeitet, und schon Modell B3 zeigt mit den Versuchsergebnissen eine so gute Übereinstimmung wie kein anderes Modell vorher [21]. Bei dem Modell B4 wurde das B3 Modell weiterentwickelt, um in erster Linie die Berücksichtigung des autogenen Schwindens zu verbessern [22]. Modell B4 verwendet die gleiche allgemeine Form der Kriechfunktion und des Schwindens, aber Modell B4 benutzt unterschiedliche empirische Formeln für die Abschätzung von Parametern basierend auf der Zusammensetzung der Betonmischung, der Größe und Form des Bauteils, der Aushärtung und den Umgebungsbedingungen.

4.2. Eurocode 2: Teil 1-1 (EN 1992-1-1)

4.2.1. Schwinden nach EN 1992-1-1

Die Gesamtschwinddehnung im Eurocode setzt sich aus zwei Komponenten zusammen: die Trocknungsschwinddehnung und die autogene Schwinddehnung. Die Gesamtschwinddehnung ε_{cs} ergibt sich nach Gleichung (4.2.1).

$$\varepsilon_{cs} = \varepsilon_{cd} + \varepsilon_{ca} \quad (4.2.1)$$

Dabei ist

ε_{cs}	die Gesamtschwinddehnung;
ε_{cd}	die Trocknungsschwinddehnung des Betons;
ε_{ca}	die autogene Schwinddehnung.

Trocknungsschwinddehnung

Der Endwert der Trocknungsschwinddehnung ergibt sich nach Gleichung (4.2.2).

$$\varepsilon_{cd,\infty} = k_h \cdot \varepsilon_{cd,0} \quad (4.2.2)$$

Dabei ist

$\varepsilon_{cd,0}$	der Grundwert des Trocknungsschwindens;								
$\varepsilon_{cd,\infty}$	die Trocknungsschwinddehnung des Betons zum Zeitpunkt „ ∞ “, grafisch im Bild 4.2.1 und im Bild 4.2.2 dargestellt;								
k_h	ein von der wirksamen Querschnittsdicke h_0 abhängiger Koeffizient;								
	<table> <tr> <td>$k_h=1,0$</td> <td>für $h_0= 100$ [mm]</td> </tr> <tr> <td>$k_h=0,85$</td> <td>für $h_0= 200$ [mm]</td> </tr> <tr> <td>$k_h=0,75$</td> <td>für $h_0= 300$ [mm]</td> </tr> <tr> <td>$k_h=0,70$</td> <td>für $h_0 \geq 500$ [mm]</td> </tr> </table>	$k_h=1,0$	für $h_0= 100$ [mm]	$k_h=0,85$	für $h_0= 200$ [mm]	$k_h=0,75$	für $h_0= 300$ [mm]	$k_h=0,70$	für $h_0 \geq 500$ [mm]
$k_h=1,0$	für $h_0= 100$ [mm]								
$k_h=0,85$	für $h_0= 200$ [mm]								
$k_h=0,75$	für $h_0= 300$ [mm]								
$k_h=0,70$	für $h_0 \geq 500$ [mm]								
h_0	die wirksame Querschnittsdicke [mm] nach Gleichung (4.2.3).								

$$h_0 = 2 \cdot \frac{A_c}{u} \quad (4.2.3)$$

Dabei ist

A_c	die Betonquerschnittsfläche;
u	die Umfangslänge der dem Trocknen ausgesetzten Querschnittsflächen.

Der Grundwert des Trocknungsschwindens $\varepsilon_{cd,0}$ lässt sich wie folgt ermitteln:

$$\varepsilon_{cd,0} = 0,85 \left[(220 + 110 \cdot \alpha_{ds1}) \cdot \exp(-\alpha_{ds2} \cdot \frac{f_{cm}}{f_{cm0}}) \right] \cdot 10^{-6} \cdot \beta_{RH} \quad (4.2.4)$$

$$\beta_{RH} = 1,55 \cdot \left[1 - \left(\frac{RH}{RH_0} \right)^3 \right] \quad (4.2.5)$$

Dabei ist

f_{cm} die mittlere Zylinderdruckfestigkeit des Betons [N/mm²], nach Tabelle 4.2.1; $=f_{ck} + 8$ [N/mm²];

$f_{cm0} = 10$ [N/mm²];

α_{ds1} ein Beiwert zur Berücksichtigung der Zementart:

$\alpha_{ds1} = 3$ für Zemente der Klasse S,

$\alpha_{ds1} = 4$ für Zemente der Klasse N,

$\alpha_{ds1} = 6$ für Zemente der Klasse R;

α_{ds2} ein Beiwert zur Berücksichtigung der Zementart:

$\alpha_{ds2} = 0,13$ für Zemente der Klasse S,

$\alpha_{ds2} = 0,12$ für Zemente der Klasse N,

$\alpha_{ds2} = 0,11$ für Zemente der Klasse R;

β_{RH} ein Beiwert, der die relative Luftfeuchte der Umgebung berücksichtigt, grafisch im Bild 4.2.3 dargestellt;

RH die relative Luftfeuchte der Umgebung [%];

$RH_0 = 100$ [%].

Betonklasse	f_{cm} [N/mm ²]		Betonklasse	f_{cm} [N/mm ²]		Betonklasse	f_{cm} [N/mm ²]
C16/20	24		C40/50	48		C70/85	78
C20/25	28		C45/55	53		C80/95	88
C25/30	33		C50/60	58		C90/105	98
C30/37	38		C55/67	63			
C35/45	43		C60/75	68			

Tabelle 4.2.1: mittlere Druckfestigkeiten für verschiedene Betonklasse; ; $f_{cm} = f_{ck} + 8$ [N/mm²]

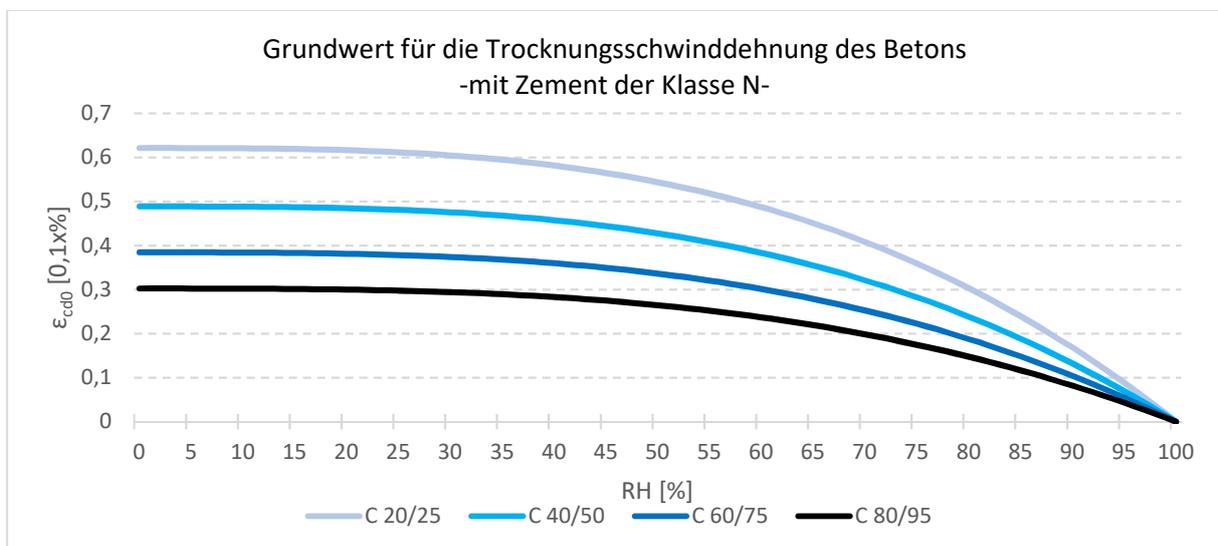


Bild 4.2.1: Grundwert für die Trocknungsschwinddehnung

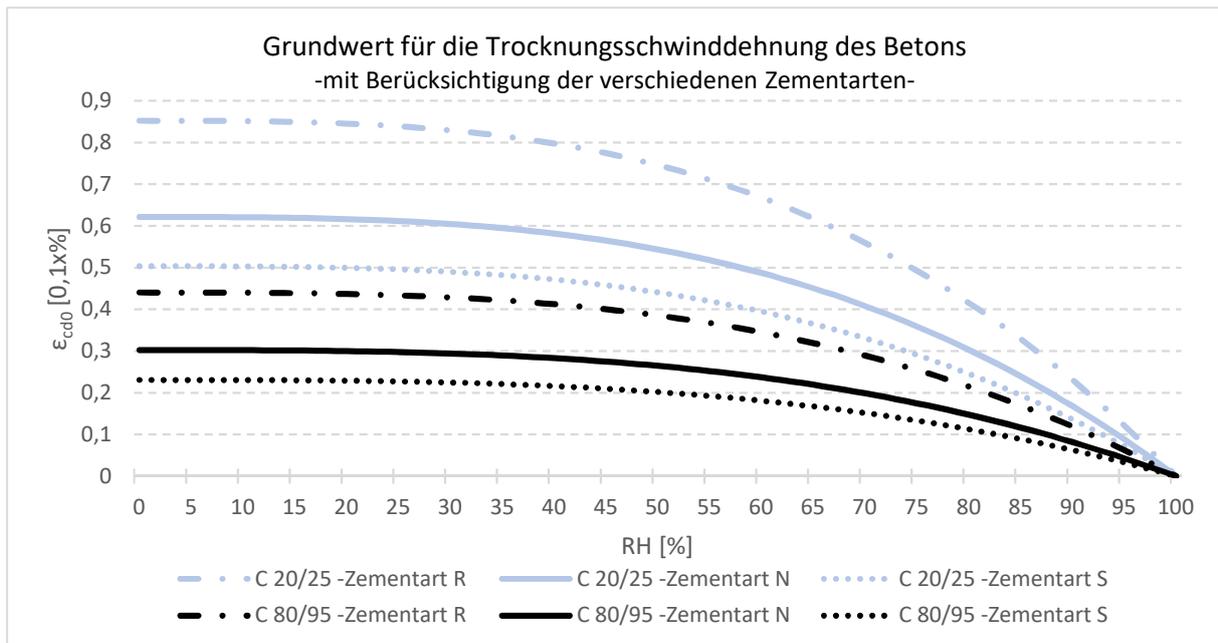


Bild 4.2.2: Grundwert für die Trocknungsschwinddehnung

Bild 4.2.1 und Bild 4.2.2 zeigen, dass der Grundwert des Schwindens mit steigender Festigkeitsklasse abnimmt. Der Grundwert des Schwindens ist am größten für Zemente der Klasse R und ist am niedrigsten für Zemente der Klasse S.

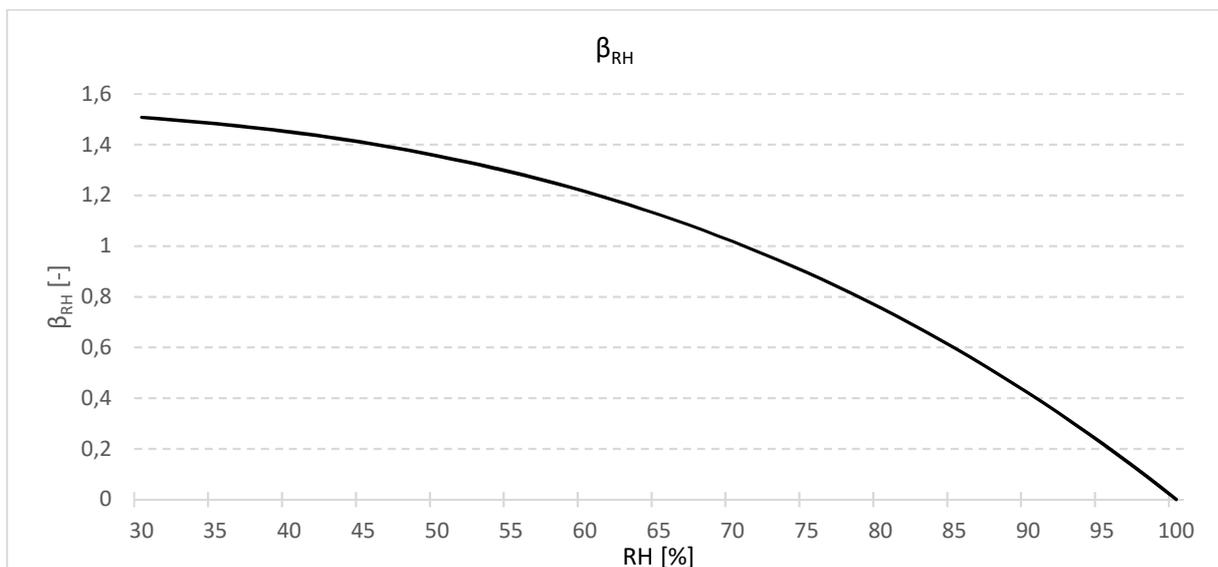


Bild 4.2.3: der Beiwert, β_{RH} , in Abhängigkeit der relative Luftfeuchte

Bild 4.2.3 zeigt, dass der Wert β_{RH} mit steigender relativen Luftfeuchte kleiner wird. Bei einer relativen Luftfeuchte von 100 [%] ist der Wert von β_{RH} gleich 0.

Die zeitabhängige Entwicklung der Trocknungsschwinddehnung kann nach Gleichung (4.2.6) berechnet werden:

$$\varepsilon_{cd}(t) = \beta_{ds}(t, t_s) \cdot k_h \cdot \varepsilon_{cd,0} \quad (4.2.6)$$

$$\beta_{ds}(t, t_s) = \frac{(t-t_s)}{(t-t_s)+0,04 \cdot \sqrt{h_0^3}} \quad (4.2.7)$$

Dabei ist

- $\beta_{ds}(t, t_s)$ eine Zeitfunktion, die grafisch im Bild 4.2.4 und im Bild 4.2.5 dargestellt ist;
- t das Alter des Betons in Tagen zum betrachteten Zeitpunkt;
- t_s das Alter des Betons in Tagen zu Beginn des Trocknungsschwindens (oder des Quellens). Normalerweise das Alter am Ende der Nachbehandlung;
- h_0 die wirksame Querschnittsdicke (mm) nach Gleichung (4.2.3).

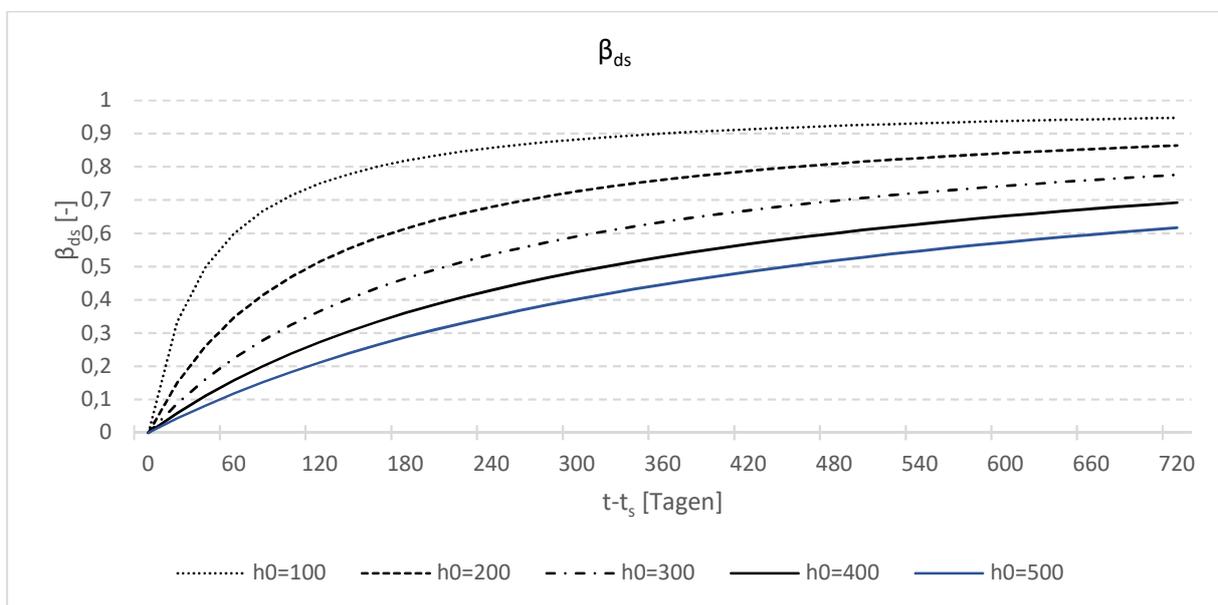


Bild 4.2.4: Werte für β_{ds} in einem Zeitraum von 2 Jahren

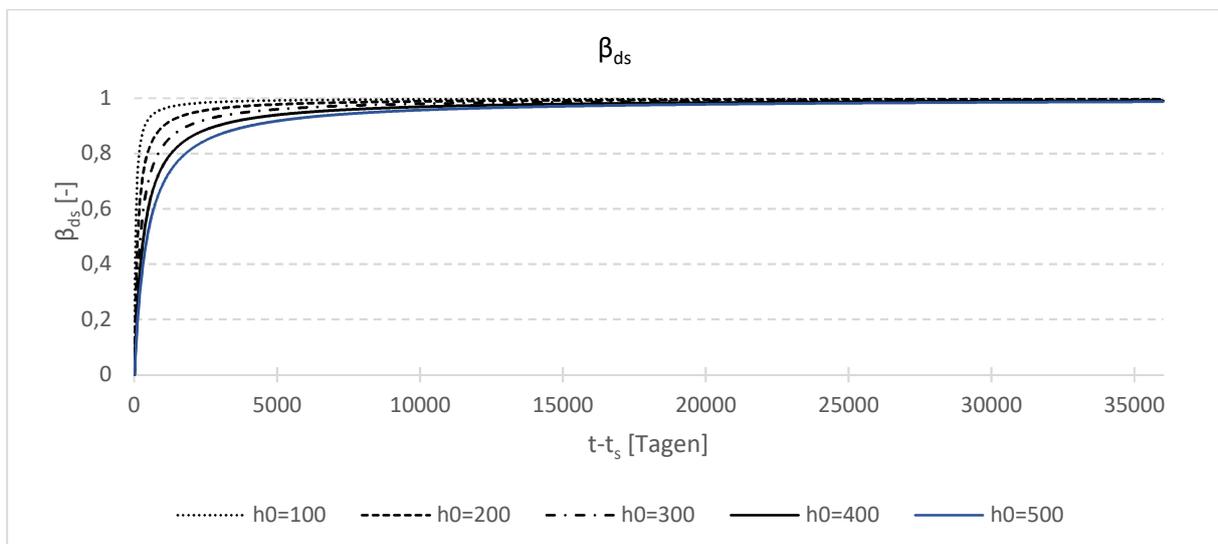


Bild 4.2.5: Werte für β_{ds} in einem Zeitraum von 100 Jahren

Bild 4.2.4 und Bild 4.2.5 zeigen, dass je dicker ein Bauteil ist, desto langsamer entwickeln sich die Schwindverzerrungen. Die Bilder zeigen auch, dass Trocknungsschwinden ein langsamer Prozess ist. Es dauert mehrere Jahre bis sich Trocknungsschwinden abwickelt.

Autogene Schwinddehnung

Die autogene Schwinddehnung folgt aus:

$$\varepsilon_{ca}(t) = \beta_{as}(t) \cdot \varepsilon_{ca}(\infty) \quad (4.2.8)$$

$$\varepsilon_{ca}(\infty) = 2,5 \cdot (f_{ck} - 10) \cdot 10^{-6} \quad (4.2.9)$$

$$\beta_{as}(t) = 1 - e^{-0,2 \cdot \sqrt{t}} \quad (4.2.10)$$

Dabei ist

$\varepsilon_{ca}(t)$	autogene Schwinddehnung zum Zeitpunkt „t“;
$\varepsilon_{ca}(\infty)$	autogene Schwinddehnung zum Zeitpunkt „∞“;
$\beta_{as}(t)$	eine Zeitfunktion, grafisch im Bild 4.2.6 dargestellt;
t	Alter des Betons in Tagen.

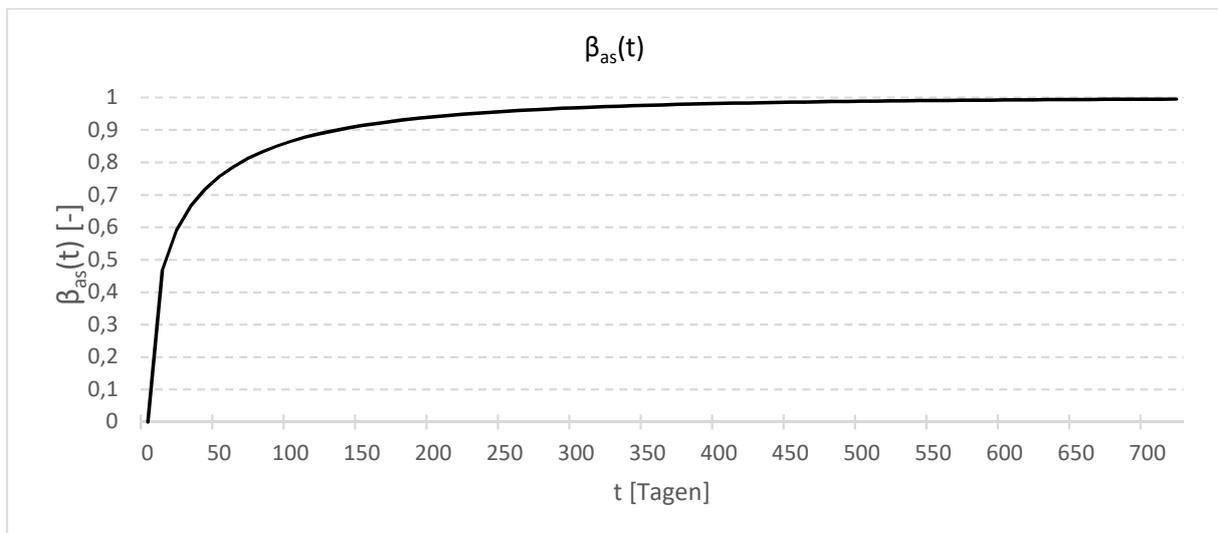


Bild 4.2.6: Werte für $\beta_{as}(t)$ in einem Zeitraum von 2 Jahren

4.2.2. Kriechen nach EN 1992-1-1

Die Kriechverformung von Beton $\varepsilon_{cc}(\infty, t_0)$ im Alter von $t = \infty$ und $t = \text{beliebig}$ bei konstanter Druckspannung σ_c , aufgebracht im Betonalter t_0 , darf mit Gleichung (4.2.11) berechnet werden:

$$\varepsilon_{cc}(\infty, t_0) = \varphi(\infty, t_0) \cdot \frac{\sigma_c}{E_c} \quad (4.2.11-1)$$

$$\varepsilon_{cc}(t, t_0) = \varphi(t, t_0) \cdot \frac{\sigma_c}{E_c} \quad (4.2.11-2)$$

Wenn die Betondruckspannung im Alter t_0 den Wert $0,45 f_{ck}(t_0)$ übersteigt, ist in der Regel die Nichtlinearität des Kriechens zu berücksichtigen. Diese hohen Spannungen können durch Vorspannung mit sofortigem Verbund entstehen, z. B. bei Fertigteilen im Bereich der Spannglieder. In diesen Fällen darf die nichtlineare rechnerische Kriechzahl wie folgt nach Gleichung (4.2.12) ermittelt werden:

$$\varphi_{nl}(\infty, t_0) = \varphi(\infty, t_0) \cdot e^{1,5 \cdot (k_\sigma - 0,45)} \quad (4.2.12)$$

Dabei ist

- φ_{nl} die nichtlineare rechnerische Kriechzahl;
- k_σ das Spannungs-Festigkeitsverhältnis $\sigma_c / f_{ck}(t_0)$, wobei σ_c die Druckspannung ist und $f_{ck}(t_0)$ der charakteristische Wert der Betondruckfestigkeit zum Zeitpunkt der Belastung.

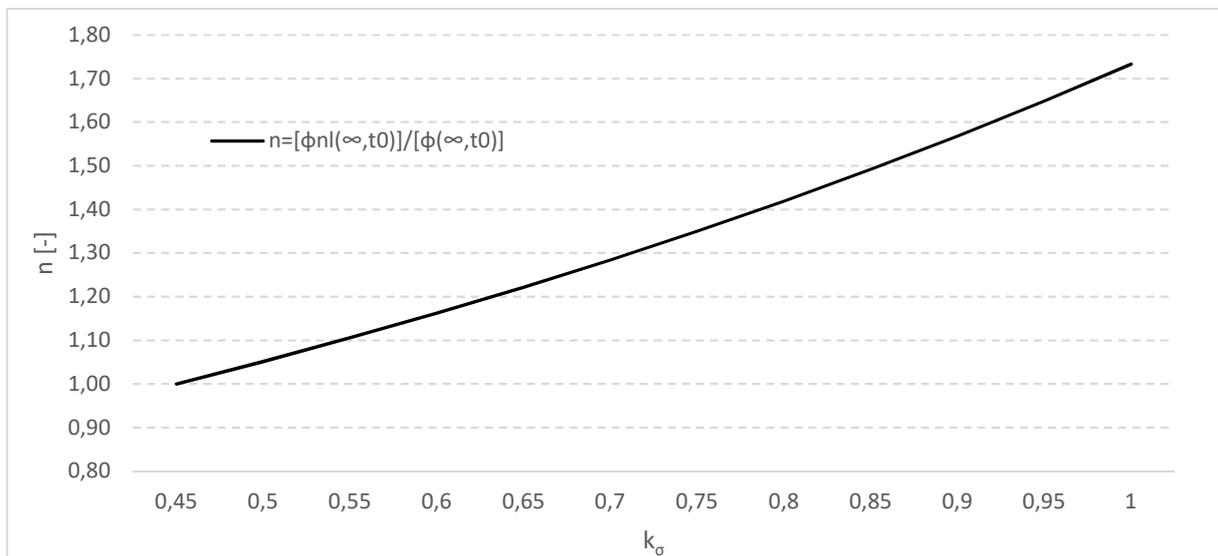


Bild 4.2.7: Zu dem nichtlinearen Kriechen gehörender Multiplikator

Die Kriechzahl $\varphi(t, t_0)$ darf wie folgt ermittelt werden:

$$\varphi(t, t_0) = \varphi_0 \cdot \beta_c(t, t_0) \quad (4.2.13)$$

$$\varphi_0 = \varphi_{RH} \cdot \beta(f_{cm}) \cdot \beta(t_0) \quad (4.2.14)$$

Dabei ist

- φ_0 die Grundzahl des Kriechens, grafisch im Bild 4.2.8 und im Bild 4.2.9 dargestellt;
- $\beta_c(t, t_0)$ ein Beiwert zur Beschreibung der zeitlichen Entwicklung des Kriechens nach Belastungsbeginn, grafisch im Bild 4.2.14 dargestellt;

φ_{RH} ist ein Beiwert zur Berücksichtigung der Auswirkungen der relativen Luftfeuchte auf die Grundzahl des Kriechens, grafisch im Bild 4.2.10 dargestellt;

$\beta(f_{cm})$ ein Beiwert zur Berücksichtigung der Betondruckfestigkeit, grafisch im Bild 4.2.11 dargestellt;

$\beta(t_0)$ ein Beiwert zur Berücksichtigung der Auswirkungen des Betonalters bei Belastungsbeginn auf die Grundzahl des Kriechens, grafisch im Bild 4.2.12 dargestellt;

t das Betonalter zum betrachteten Zeitpunkt in Tagen;

t_0 das tatsächliche Betonalter bei Belastungsbeginn in Tagen.

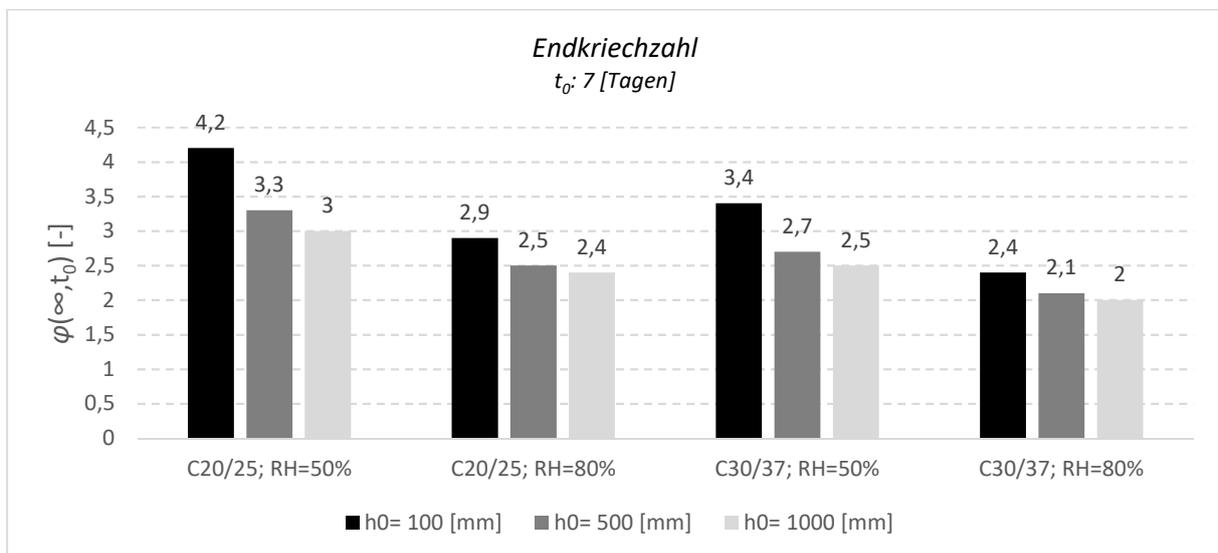


Bild 4.2.8: Endkriechzahl des Kriechens mit Belastungsbeginn mit Betonalter von 7 Tagen

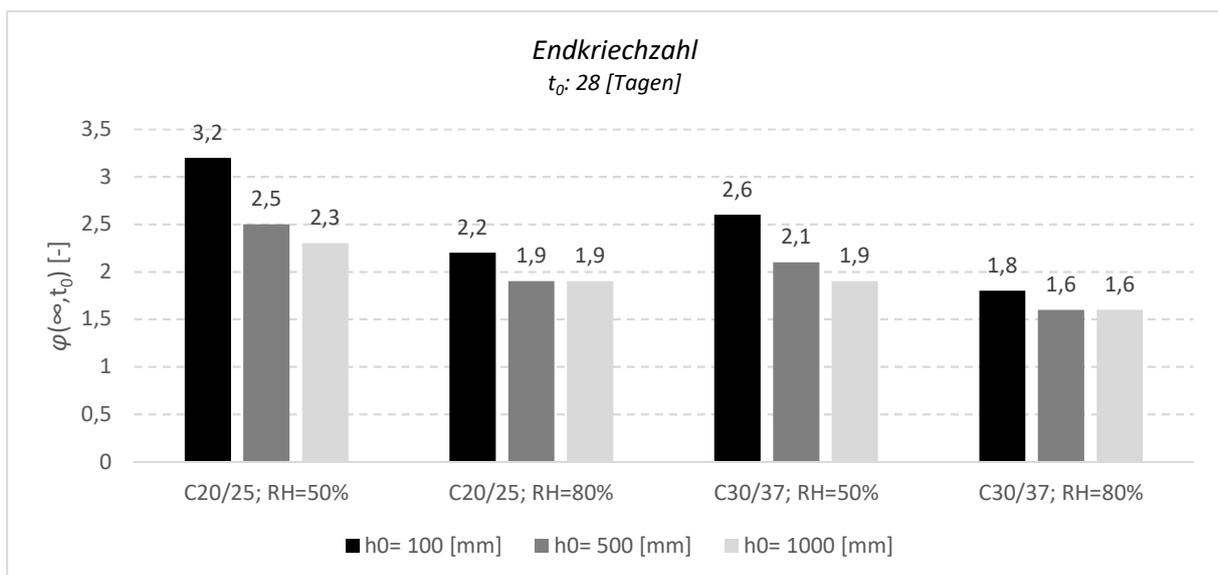


Bild 4.2.9: Endkriechzahl des Kriechens mit Belastungsbeginn mit Betonalter von 28 Tagen

$$\varphi_{RH} = 1 + \frac{1 - \frac{RH}{100}}{0,1 \cdot \sqrt[3]{h_0}} \quad \text{für} \quad f_{cm} \leq 35 \text{ N/mm}^2 \quad (4.2.15)$$

$$\varphi_{RH} = \left[1 + \frac{1 - \frac{RH}{100}}{0,1 \cdot \sqrt[3]{h_0}} \cdot \alpha_1 \right] \cdot \alpha_2 \quad \text{für} \quad f_{cm} > 35 \text{ N/mm}^2 \quad (4.2.16)$$

Dabei ist

- RH die relative Luftfeuchte der Umgebung in [%];
 α_1 Beiwert zur Berücksichtigung des Einflusses der Betondruckfestigkeit, nach Gleichung (4.2.17);
 α_2 Beiwert zur Berücksichtigung des Einflusses der Betondruckfestigkeit nach Gleichung (4.2.18);
 h_0 die wirksame Bauteildicke in [mm] nach Gleichung (4.2.3).

$$\alpha_1 = \left(\frac{35}{f_{cm}} \right)^{0,7} \quad (4.2.17)$$

$$\alpha_2 = \left(\frac{35}{f_{cm}} \right)^{0,2} \quad (4.2.18)$$

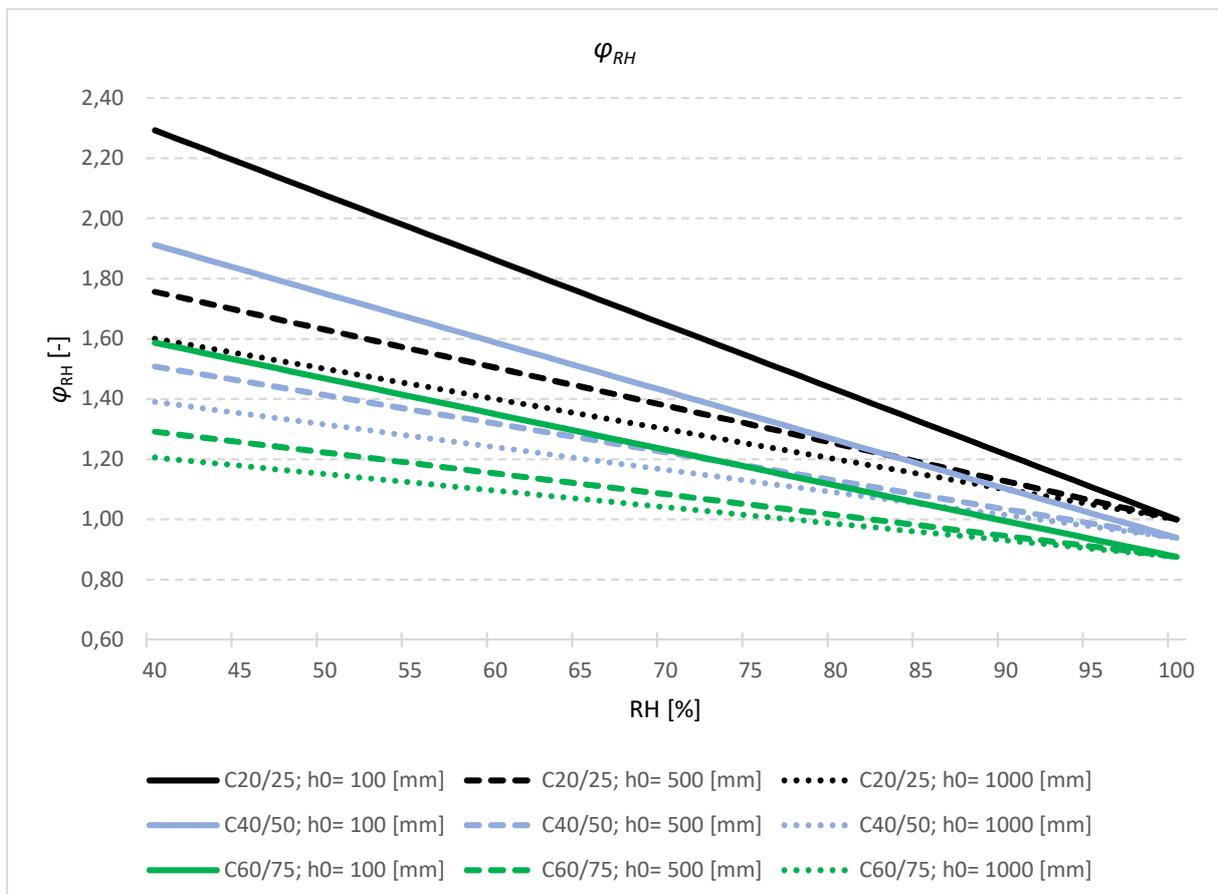


Bild 4.2.10: φ_{RH} Werte für verschiedene Betonklassen mit verschiedenen wirksamen Querschnittsdicken in Abhängigkeit der relativen Luftfeuchtigkeit

Bild 4.2.10 zeigt, dass es eine lineare Beziehung zwischen der relativen Luftfeuchte und φ_{RH} gibt. Je dicker ein Bauteil ist, desto kleiner ist φ_{RH} . Mit steigender Betonfestigkeit wird φ_{RH} kleiner.

$$\beta(f_{cm}) = \frac{16,8}{\sqrt{f_{cm}}} \quad (4.2.19)$$

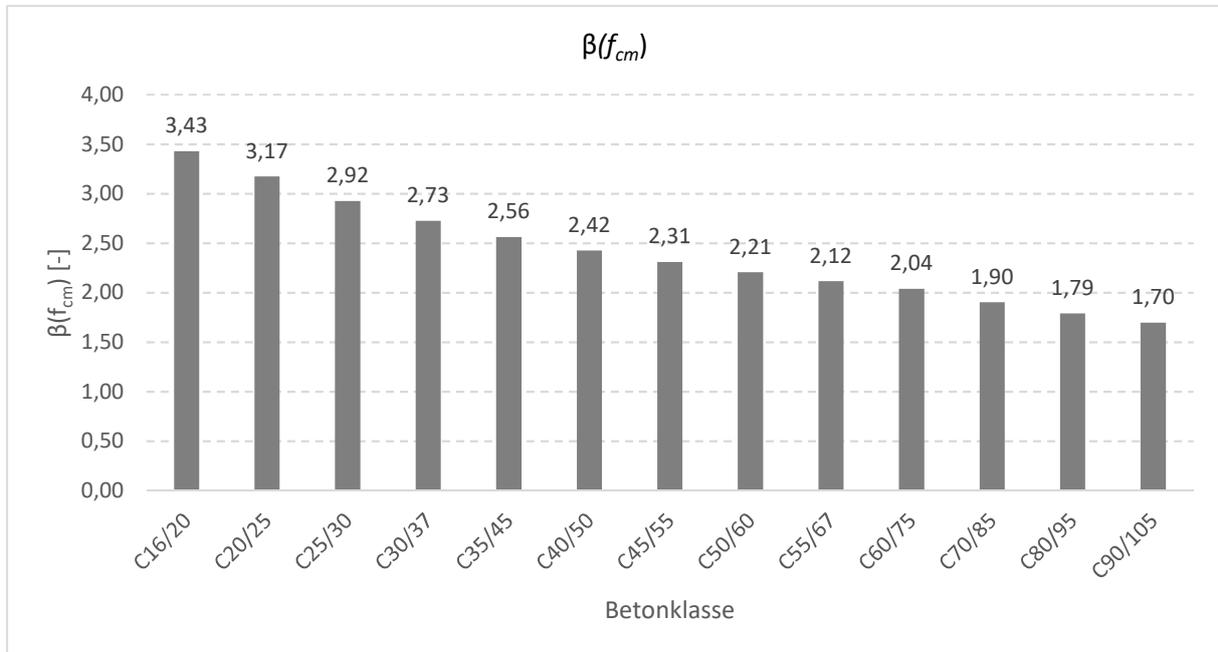


Bild 4.2.11: $\beta(f_{cm})$ Werte für verschiedene Betonklassen

$$\beta(t_0) = \frac{1}{(0,1+t_0^{0,2})} \quad (4.2.20)$$

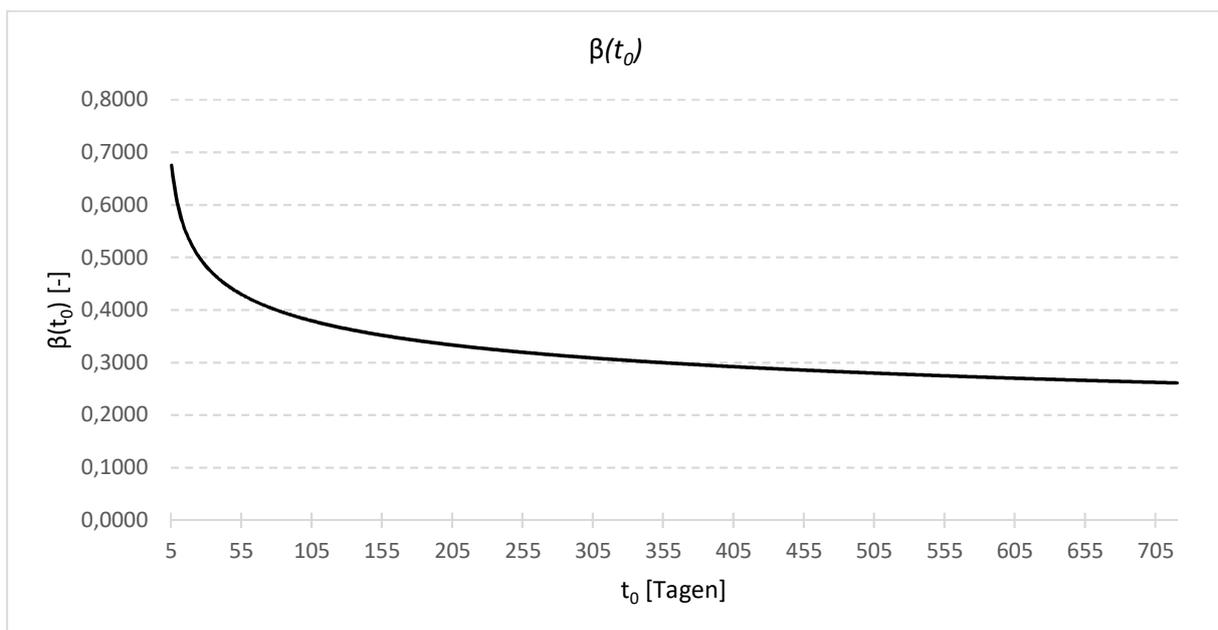


Bild 4.2.12: $\beta(t_0)$ Werte

$$\beta_c(t, t_0) = \left[\frac{t-t_0}{\beta_H+t-t_0} \right]^{0,3} \quad (4.2.21)$$

Dabei ist:

β_H ein Beiwert zur Berücksichtigung der relativen Luftfeuchte (RH in [%])

für $f_{cm} \leq 35$ [N/mm²]:

$$\beta_H = 1,5 \cdot [1 + (0,012 \cdot RH)^{18}] \cdot h_0 + 250 \leq 1500 \quad (4.2.22)$$

für $f_{cm} \geq 35$ [N/mm²]:

$$\beta_H = 1,5 \cdot [1 + (0,012 \cdot RH)^{18}] \cdot h_0 + 250 \cdot \alpha_3 \leq 1500 \cdot \alpha_3 \quad (4.2.23)$$

$$\alpha_3 = \left(\frac{35}{f_{cm}} \right)^{0,5} \quad (4.2.24)$$

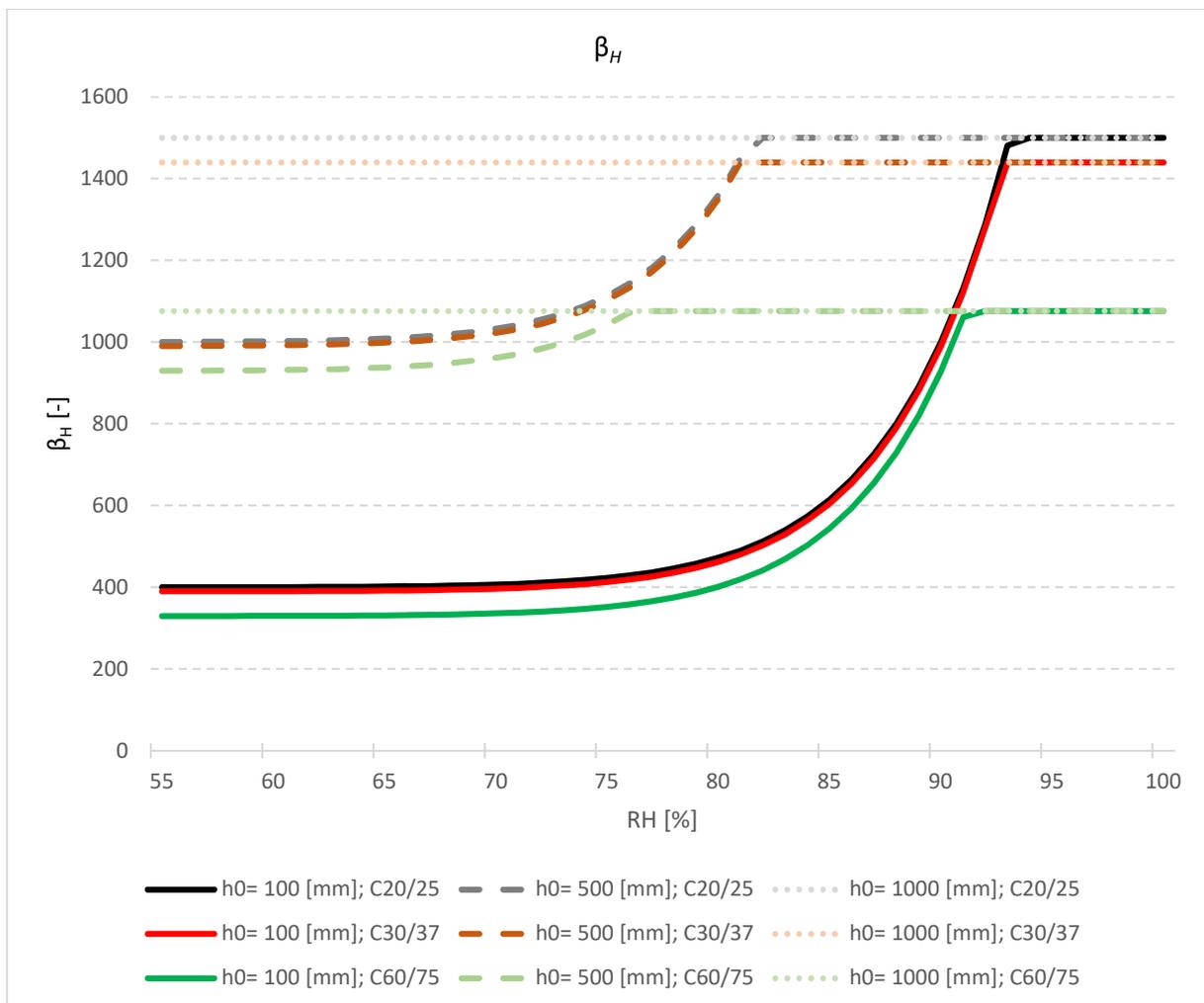


Bild 4.2.13: β_H Werte für verschiedene Betonklassen mit verschiedenen wirksamen Querschnittsdicken in Abhängigkeit der relativen Luftfeuchtigkeit

Bild 4.2.13 zeigt, dass der Wert von β_H sich am meisten im Bereich von ca. 75- 95 [%] der relativen Luftfeuchtigkeit ändert.

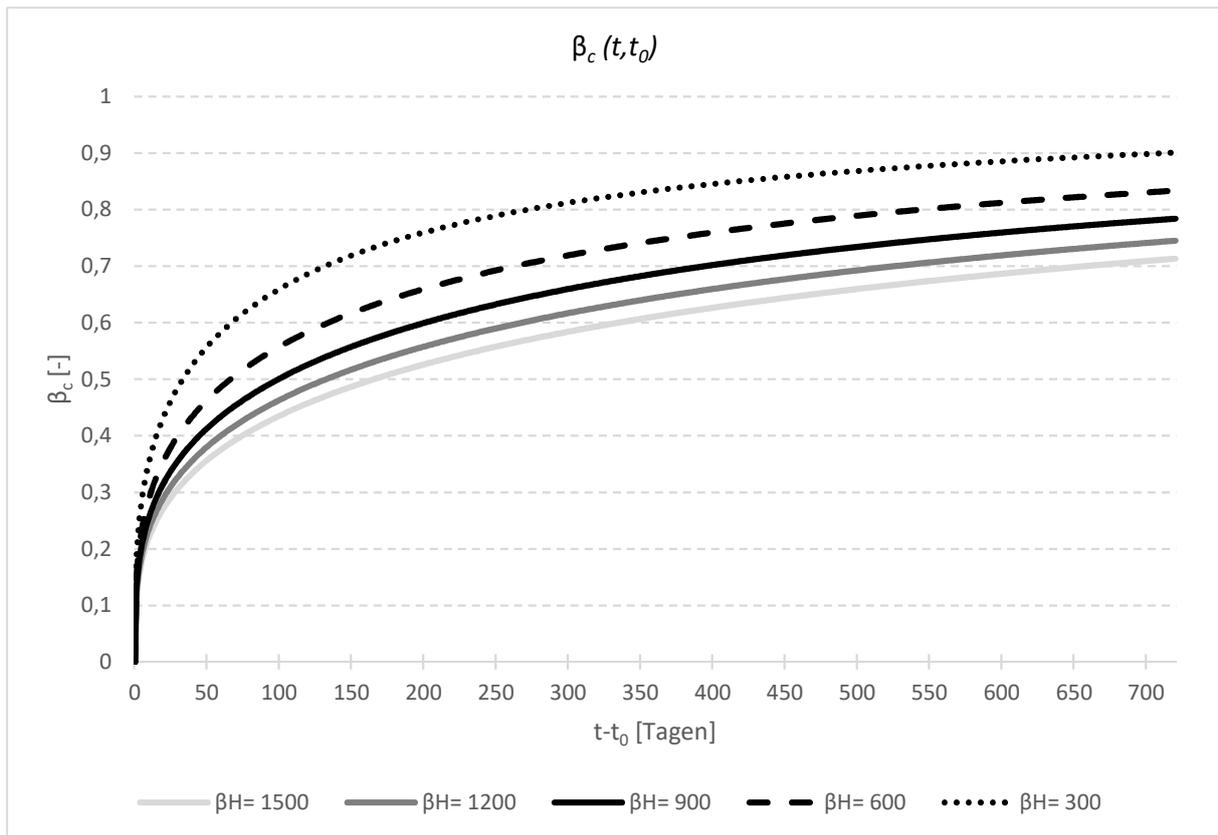


Bild 4.2.14: $\beta_c(t, t_0)$ Werte für verschiedene β_H Werte in Abhängigkeit der Belastungsdauer

Bild 4.2.14 zeigt, dass die Zeitfunktion $\beta_c(t, t_0)$ mit größeren β_H Werten kleiner wird.

4.2.3. Temperatureffekte nach EN 1992-1-1

4.2.3.1. Die Auswirkung von Zementart und Hydratationswärme

Die Auswirkungen der Zementart auf die Kriechzahl des Betons darf durch die Anpassung des Betonalters bei Belastungsbeginn t_0 in Gleichung (4.2.20) berücksichtigt werden. Der Wert t_0 darf wie folgt ermittelt werden:

$$t_0 = t_{0,T} \cdot \left(\frac{9}{2+t_{0,T}^{1,2}} + 1 \right)^\alpha \geq 0,5 \quad (4.2.25)$$

Dabei ist

$t_{0,T}$ das der Temperatur angepasste Betonalter bei Belastungsbeginn in Tagen, nach Gleichung (4.2.26);

α ein Exponent zur Berücksichtigung der Zementart

$\alpha = -1$ für Zemente der Klasse S,

$\alpha = 0$ für Zemente der Klasse N,

$\alpha = 1$ für Zemente der Klasse R.

Gleichung (4.2.25) ist in Bild 4.2.15 dargestellt.

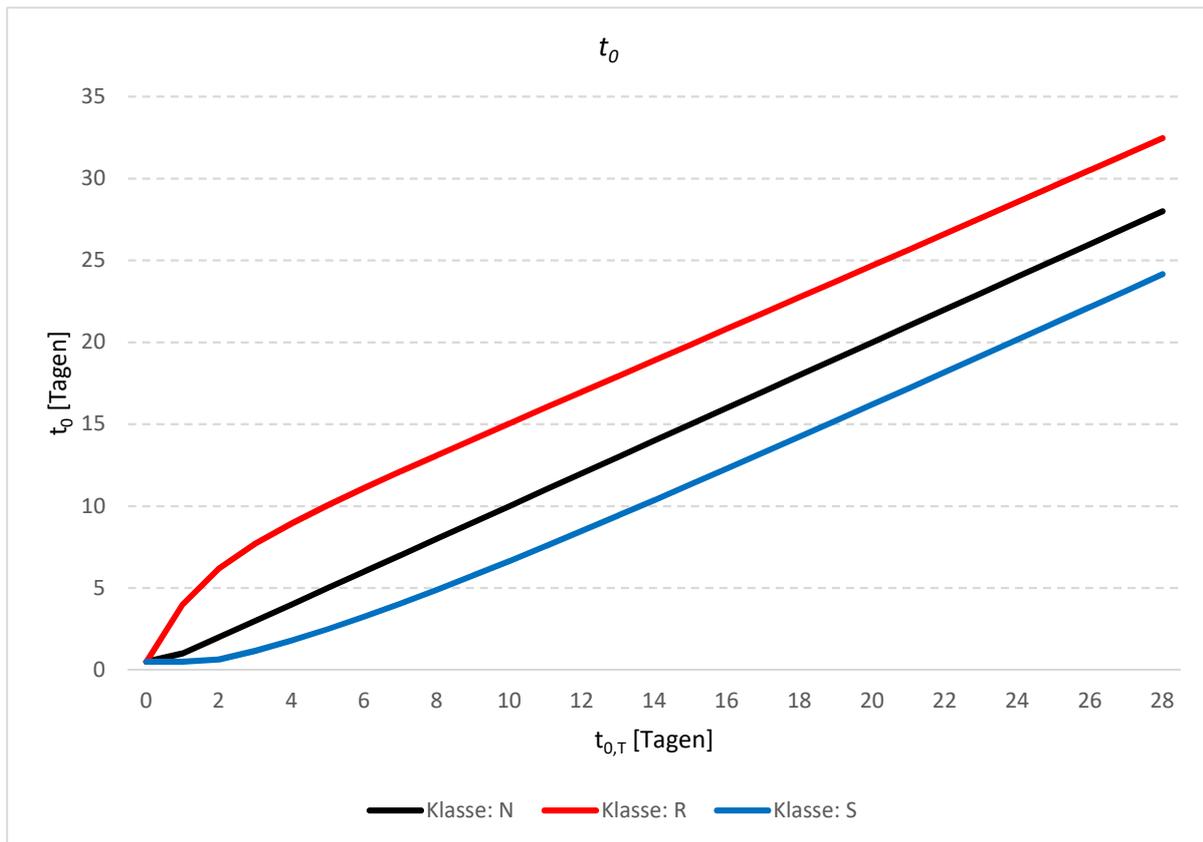


Bild 4.2.15: t_0 Werte für verschiedene Zementarten, in Abhängigkeit des temperaturangepassten Betonalters

Nach Bild 4.2.15 und Gleichung (4.2.25) modifiziert das temperaturangepasste Betonalter die Zementklasse N nicht.

4.2.3.2. Temperatureffekt auf die Reife des Betons:

Die Auswirkungen von erhöhten oder verminderten Temperaturen in einem Bereich von 0 [°C] bis 80 [°C] auf den Grad der Aushärtung des Betons dürfen durch die Anpassung des Betonalters wie folgt berücksichtigt werden:

$$t_T = \sum_{i=1}^n e^{-\left(\frac{4000}{273+T(\Delta t_i)} - 13,65\right)} \quad (4.2.26)$$

Dabei ist

- t_T das temperaturangepasste Betonalter;
- $T(\Delta t_i)$ die Temperatur in [°C] im Zeit-Intervall Δt_i ;
- Δt_i die Anzahl der Tage, an denen die Temperatur T vorherrscht.

Die Gleichung (4.2.26) ist in Bild 4.2.16 dargestellt.

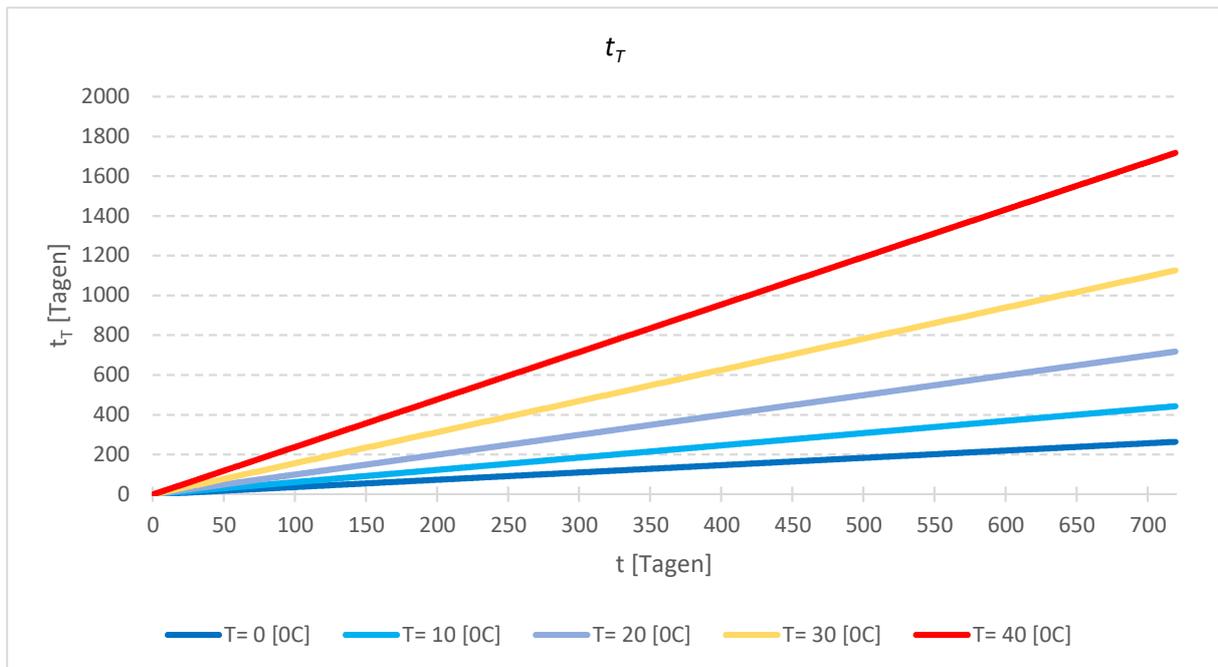


Bild 4.2.16: das temperaturangepasste Betonalter, für verschiedene konstante Temperaturen angenommen

Nach Gleichung (4.2.26) und Bild 4.2.16 wird das temperaturangepasste Betonalter mit höheren Temperaturen größer.

4.2.3.2.1. Anmerkung zu der Gleichung (4.2.26)

- Eurocode 2 empfiehlt das temperaturangepasste Betonalter bis Belastungsbeginn zu verwenden, aber Eurocode 2 schreibt nicht vor ob das temperaturangepasste Betonalter nur bis zum Belastungsbeginn verwendet kann.
- Die Gleichung (4.2.26) beruht auf der Arrhenius-Gleichung.

Die Arrhenius-Gleichung (nach Svante Arrhenius) beschreibt in der chemischen Kinetik die quantitative Abhängigkeit der Reaktionsgeschwindigkeitskonstante k von der Temperatur. Die Arrhenius Gleichung kann nach Gleichung (A-4.2.26-1) berechnet werden.

$$k = A \cdot e^{-\frac{E_A}{R \cdot T}} \quad (\text{A - 4.2.26-1})$$

Dabei ist

A	der präexponentielle Faktor oder Frequenzfaktor, entspricht nach der Stoßtheorie dem Produkt aus der Stoßzahl Z und dem Orientierungsfaktor P ;
E_A	die Aktivierungsenergie in [J/mol];
R	die allgemeine Gaskonstante;
T	absolute Temperatur in [K];

k die Reaktionsgeschwindigkeitskonstante.

Wendet man die Arrhenius-Gleichung an, so muss der Reifegrad des Betons nach Gleichung (A - 4.2.26-2) formuliert werden.

$$R_A = const \cdot \int_0^t e^{-\frac{Q}{R \cdot T}} \cdot dt \quad (A - 4.2.26-2)$$

Dabei ist

- T die Betontemperatur in [K];
- Q die Aktivierungsenergie für die Hydratation;
- R die allgemeine Gaskonstante.

Die Aktivierungsenergie hängt von der Zementart, Wassermenge, Zusatzmitteln und Zusatzstoffen ab. Die allgemeine Gaskonstante darf mit $8,3145 \left[\frac{J}{K \cdot mol} \right]$ angenommen, aber der genaue Wert der allgemeinen Gaskonstante hängt von der Art der Gasmoleküle ab.

4.2.4. Elastizitätsmodul nach EN 1992-1-1

Nach Eurocode 2, darf die zeitliche Abwicklung des Elastizitätsmoduls des Betons nach Gleichung (4.2.27) berücksichtigt werden.

$$E_{cm}(t) = \left(\frac{f_{cm}(t)}{f_{cm}} \right)^{0,3} \cdot E_{cm} \quad (4.2.27)$$

wobei $E_{cm}(t)$ und $f_{cm}(t)$ die Werte im Alter von t Tagen bzw. E_{cm} und f_{cm} die Werte im Alter von 28 Tagen sind.

Tabelle 4.2.2 enthält die Richtwerte für den Elastizitätsmodul E_{cm} (Sekantenwert zwischen $\sigma_c = 0$ und $0,4 f_{cm}$) für Betonsorten mit quarzhaltigen Gesteinskörnungen. Bei Kalkstein- und Sandsteingesteinskörnungen sollten die Werte um 10 % bzw. 30 % reduziert werden. Bei Basaltgesteinskörnungen sollte der Wert um 20 % erhöht werden.

Betonklasse	E_{cm} [N/mm ²]		Betonklasse	E_{cm} [N/mm ²]		Betonklasse	E_{cm} [N/mm ²]
C16/20	29 000		C40/50	35 000		C70/85	41 000
C20/25	30 000		C45/55	36 000		C80/95	42 000
C25/30	31 000		C50/60	37 000		C90/105	44 000
C30/37	33 000		C55/67	38 000			
C35/45	34 000		C60/75	39 000			

Tabelle 4.2.2: die Werte des Elastizitätsmoduls für verschiedene Betonklassen

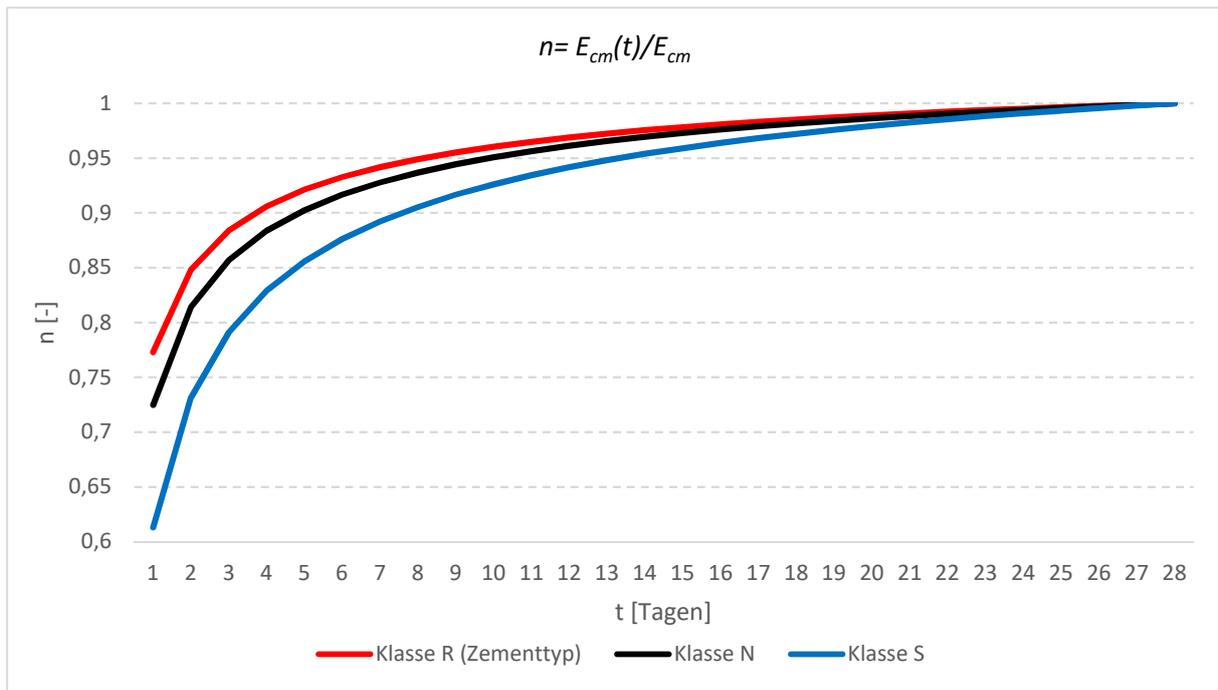


Bild 4.2.17: Der Quotient des Elastizitätsmoduls zum Zeitpunkt t innerhalb von 28 Tagen, und zum Zeitpunkt $t=28$ Tagen für verschiedene Zementarten

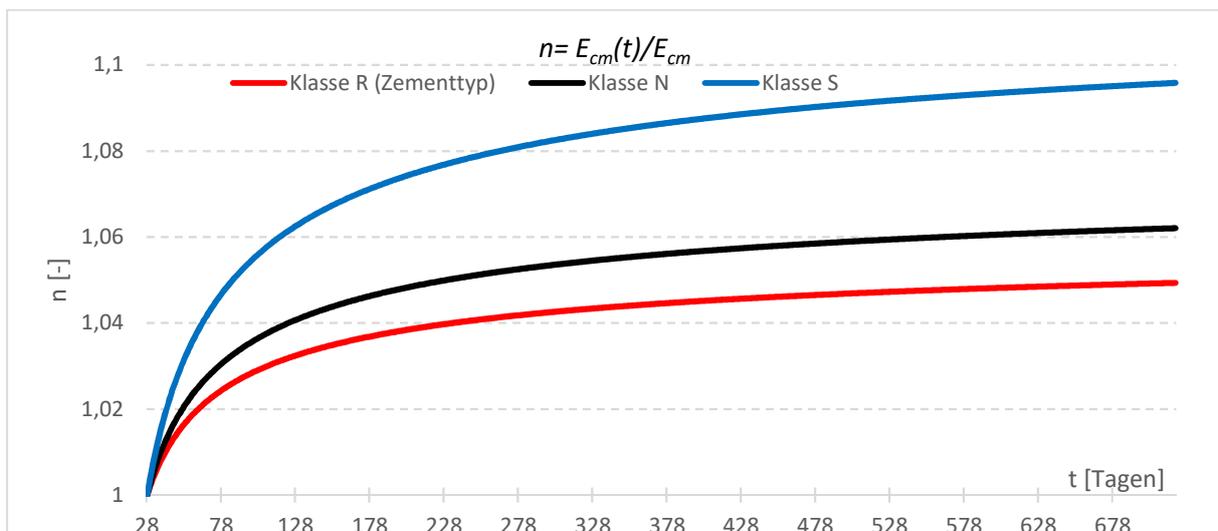


Bild 4.2.18: Der Quotient des Elastizitätsmoduls zum Zeitpunkt t nach 28 Tagen, und zum Zeitpunkt $t=28$ Tagen für verschiedene Zementarten

Die zeitliche Abwicklung der mittleren Betondruckfestigkeit wird nach Gleichung (4.2.28) - (4.2.29) berechnet.

$$f_{cm}(t) = \beta_{cc}(t) \cdot f_{cm} \quad (4.2.28)$$

$$\beta_{cc}(t) = e^{s[1-\sqrt{28/t}]} \quad (4.2.29)$$

Dabei ist

$f_{cm}(t)$ die mittlere Betondruckfestigkeit für ein Alter von t Tagen;

f_{cm} die mittlere Druckfestigkeit nach 28 Tagen;

- $\beta_{cc}(t)$ ein vom Alter des Betons t abhängiger Beiwert, grafisch im Bild 4.2.19 und im Bild 4.2.20 dargestellt;
- t das Alter des Betons in Tagen
- s ein vom verwendeten Zementtyp abhängiger Beiwert:
 = 0,20 für Zement der Festigkeitsklassen CEM 42,5 R, CEM 52,5 N und CEM 52,5 R (Klasse R),
 = 0,25 für Zement der Festigkeitsklassen CEM 32,5 R, CEM 42,5 N (Klasse N),
 = 0,38 für Zement der Festigkeitsklassen CEM 32,5 N (Klasse S).

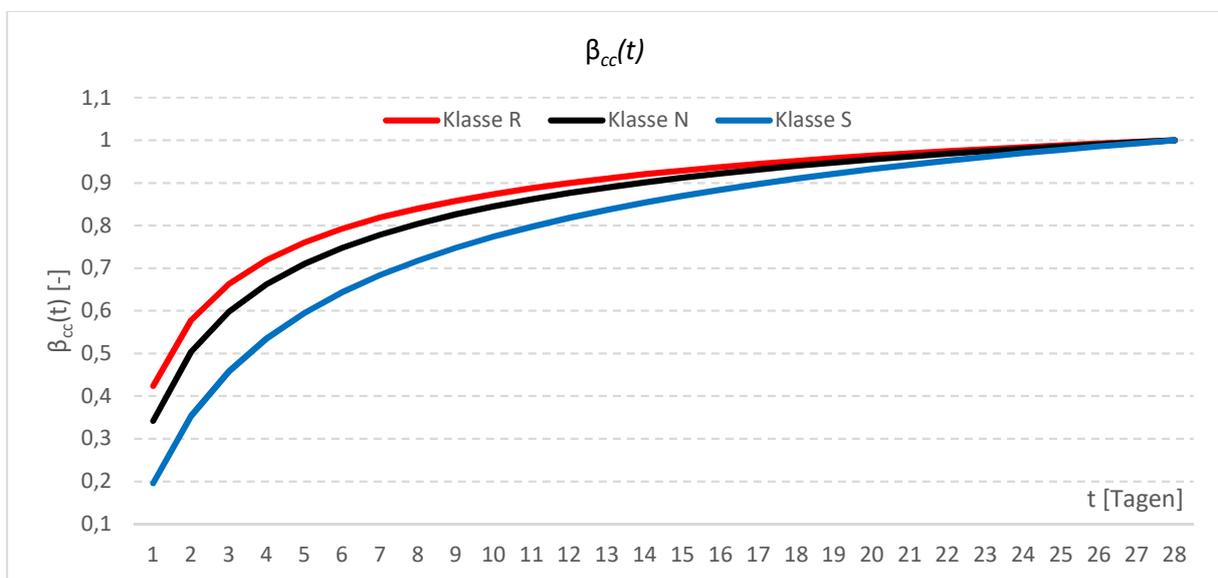


Bild 4.2.19: Zeitfunktion $\beta_{cc}(t)$ für verschiedene Zementarten in den ersten 28 Tagen

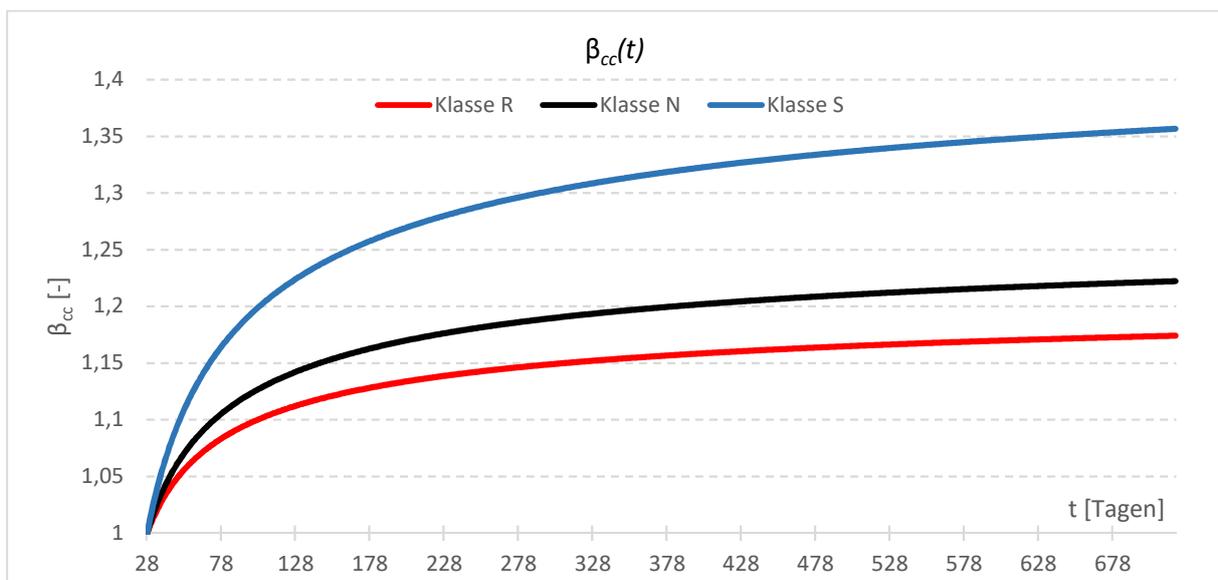


Bild 4.2.20: Zeitfunktion $\beta_{cc}(t)$ für verschiedene Zementarten nach den ersten 28 Tagen

4.2.5. Vergleich der Ergebnisse des Experiments mit EN 1992-1-1

4.2.5.1. Schwinden

Bild 4.2.21-4.2.22; und Bild C.1- C.4 (Bilder C.1- C.4 befinden sich im Anhang C):

Einfluss der mittleren Betondruckfestigkeit:

Die Maße des Schwindens nach EN 1992-1-1 hängen von der Betondruckfestigkeit ab, nach Gleichung (4.2.4) und (4.2.9). Die Betondruckfestigkeit wurde deswegen nach Eurocode (gestrichelte graue Linie), nach Tabelle 4.2.1; und auch nach den Laborergebnissen (durchgehende grau Linie), nach Kapitel 3.2.1 betrachtet. Die anderen Linien (schwarze Linie; rote Linie) berücksichtigten die mittlere Betondruckfestigkeit nach den Laborergebnissen.

Einfluss des temperaturangepassten Betonalters:

-die horizontale Skalierung der Schwindkurve-

Eurocode empfiehlt die Berücksichtigung des temperaturangepassten Betonalters nach Gleichung (4.2.26). Eurocode enthält die Gleichung (4.2.26) in Anhang B der Eurocode (Anhang B: Kriechen und Schwinden) bei dem Teil Kriechen, aber Eurocode 2 schreibt nicht vor ob das temperaturangepasste Betonalter nur für Kriechen, also für Schwinden nicht gilt. Eurocode 2 schreibt so (wortgleich):

Die Auswirkungen von erhöhten oder verminderten Temperaturen in einem Bereich von 0 °C bis 80 °C auf den Grad der Aushärtung des Betons dürfen durch die Anpassung des Betonalters wie folgt berücksichtigt werden.

Nach der Gleichung (4.2.26) wurde deswegen das temperaturangepasste Betonalter auch bei dem Schwinden des Betons berücksichtigt (schwarze und rote Linien).

Das temperaturangepasste Betonalter wurde nach Bild B.13 und Bild B.14, mit Tagesmittelwerten (rote Linie); oder mit einem zu der Messperiode gehörenden Mittelwert (schwarze Linie), nach Tabelle 3.3 berücksichtigt.

Die grauen Linien berücksichtigten das temperaturangepasste Betonalter nicht.

Einfluss der relativen Luftfeuchtigkeit:

Nach Eurocode beeinflusst die relative Luftfeuchte den Grundwert des Trocknungsschwindens nach Gleichung (4.2.4) - (4.2.5), deswegen wurde der Beiwert β_{RH} nach Gleichung (4.2.5), von dem Mittelwert der relativen Luftfeuchtigkeit über die ganze Messperiode, nach Gleichung (3.4) berechnet ($RH_{M,S3}=62,17$ [%]; $RH_{M,S4}=63,22$ [%]).

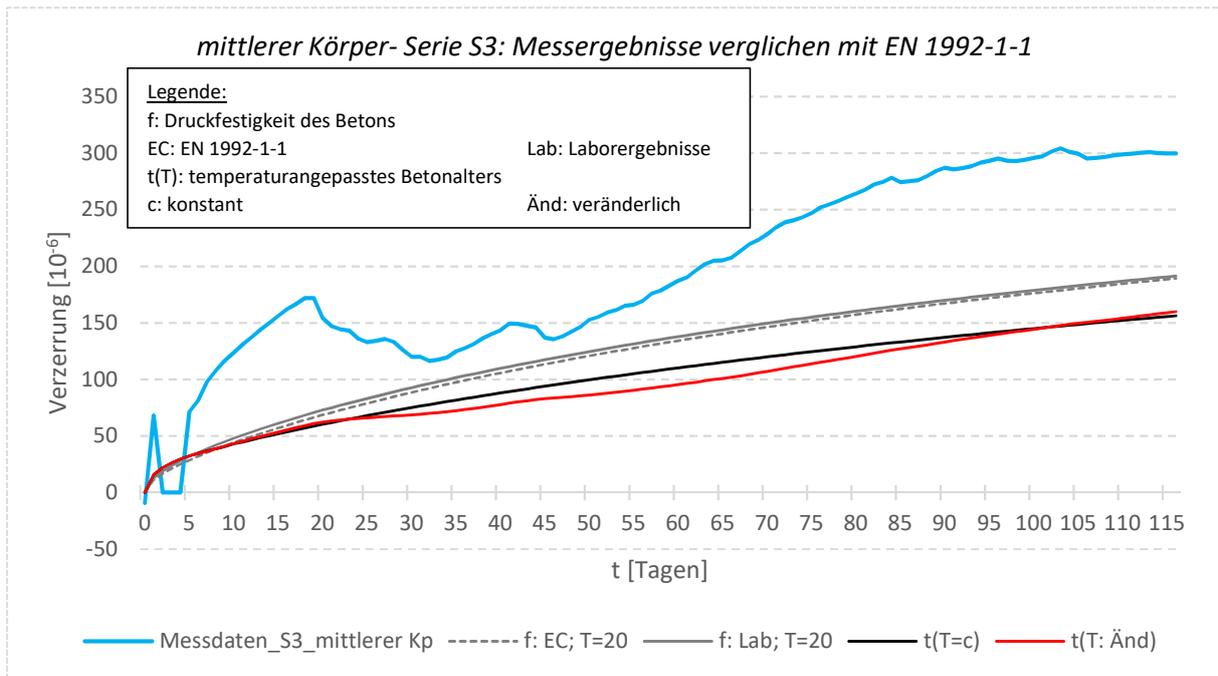


Bild 4.2.21: Schwinden nach EN 1992-1-1, verglichen mit den Messwerten des Experiments; mittlerer Körper (mit 500x500 [mm] Querschnitt); Serie S3

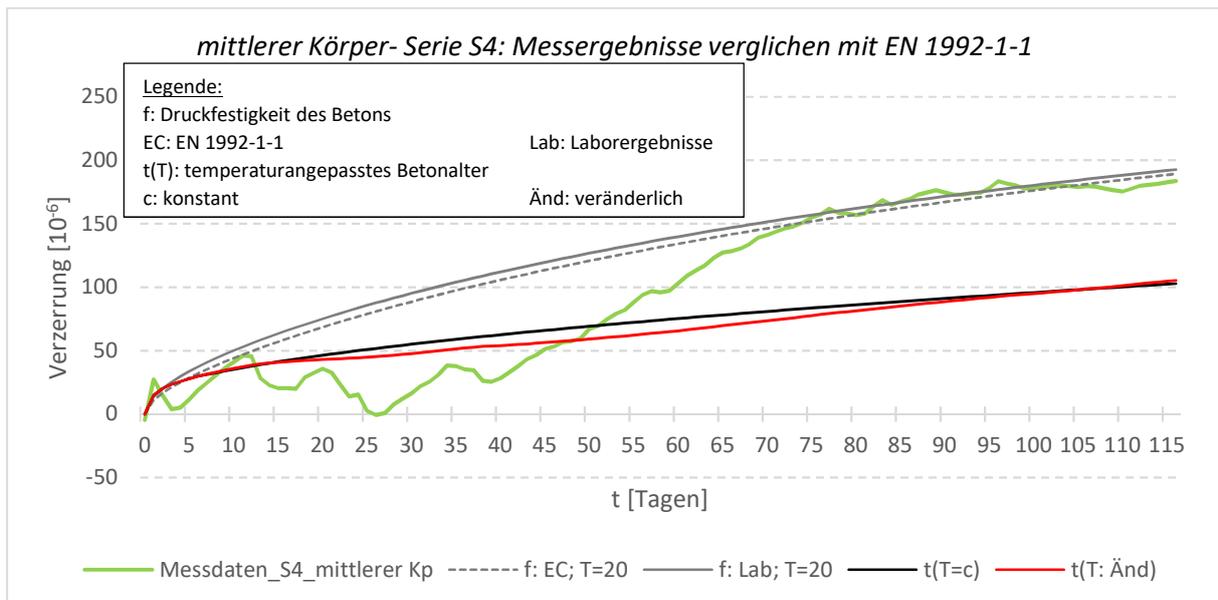


Bild 4.2.22: Schwinden nach EN 1992-1-1, verglichen mit den Messwerten des Experiments; mittlerer Körper (mit 500x500 [mm] Querschnitt); Serie S4

Auswertung des Schwindens nach EN 1992-1-1

Die Werte, ohne Berücksichtigung des temperaturangepassten Betonalters, sind näher an den Messwerten als die Werte mit Berücksichtigung des temperaturangepassten Betonalters. Der Verlauf des Schwindens (Gradienten der Diagramme) zeigt aber mit der roten Linie den besten Einklang (mit Berücksichtigung des temperaturangepassten Betonalters, mit den Tagesmittelwerten der Temperatur).

Ob die Betondruckfestigkeit nach Eurocode, oder nach Laborergebnissen berücksichtigt wurde, beeinflusste die Ergebnisse wenig (graue Linie).

4.2.5.2. Kriechen

Bild 4.2.23-4.2.24; und Bild C.5- C.8 (Bilder C.5- C.8 befinden sich im Anhang C):

Die Betondruckspannungen in den Körpern ergaben sich nach Tabelle 3.5 zwischen 9,43 und 10,00 [N/mm²]. Die mittleren Betondruckspannungen haben die Grenze der $0,45 \cdot f_{ck}$ ($0,45 \cdot 30 = 13,5$ [N/mm²]) nicht erreicht, deswegen ist es erlaubt mit linearem Kriechen zu berechnen.

Einfluss des Elastizitätsmoduls und der Druckfestigkeit des Betons:

Der Elastizitätsmodul beeinflusst die elastische Dehnung nach Gleichung (2.5), deswegen wurden die Werte des Elastizitätsmoduls gemäß Eurocode (punktierte graue Linie) nach Kapitel 4.2.4; gemäß den Laborergebnissen (gestrichelte graue Linie) nach Kapitel 3.2.3.1; und gemäß den In-Situ-Messungen (durchgehende graue Linie; braune Linie; schwarze Linie; rote Linien) nach Kapitel 3.2.3.2 verwendet.

Die mittlere Zylinderdruckfestigkeit des Betons beeinflusst die Grundzahl des Kriechens nach den Gleichungen (4.2.14) - (4.2.19).

Bei der Annahme des Elastizitätsmoduls nach Eurocode 2 (punktierte graue Linie) wurde auch die mittlere Zylinderdruckfestigkeit des Betons, in Gleichung (4.2.17) - (4.2.19) und in Gleichung (4.2.24) nach Eurocode 2, nach Tabelle 4.2.1 ($f_{cm} = 38$ N/mm²) verwendet. Die Gesteinskörnung des betrachteten Betons ist Kies/Sand, deswegen wurden die Werte der Tabelle 4.2.2 um 30% reduziert, nach Kapitel 4.2.4. Bei der Annahme des Elastizitätsmoduls nach Eurocode, ist der Elastizitätsmodul zum Zeitpunkt $t = 28$ Tage bekannt, und nach den Gleichungen (4.2.27) - (4.2.29) wurde der Elastizitätsmodul zum Zeitpunkt $t = 6$ Tage bestimmt. Elastizitätsmodul, zum Zeitpunkt $t = 6$ Tage ist wichtig für die Bestimmung der elastischen Dehnung, nach Gleichung (2.5).

Bei der Annahme des Elastizitätsmoduls nach den Laborergebnissen (gestrichelte graue Linie), wurde auch die mittlere Zylinderdruckfestigkeit des Betons, in Gleichung (4.2.17) - (4.2.19) und in Gleichung (4.2.24) nach den Laborergebnissen, nach Kapitel 3.2.1 verwendet.

Bei der Annahme des Elastizitätsmoduls nach den In-situ-Messungen, wurde die mittlere Zylinderdruckfestigkeit des Betons, in Gleichung (4.2.17) - (4.2.19) und in Gleichung (4.2.24) nach Eurocode (braune Linie); und nach den Laborergebnissen (durchgehende graue Linie; schwarze Linie; rote Linien) verwendet, um den Einfluss der Betondruckfestigkeit untersuchen zu können. Bei der Annahme des Elastizitätsmoduls nach den In-situ-Messungen, ist der

Elastizitätsmodul zum Zeitpunkt der Vorspannung bekannt ($t = 6$ Tage), und nach den Gleichungen (4.2.27) - (4.2.29) wurde der Elastizitätsmodul zum Zeitpunkt $t = 28$ Tage bestimmt. Elastizitätsmodul, zum Zeitpunkt $t = 28$ Tage ist wichtig für die Bestimmung der Kriechverformung, nach Gleichung (4.2.11).

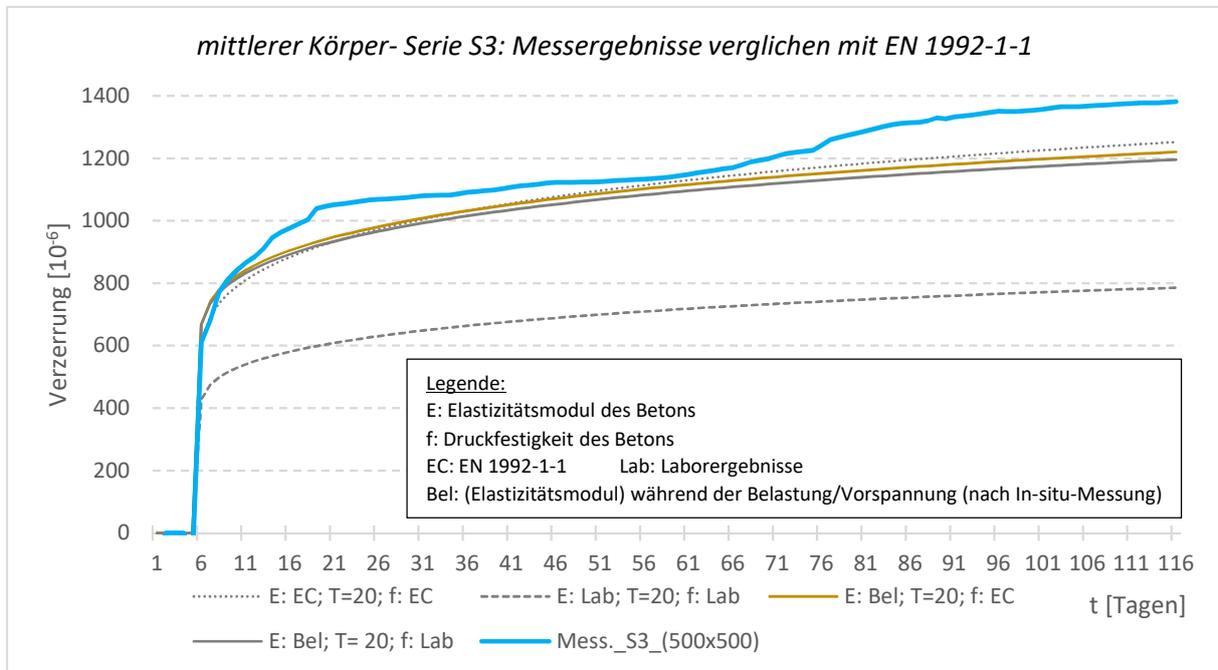


Bild 4.2.23: Kriechen nach EN 1992-1-1, verglichen mit den Messwerten des Experiments; mittlerer Körper (mit 500x500 [mm] Querschnitt); Serie S3

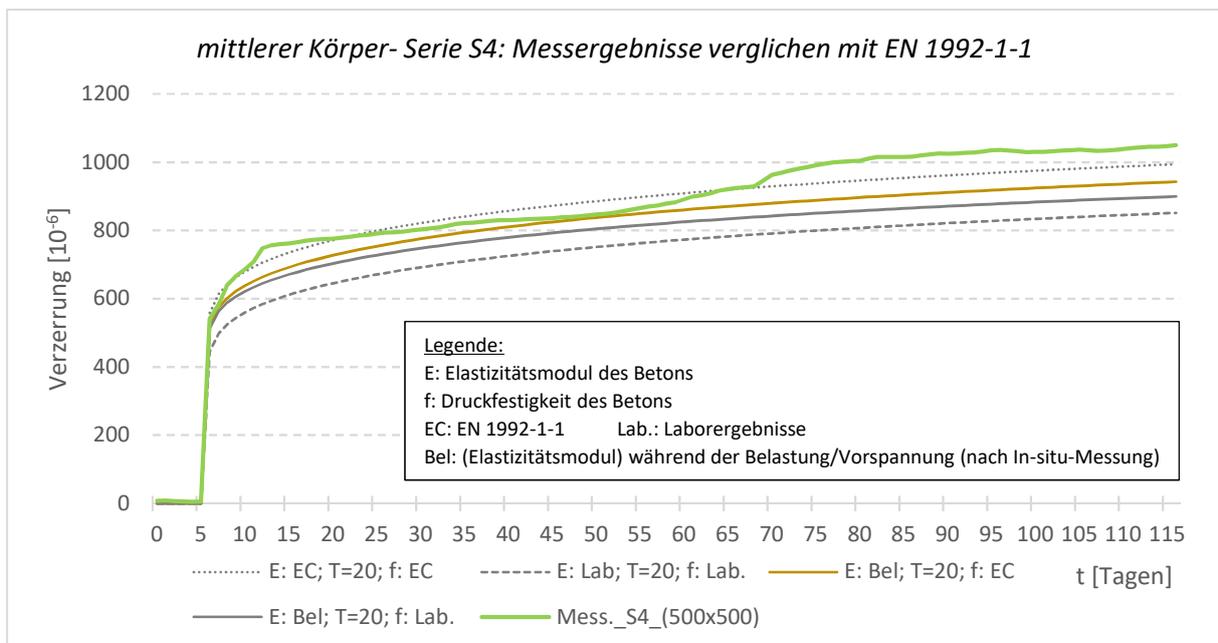


Bild 4.2.24: Kriechen nach EN 1992-1-1, verglichen mit den Messwerten des Experiments; mittlerer Körper (mit 500x500 [mm] Querschnitt); Serie S4

Anmerkung:

Weiters weist in den Bildern, „E: Bel“ an „Elastizitätsmodul während der Belastung“ zu, weil die In-situ-Messungen während der Belastung (Vorspannung) der Betonkörper durchgeführt wurden.

Auswertung des Kriechens- Bild 4.2.23-4.2.24; und Bild C.5- C.8- :

Einfluss des Elastizitätsmoduls:

(graue Linie vergleichen mit den Messwerten)

Die Berechnungen zeigten eine bessere Übereinstimmung mit den Messwerten, wenn der Elastizitätsmodul nach den In-situ-Messungen und nach Eurocode, als wenn der Elastizitätsmodul nach den Laborergebnissen benutzt wurde.

Einfluss der Festigkeit:

(durchgehende graue Linie; braune Linie vergleichen mit den Messwerten)

Ob die Betondruckfestigkeit nach Eurocode oder nach Laborergebnissen berücksichtigt wurde, beeinflusste die Ergebnisse erheblich. Die Ergebnisse der Berechnung nach Eurocode benutzte Festigkeit stimmte mit den Messwerten besser überein, als mit der nach Laborergebnissen benutzten Festigkeit.

Bild 4.2.25-4.2.26; Bild C.5- C.8 (Bild C.5- C.8 befindet sich im Anhang C):

Einfluss des temperaturangepassten Betonalters:

-die horizontale Skalierung der Kriechkurve-

Eurocode empfiehlt die Berücksichtigung des temperaturangepassten Betonalters nach Gleichung (4.2.25) und (4.2.26) anzuwenden (die Gleichung (4.2.25) bezieht sich nur auf den Belastungsbeginn). Das temperaturangepasste Betonalter nach Gleichung (4.2.26) wurde deshalb mit Tagesmittelwerten der Temperatur, auch während der Belastung (rote Linie) nach Bild 3.22 und nach Bild 3.23; oder mit einem zu der Messperiode gehörenden Mittelwert (schwarze Linie), nach Tabelle 3.3 berücksichtigt. Die grauen Linien und die braunen Linie berücksichtigten das temperaturangepasste Betonalter nicht (auch im Bild 4.2.23 und im Bild 4.2.24).

Einfluss der relativen Luftfeuchte:

Mit den Gleichungen (4.2.15) - (4.2.16) und mit den Gleichungen (4.2.22) - (4.2.23) gibt es die Möglichkeit, die relative Luftfeuchtigkeit zu berücksichtigen.

Die Gleichung (4.2.15) - (4.2.16) verwendet die relative Luftfeuchtigkeit, um die Grundzahl des Kriechens zu bestimmen, deswegen wurde da mit dem Mittelwert der relativen Luftfeuchte über die ganze Messperiode gerechnet (nach Gleichung (3.4): $RH_{M,S3}=62,17$ [%]; $RH_{M,S4}=63,22$ [%]).

Die grauen Linien (auch in Bild 4.2.23 und in Bild 4.2.24); die durchgehende schwarzen und die roten Linien berücksichtigten die relative Luftfeuchtigkeit mit dem Mittelwert der relativen Luftfeuchtigkeit über die ganze Messperiode ($RH_{M,S3}=62,17$ [%]; $RH_{M,S4}=63,22$ [%]) in Gleichung (4.2.22) - (4.2.23).

Die gestrichelte rote Linie berücksichtigten die relative Luftfeuchtigkeit mit Tagesmittelwerten in Gleichung (4.2.22) - (4.2.23) nach Bild 3.21.

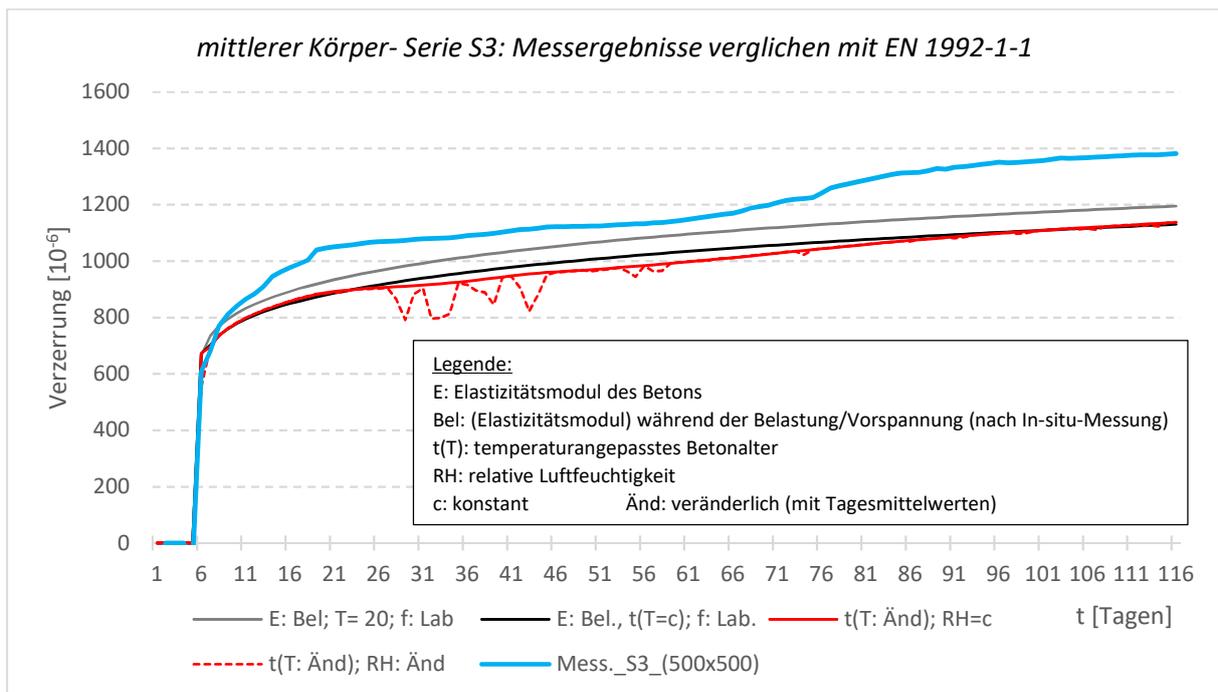


Bild 4.2.25: Kriechen nach EN 1992-1-1, verglichen mit den Messwerten des Experiments; mittlere Körper; Serie S3

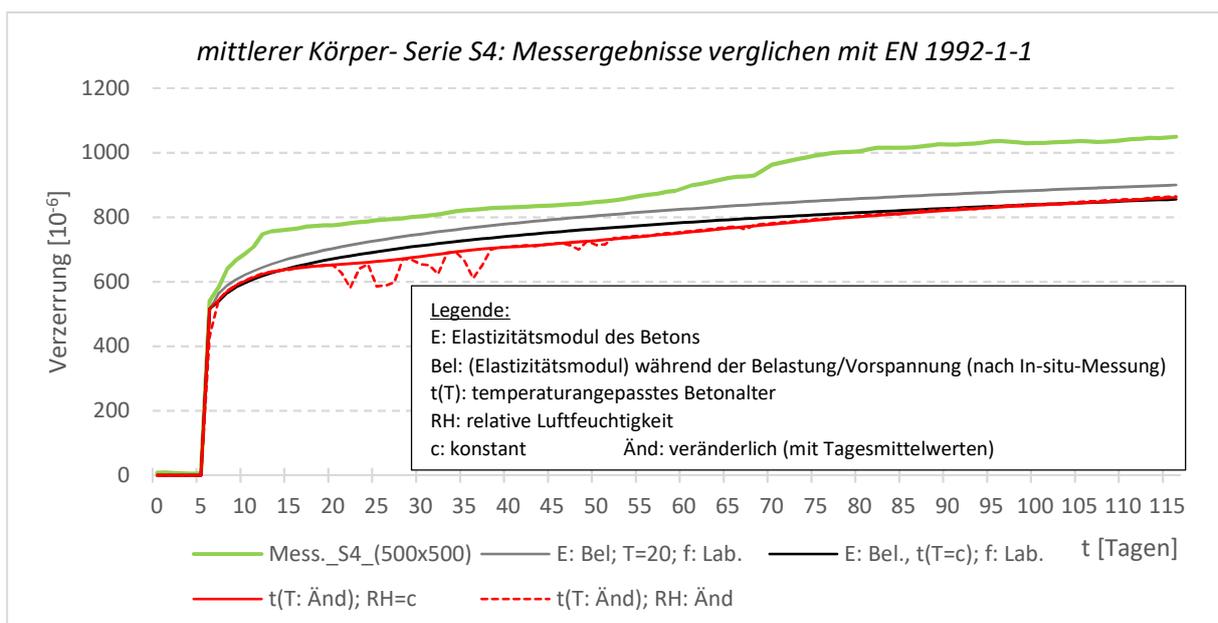


Bild 4.2.26: Kriechen nach EN 1992-1-1, verglichen mit den Messwerten des Experiments; mittlere Körper; Serie S4

Auswertung des Kriechens- Bild 4.2.25-4.2.26; und Bild C.5- C.8-:

Einfluss des temperaturangepassten Betonalters:

(graue Linien; schwarze Linie und rote Linien mit den Messwerten verglichen)

Mit der Berücksichtigung des temperaturangepassten Betonalters mit Tagesmittelwerten näherte sich der Verlauf der Berechnung den Messergebnissen am besten (Gradienten der Diagramme).

Einfluss der relativen Luftfeuchtigkeit:

(gestrichelte rote Linie und durchgehende rote Linie mit den Messwerten verglichen)

Die Berücksichtigung der relativen Luftfeuchtigkeit mit Tagesmittelwerten resultiert mit Eurocode manchmal in unrealistischen Schwankungen.

Das Kriechen nach EN 1992-1-1 ist nicht empfindlich für die Änderung der relativen Luftfeuchtigkeit in dem Bereich bis ca. 75- 80 [%]. Zwischen ca. 75- 90 [%] der relativen Luftfeuchtigkeit steigen die Werte von β_H sehr intensiv an (Bild 4.2.13), nach den Gleichungen (4.2.22) - (4.2.23), die dann in großen Änderungen für den Verlauf des Kriechens resultieren.

Die Berücksichtigung der relativen Luftfeuchtigkeit mit Tagesmittelwerten resultiert manchmal in Abnahmen in den Kriechverzerrungen, die physikalisch nicht korrekt sind, weil die Verzerrungen infolge von Kriechen, unter konstanten Spannungen nicht abnehmen dürfen. Der Grund für die Abnahme der Verzerrungen ist die Schwankung der β_H Werte, die dann die Schwankung der $\beta_c(t, t_0)$ Werte (in Gleichung (4.2.13); und nach Gleichung (4.2.21)) verursacht. Bild 4.2.27 und 4.2.28 zeigen die Werte von β_H und $\beta_c(t, t_0)$ im Laufe der Zeit für die Serie S3, mit Berücksichtigung der relativen Luftfeuchtigkeit mit Tagesmittelwerten.

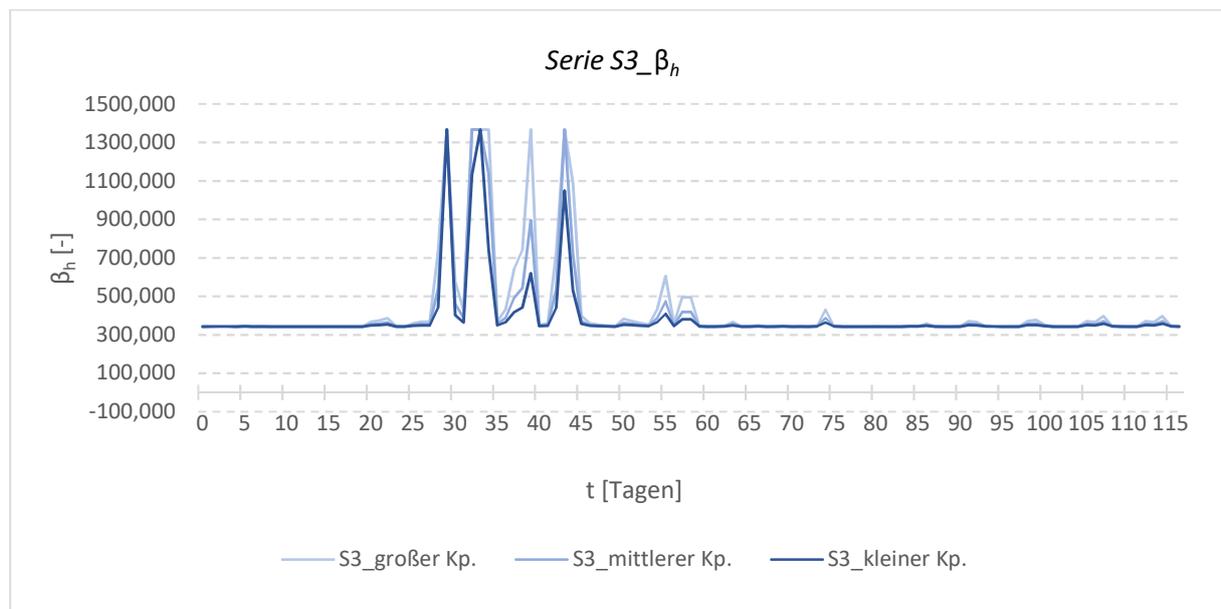


Bild 4.2.27: die Werte β_H im Laufe der Zeit

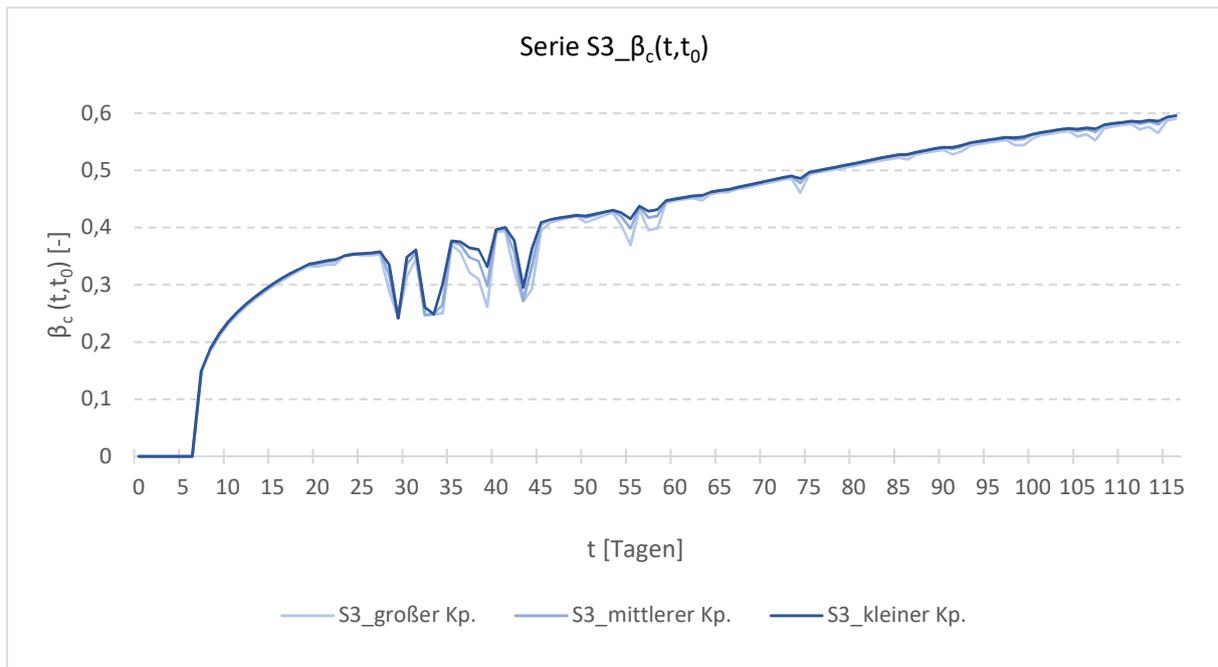


Bild 4.2.28: die Werte $\beta_c(t, t_0)$ im Laufe der Zeit.

Nach der Analyse der Diplomarbeit, wird die Berücksichtigung der relativen Luftfeuchtigkeit mit Tagesmittelwerten für die Auswertung des Kriechens des Betons nicht empfohlen (mit dem Modell EN 1992-1-1).

4.3. fib Model Code für Betonkonstruktionen 2010

nach [5]

Die Gesamtdehnung eines Betonkörpers $\varepsilon_c(t)$ zum Zeitpunkt t , der mit einer konstanten Spannung $\sigma_c(t_0)$ von dem Zeitpunkt t_0 einachsrig belastet ist, kann nach Model Code 2010 nach Gleichung (4.3.1) oder nach Gleichung (4.3.2) ausgedrückt werden.

$$\varepsilon_c(t) = \varepsilon_{ci}(t_0) + \varepsilon_{cc}(t) + \varepsilon_{cs}(t) + \varepsilon_{cT}(t) \quad (4.3.1)$$

$$\varepsilon_c(t) = \varepsilon_{c\sigma}(t) + \varepsilon_{cn}(t) \quad (4.3.2)$$

$$\varepsilon_{ci}(t_0) = \frac{\sigma_c(t_0)}{E_{ci}(t_0)} \quad (4.3.3)$$

Dabei ist

$\varepsilon_{ci}(t)$	die elastische Dehnung;
$\varepsilon_{cc}(t)$	die Kriechdehnung in Zeitpunkt $t > t_0$;
$\varepsilon_{cs}(t)$	die Schwinddehnung;
$\varepsilon_{cT}(t)$	die Dehnung infolge der Temperaturänderung;
$\varepsilon_{c\sigma}(t)$	von der Spannung abhängige Dehnung;
$\varepsilon_{cn}(t)$	von der Spannung unabhängige Dehnung.

In Model Code 2010 werden nur solche Parameter berücksichtigt, die normalerweise dem Planer bekannt sind, wie zum Beispiel charakteristische Druckfestigkeit, Abmessungen der Körper, relative Luftfeuchtigkeit, Betonalter bei Belastungsanfang, und Art des Zements.

4.3.1. Anwendungsbereich – MC 2010-

- 1) $20 [MPa] \leq f_{cm} \leq 130 [MPa]$
- 2) $|\sigma_c| \leq 0,4 \cdot f_{cm}(t_0)$
- 3) $40 [\%] \leq RH \leq 100 [\%]$
- 4) $5 [Celsius] \leq T_{Mitte} \leq 30 [Celsius]$
- 5) $t_0 \geq 1 [Tagen]$

Dabei ist

f_{cm}	die mittlere Zylinderdruckfestigkeit des Betons;
RH	die relative Luftfeuchte in [%];
T_{Mitte}	die mittlere Temperatur;
t_0	das Betonalter bei der Belastung.

4.3.2. Schwinden nach MC 2010

Das gesamte Schwinden $\varepsilon_{cs}(t, t_s)$ kann berechnet werden als:

$$\varepsilon_{cs}(t, t_s) = \varepsilon_{cbs}(t) + \varepsilon_{cds}(t, t_s) \quad (4.3.4)$$

Dabei ist

$\varepsilon_{cbs}(t)$ das Grundschrindn;

$\varepsilon_{cds}(t, t_s)$ das Trocknungsschrindn, nach den Gleichungen (4.3.8) - (4.3.13).

$$\varepsilon_{cbs}(t) = \varepsilon_{cbs0}(f_{cm}) \cdot \beta_{bs}(t) \quad (4.3.5)$$

$$\varepsilon_{cbs0}(f_{cm}) = -\alpha_{bs} \cdot \left(\frac{0,1 \cdot f_{cm}}{6+0,1 \cdot f_{cm}}\right)^{2,5} \cdot 10^{-6} \quad (4.3.6)$$

$$\beta_{bs}(t) = 1 - e^{-0,2 \cdot \sqrt{t}} \quad (4.3.7)$$

Dabei ist

$\varepsilon_{cbs0}(f_{cm})$ ein von dem Zementtyp und Festigkeitsklasse abhängiger Beiwert, grafisch im Bild 4.3.1 dargestellt;

$\beta_{bs}(t)$ eine Zeitfunktion (gleich wie in Eurocode $\beta_{as}(t)$, nach Gleichung (4.2.10));

α_{bs} ein von dem Zementtyp abhängiger Koeffizient

$\alpha_{bs}=800$	für Zement:	32,5 N,
$\alpha_{bs}=700$	für Zement:	32,5 R; 42,5 N,
$\alpha_{bs}=600$	für Zement:	42,5 R; 52,5 N; 52,5 R.

$$\varepsilon_{cds}(t, t_s) = \varepsilon_{cds0}(f_{cm}) \cdot \beta_{RH}(RH) \cdot \beta_{ds}(t - t_s) \quad (4.3.8)$$

$$\varepsilon_{cds0}(f_{cm}) = [(220 + 110 \cdot \alpha_{ds}) \cdot e^{-\alpha_{ds2} \cdot f_{cm}}] \cdot 10^{-6} \quad (4.3.9)$$

$$\beta_{RH} = -1,55 \cdot \left[1 - \left(\frac{RH}{100}\right)^3\right] \quad \text{für:} \quad 40 \leq RH \leq 99\% \cdot \beta_{s1} \quad (4.3.10)$$

$$\beta_{RH} = 0,25 \quad \text{für} \quad RH \geq 99\% \cdot \beta_{s1} \quad (4.3.11)$$

$$\beta_{ds}(t - t_s) = \left(\frac{t - t_s}{0,035 \cdot h^2 + (t - t_s)}\right)^{0,5} \quad (4.3.12)$$

$$\beta_{s1} = \left(\frac{35}{f_{cm}}\right)^{0,1} \leq 1,0 \quad (4.3.13)$$

Dabei ist

$\epsilon_{cds}(t, t_s)$	die Trocknungsschwinddehnung des Betons;
$\epsilon_{cds0}(f_{cm})$	der Grundwert des Trocknungsschwindens;
$\beta_{RH}(RH)$	ein Beiwert zur Berücksichtigung der relativen Luftfeuchtigkeit, grafisch im Bild 4.3.2 dargestellt;
$\beta_{ds}(t-t_s)$	eine Zeitfunktion, grafisch im Bild 4.3.3 und im Bild 4.3.4 dargestellt;
RH	relative Luftfeuchte der Umgebung in [%];
t_s	Zeitpunkt des Anfangs des Schwindens;
h	die wirksame Bauteildicke, wie in Eurocode 2 nach Gleichung (4.2.5);
$\alpha_{ds1/2}$	von dem Zementtyp abhängiger Koeffizient, für:

32,5N	$\alpha_{ds1}=3$	$\alpha_{ds2}=0,013$
32,5R; 42,5N	$\alpha_{ds1}=4$	$\alpha_{ds2}=0,012$
42,5R; 52,5N; 52,5 R	$\alpha_{ds1}=6$	$\alpha_{ds2}=0,012$

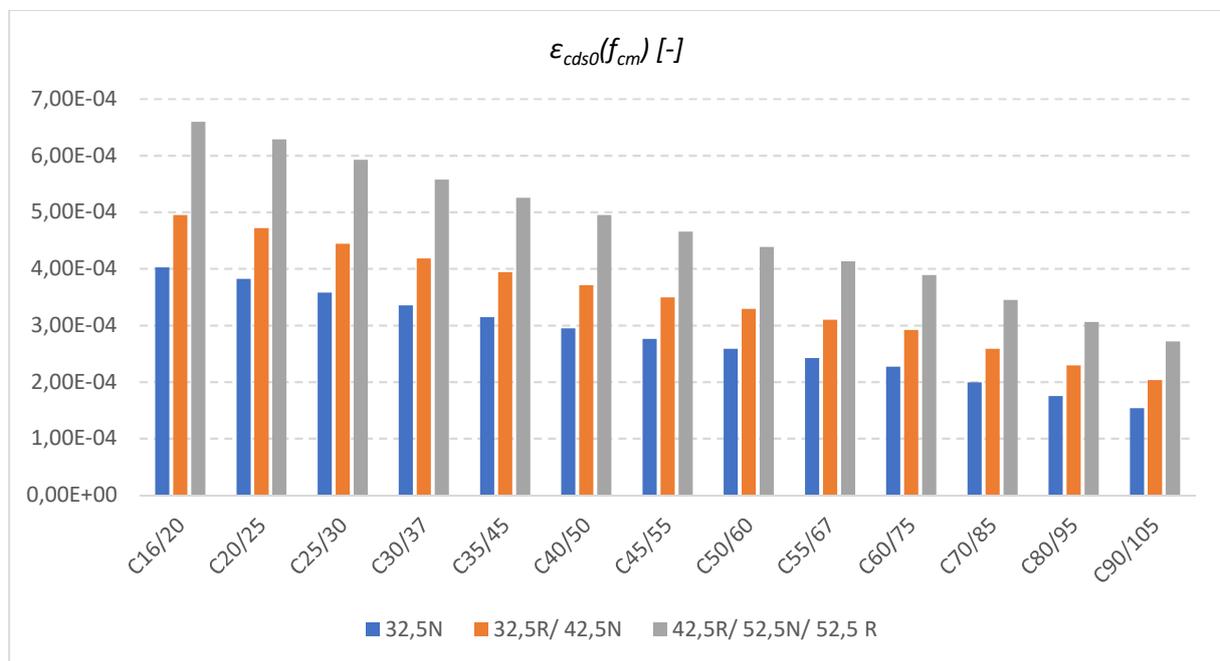


Bild 4.3.1: Grundwert des Trocknungsschwindens für verschiedene Betonklassen, und Zementtypen

Bild 4.3.1 zeigt, dass der Grundwert des Schwindens mit steigenden Festigkeitsklassen abnimmt. Der Grundwert des Schwindens ist am größten für Zemente der Klasse 42,5R, 52,5N, 52,5R; und ist am niedrigsten für Zemente der Klasse 32,5 N.

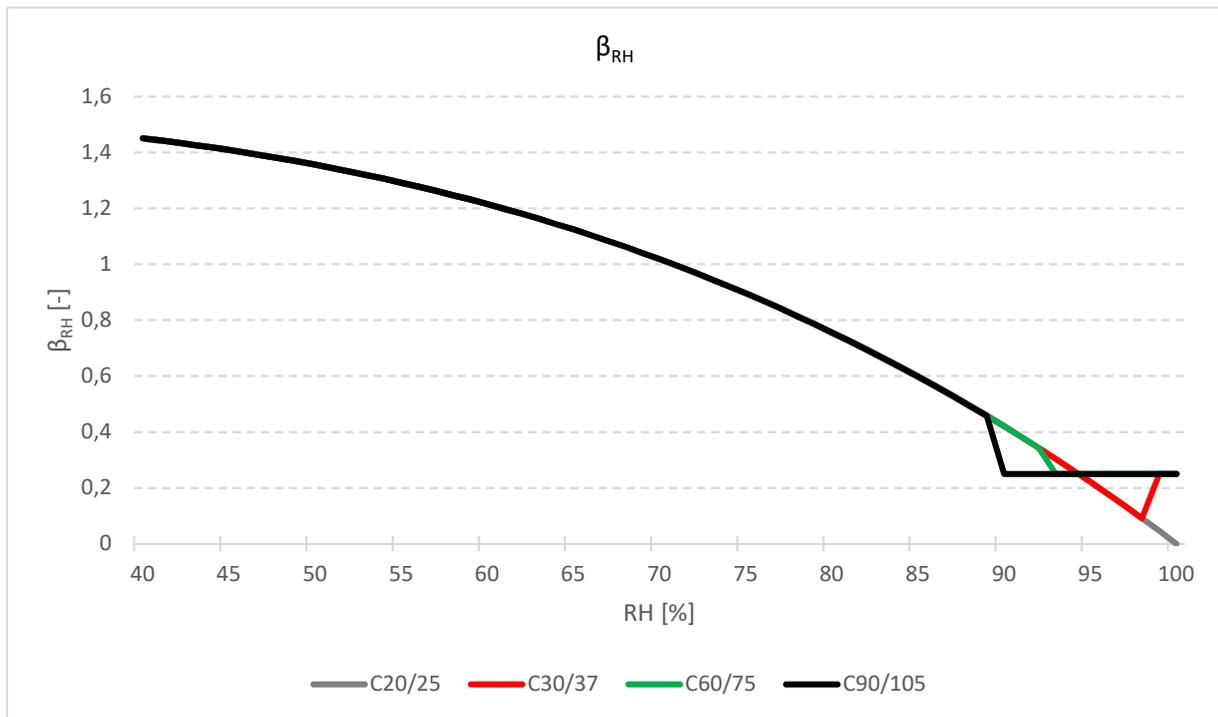


Bild 4.3.2: der Beiwert β_{RH} , der die relative Luftfeuchte berücksichtigt

Bild 4.3.2 zeigt, dass der Wert β_{RH} mit steigender relativer Luftfeuchte kleiner wird. Die Betondruckfestigkeit beeinflusst den Wert β_{RH} bei höherer relativer Luftfeuchte (ca. über 90 [%]).

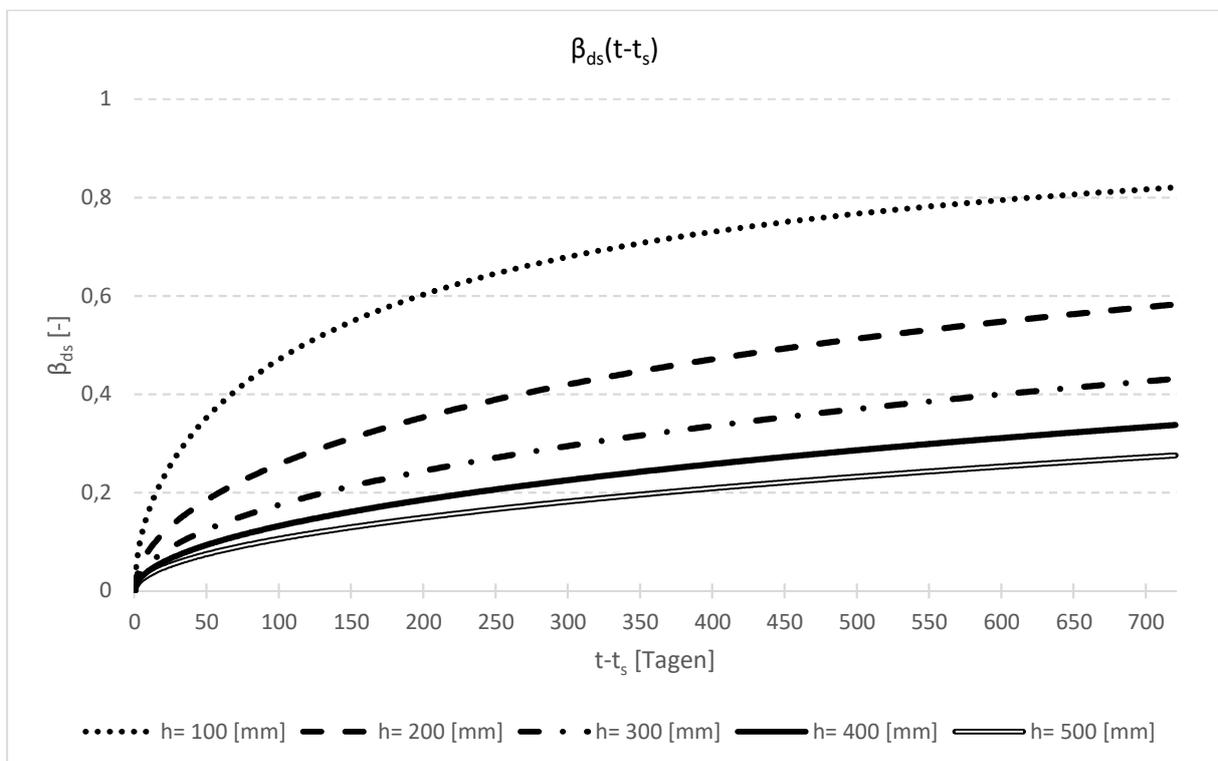


Bild 4.3.3: die Zeitfunktion $\beta_{ds}(t-t_s)$

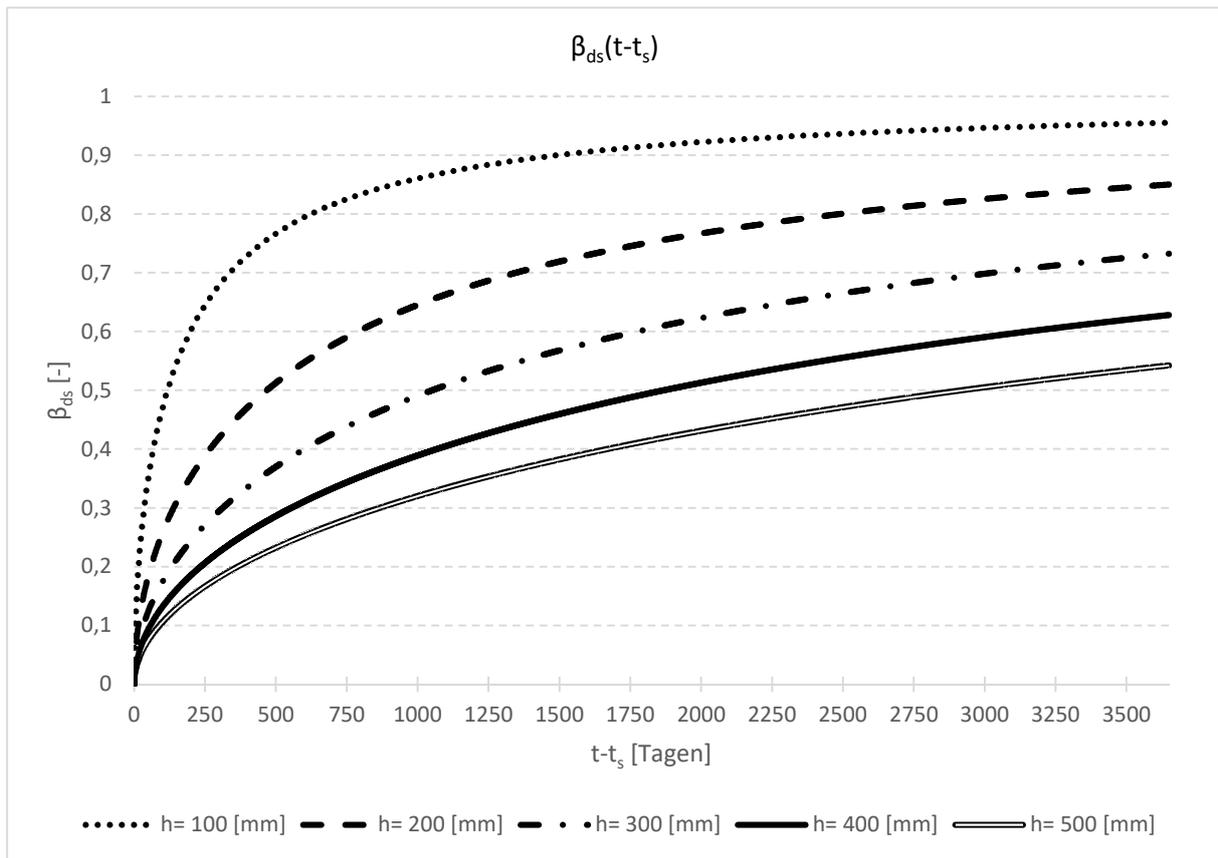


Bild 4.3.4: die Zeitfunktion $\beta_{ds}(t-t_s)$

Bild 4.3.3 und Bild 4.3.4 zeigen, dass je dicker ein Bauteil ist, desto langsamer entwickeln sich die Schwindverzerrungen. Die Bilder zeigen auch, dass Trocknungsschwinden ein langsamer Prozess ist. Es dauert mehrere Jahre bis Trocknungsschwinden sich abwickelt.

4.3.3. Kriechen nach MC 2010

Für eine konstante Spannung $\sigma_c(t_0)$, die zum Zeitpunkt t_0 aufgebracht wird, kann die Kriechdehnung $\varepsilon_{cc}(t, t_0)$ nach Gleichung (4.3.14) berechnet werden.

$$\varepsilon_{cc}(t, t_0) = \frac{\sigma_c(t_0)}{E_{ci}} \cdot \varphi(t, t_0) \quad (4.3.14)$$

Dabei ist

- $\varphi(t, t_0)$ die Kriechzahl;
- E_{ci} der Elastizitätsmodul im Alter von 28 Tagen.

Die Beziehungen zum Berechnen der Kriechzahl sind empirisch. Die Kriechzahl $\varphi(t, t_0)$ kann wie folgt nach Gleichung (4.3.15) - (4.3.26) berechnet werden:

$$\varphi(t, t_0) = \varphi_{bc}(t, t_0) + \varphi_{dc}(t, t_0) \quad (4.3.15)$$

Dabei ist

- $\varphi_{bc}(t, t_0)$ die Grundkriechzahl, nach den Gleichungen (4.3.16) - (4.3.18);
- $\varphi_{dc}(t, t_0)$ die Trocknungskriechzahl, nach den Gleichung (4.3.19) - (4.3.26);
- t das Alter des Betons in Tagen im betrachteten Zeitpunkt;
- t_0 das Alter des Betons bei Belastung in Tagen

Die Grundkriechzahl $\varphi_{bc}(t, t_0)$ kann wie folgt berücksichtigt werden:

$$\varphi_{bc}(t, t_0) = \beta_{bc}(f_{cm}) \cdot \beta_{bc}(t, t_0) \quad (4.3.16)$$

$$\beta_{bc}(f_{cm}) = \frac{1,8}{f_{cm}^{0,7}} \quad (4.3.17)$$

$$\beta(t, t_0) = \ln\left(\left(\frac{30}{t_{0,adj}} + 0,035\right)^2 \cdot (t - t_0) + 1\right) \quad (4.3.18)$$

Dabei ist

- $\beta_{bc}(f_{cm})$ ein, von der Druckfestigkeit abhängiger Beiwert, grafisch im Bild 4.3.5 dargestellt;
- $\beta_{bc}(t, t_0)$ Zeitfunktion, grafisch im Bild 4.3.6 dargestellt;
- $t_{0,adj}$ das temperaturangepasste Betonalter bei Belastungsbeginn in Tagen.

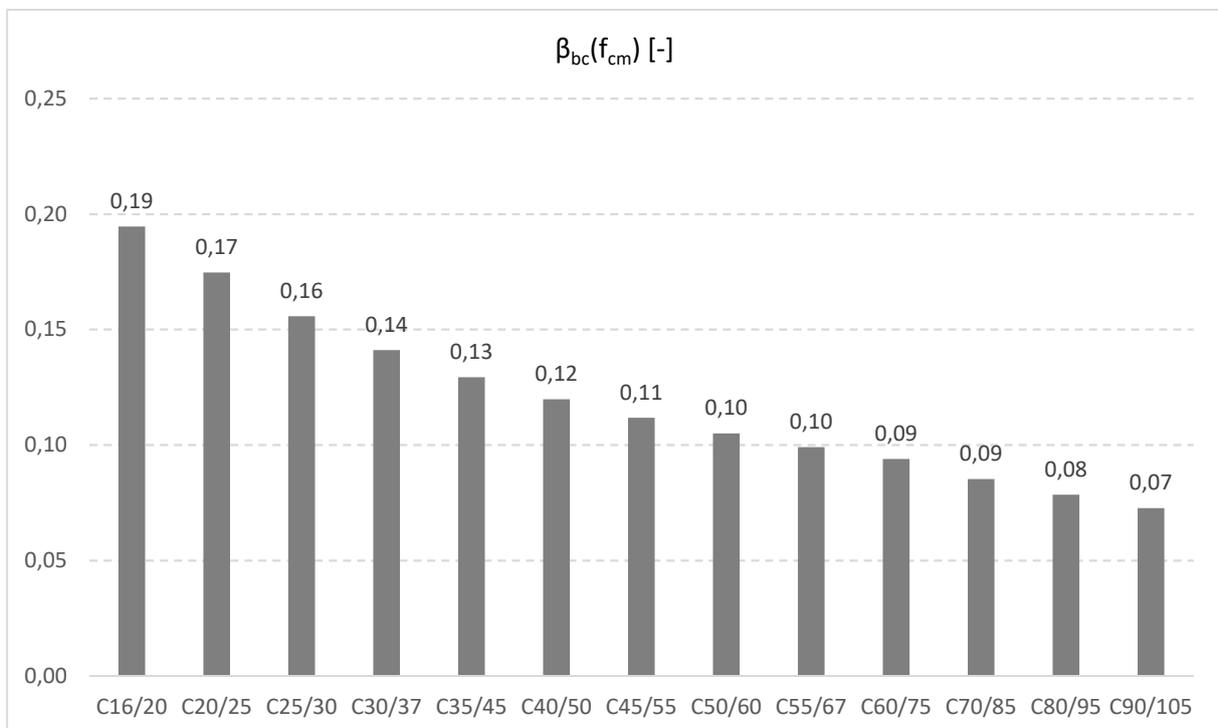


Bild 4.3.5: von der Druckfestigkeit abhängiger Beiwert, $\beta_{bc}(f_{cm})$

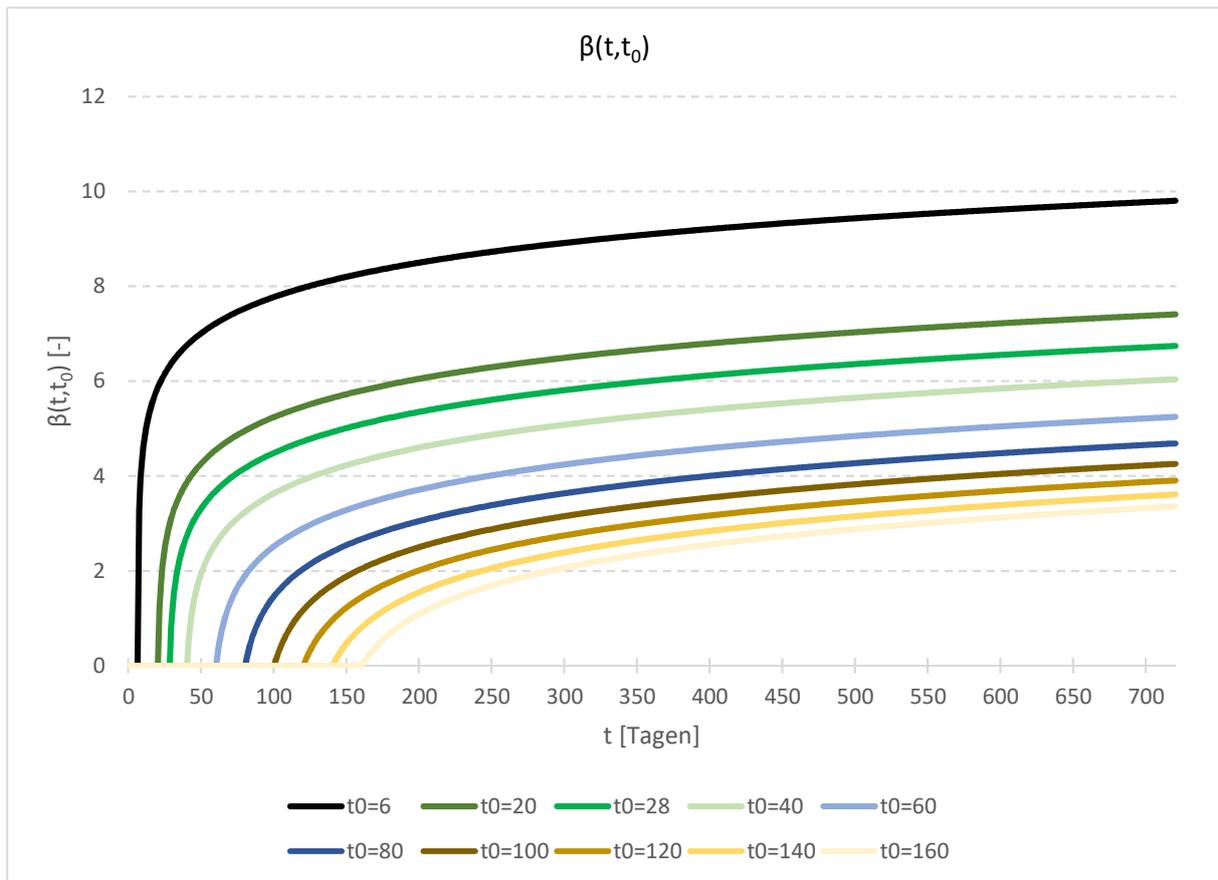


Bild 4.3.6: die Zeitfunktion, $\beta(t, t_0)$

Nach Bild 4.3.6 wird die Trocknungskriechzahl mit früherem Belastungsbeginn größer.

Der Trocknungskriechzahl $\varphi_{dc}(t, t_0)$ kann wie folgt berücksichtigt werden:

$$\varphi_{dc}(t, t_0) = \beta_{dc}(f_{cm}) \cdot \beta(RH) \cdot \beta_{dc}(t_0) \cdot \beta_{dc}(t, t_0) \quad (4.3.19)$$

mit

$$\beta_{dc}(f_{cm}) = \frac{412}{f_{cm}^{1,4}} \quad (4.3.20)$$

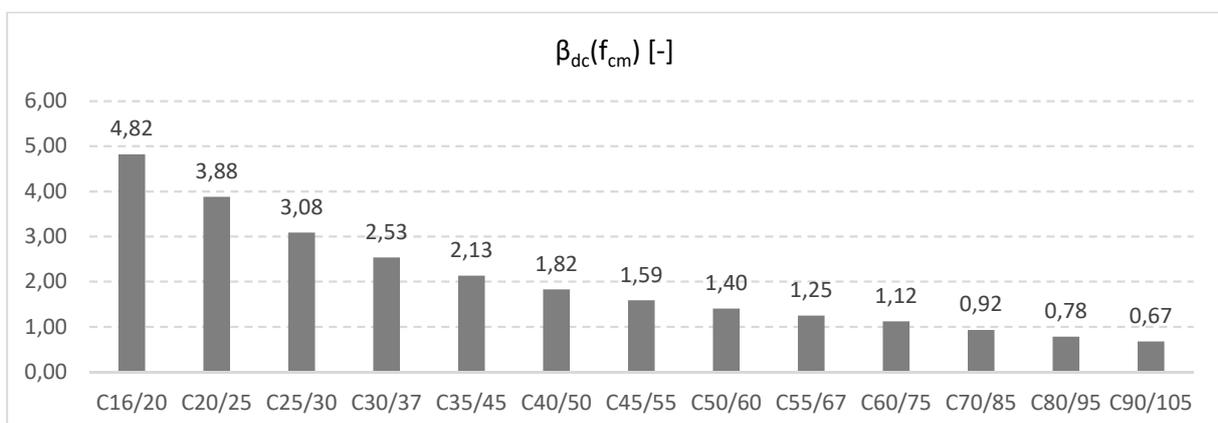


Bild 4.3.7: ein, von der Druckfestigkeit abhängiger Beiwert, $\beta_{dc}(f_{cm})$

$$\beta(RH) = \frac{1 - \frac{RH}{100}}{\sqrt[3]{0,1 \cdot \frac{h}{100}}} \quad (4.3.21)$$

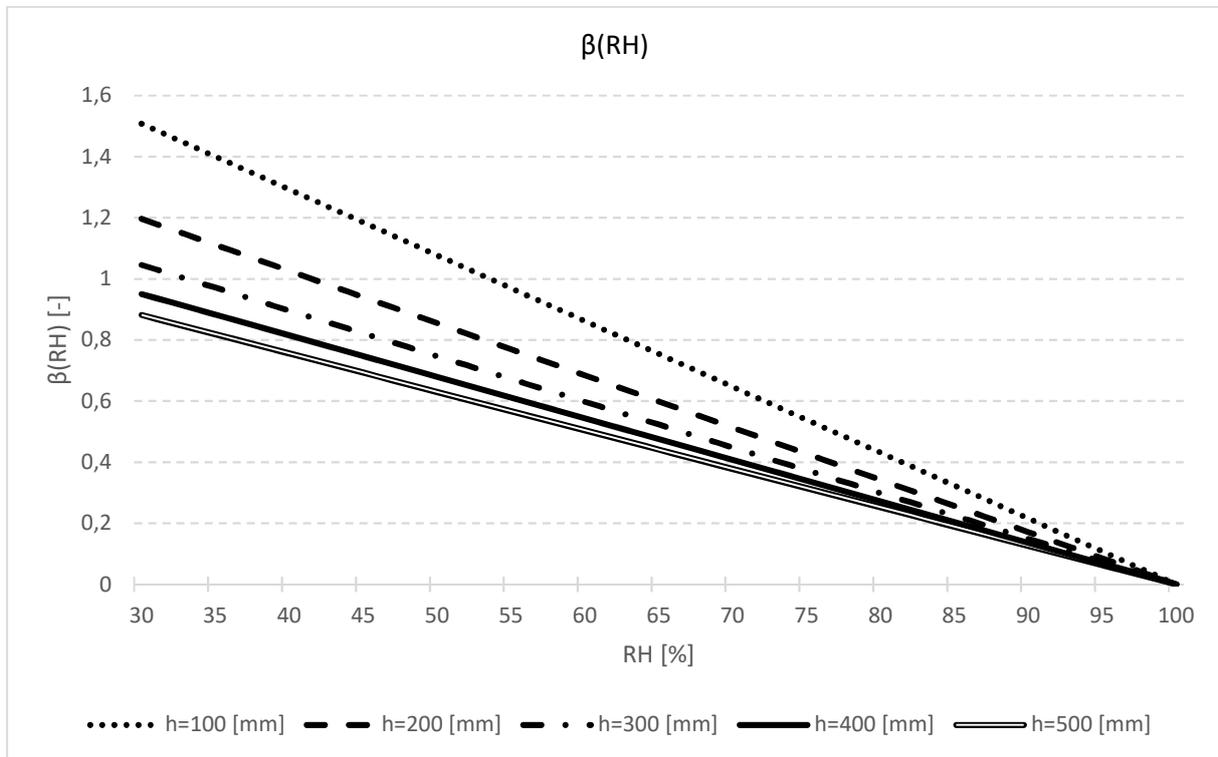


Bild 4.3.8: ein, von der relativen Luftfeuchtigkeit abhängiger Beiwert, $\beta(RH)$

Bild 4.3.8 und Gleichung (4.3.21) zeigen, dass es eine lineare Beziehung zwischen der relativen Luftfeuchte und $\beta(RH)$ Werte gibt. Je dicker ein Bauteil ist, desto kleiner ist $\beta(RH)$.

$$\beta_{dc}(t, t_0) = \left[\frac{t-t_0}{\beta_h + (t-t_0)} \right] \gamma(t_0) \quad (4.3.22)$$

$$\gamma(t_0) = \frac{1}{2,3 + \frac{3,5}{\sqrt{t_0}}} \quad (4.3.23)$$

$$\beta_h = 1,5 \cdot h + 250 \cdot \alpha_{f_{cm}} \leq 1500 \cdot \alpha_{f_{cm}} \quad (4.3.24)$$

$$\alpha_{f_{cm}} = \left(\frac{35}{f_{cm}} \right)^{0,5} \quad (4.3.25)$$

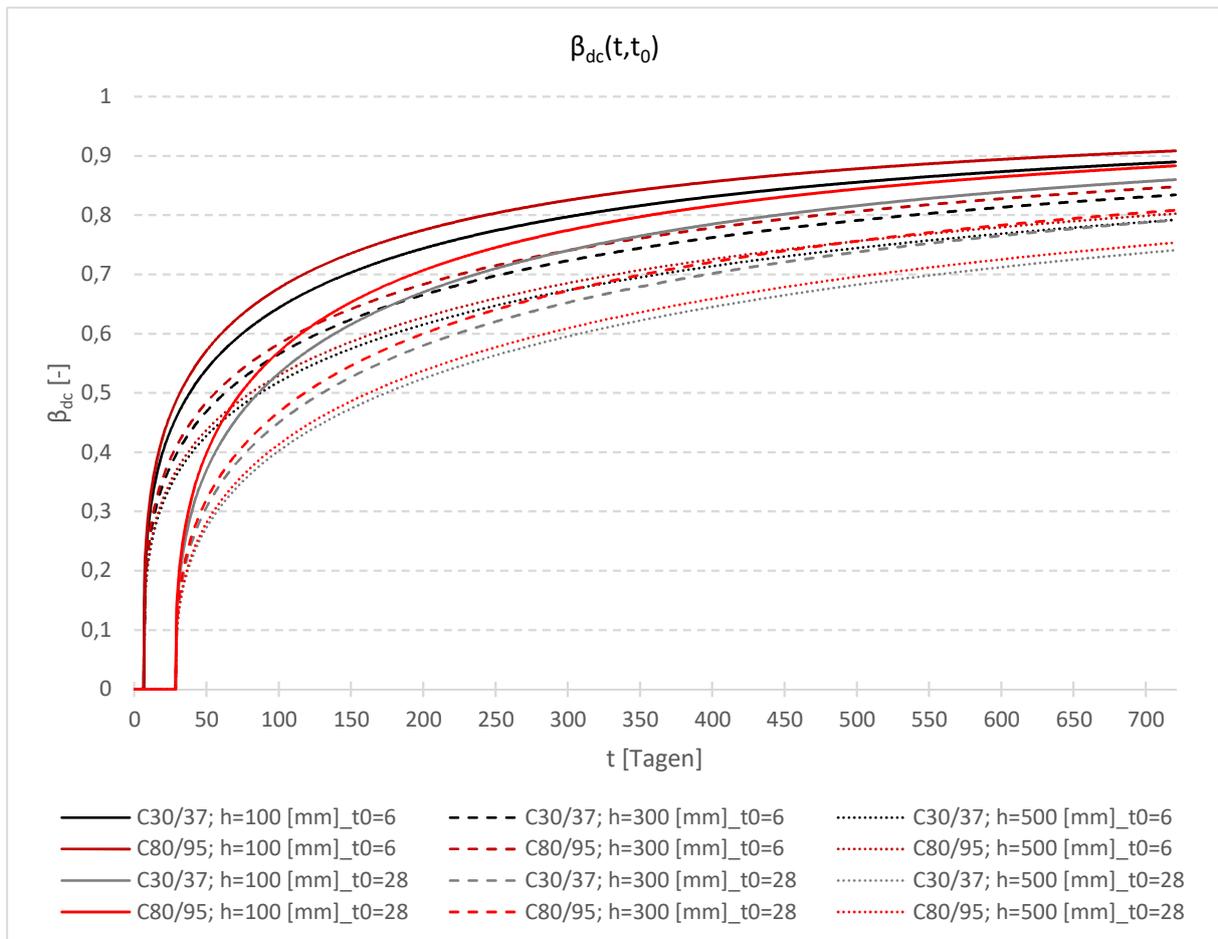


Bild 4.3.9: die Zeitfunktion $\beta_{dc}(t, t_0)$, die von der Druckfestigkeit, der wirksamen Querschnittsdicke und dem Belastungsbeginn abhängt

Bild 4.3.9 und Gleichung (4.3.22) - (4.3.25) zeigen, dass der Einfluss der Betondruckfestigkeit auf die Zeitfunktion $\beta_{dc}(t, t_0)$ gering ist. Je dicker ein Bauteil ist, desto kleiner ist der Wert $\beta_{dc}(t, t_0)$.

$$\beta_{dc}(t_0) = \frac{1}{0,1+t_0^2} \quad (4.3.26)$$

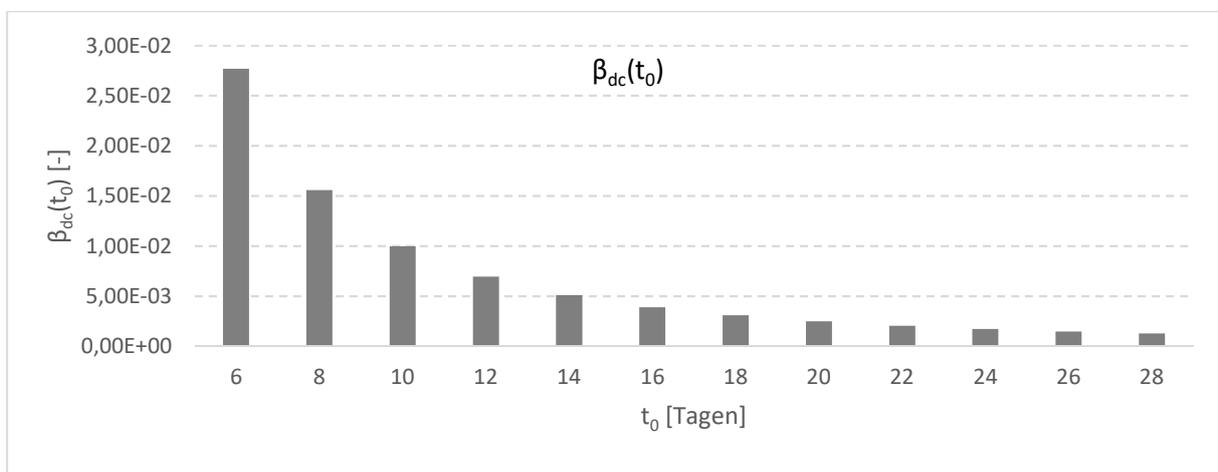


Bild 4.3.10: ein, von dem Belastungsbeginn abhängiger Beiwert, $\beta_{dc}(t_0)$

Einfluss höher Spannungen

Für Belastungsniveaus im Bereich von $0,4x_{f_{cm}}(t_0) < I\sigma_c I < 0,6x_{f_{cm}}(t_0)$ kann die Nichtlinearität des Kriechens durch Gleichung (4.3.27) berücksichtigt werden:

$$\varphi_{\sigma}(t, t_0) = \varphi(t, t_0) \cdot e^{1,5(k_{\sigma}-0,4)} \quad (4.3.27)$$

Dabei ist

$\varphi_{\sigma}(t, t_0)$	die nichtlineare Kriechzahl;
$\varphi(t, t_0)$	die Kriechzahl;
k_{σ}	das Spannungs- Festigkeitsverhältnis.

4.3.4. Elastizitätsmodul nach MC 2010

Werte für den Elastizitätsmodul für Normalbeton mit Gesteinskörnung aus natürlichem Sand oder Kies können aus der angegebenen charakteristischen Festigkeit nach Gleichung (4.3.28) berechnet werden:

$$E_{ci} = E_{c0} \cdot \alpha_E \cdot \left(\frac{f_{ck} + \Delta}{10} \right)^{1/3} \quad (4.3.28)$$

Dabei ist

E_{ci}	der Elastizitätsmodul im Alter von 28 Tagen;
E_{c0}	=21,5x10 ³ [MPa];
f_{ck}	charakteristische Zylinder Druckfestigkeit im Alter von 28 Tagen;
Δf	=8 [MPa];
α_E	ein Beiwert der den Typ der Gesteinskörnung berücksichtigt, der für
	Basalt, dichte Kalkstein: 1,2
	Quarzit: 1,0
	Kalkstein: 0,9
	Sandstein: 0,7

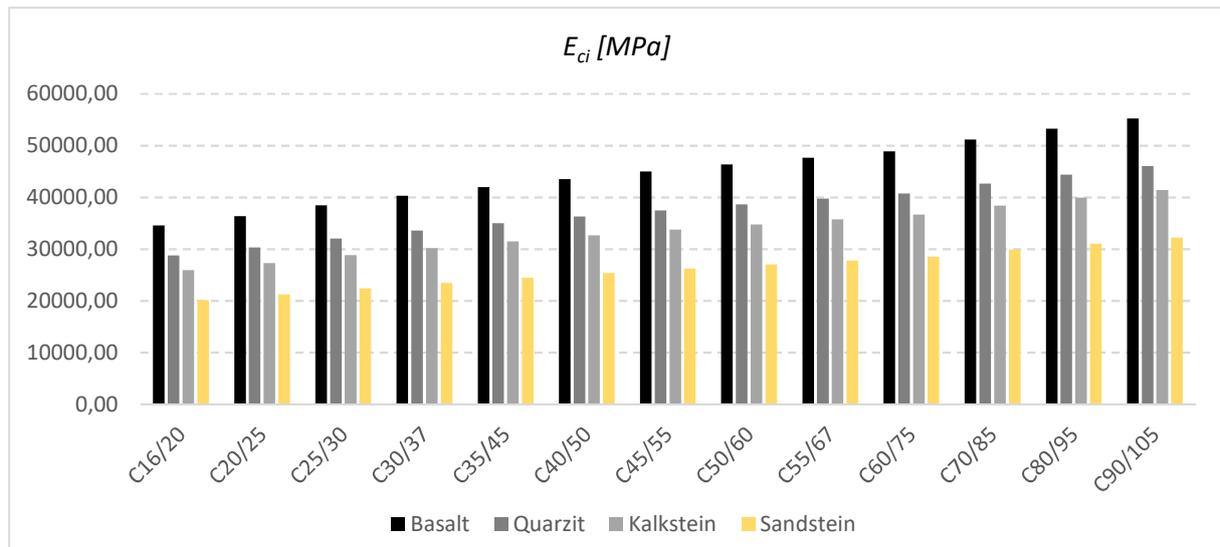


Bild 4.3.11: Elastizitätsmodul nach Model Code 2010, für verschiedene Betonklassen und verschiedenen Gesteinskörnungen

Nach Bild 4.3.11 und Gleichung (4.3.28) hat Beton mit höherer Druckfestigkeit einen größeren Elastizitätsmodul. Beton mit Gesteinskörnung aus Basalt hat einen deutlich größeren Elastizitätsmodul als Beton mit Gesteinskörnung aus Sandstein mit der gleichen Festigkeitsklasse.

Zeitliche Abwicklung des Elastizitätsmoduls

Der Elastizitätsmodul von Beton in einem Alter von t kann nach den Gleichungen (4.3.29) - (4.3.31) berechnet werden:

$$E_{ci}(t) = \beta_E(t) \cdot E_{ci} \quad (4.3.29)$$

$$\beta_E(t) = [\beta_{cc}(t)]^{0,5} \quad (4.3.30)$$

$$\beta_{cc}(t) = \exp\{s \cdot [\frac{28}{t}]^{0,5}\} \quad (4.3.31)$$

Dabei ist

- $E_{ci}(t)$ der Elastizitätsmodul im Alter von t Tagen;
- $\beta_E(t)$ eine Zeitfunktion, grafisch im Bild 4.3.12 und im Bild 4.3.13 dargestellt;
- $\beta_{cc}(t)$ eine Zeitfunktion
- s ein von dem Zementtyp und von der Betondruckfestigkeit abhängiger Beiwert nach Tabelle 4.3.1

f_{cm} [Mpa]	Zementtyp	s
≤ 60	32,5 N	0,38
	32,5 R; 42,5 N	0,25
	45,5 R; 52,5 N; 52,5 R	0,2
>60	alle Klasse	0,2

Tabelle 4.3.1: s Werte für verschiedene Zementtypen und Betonfestigkeitsklassen

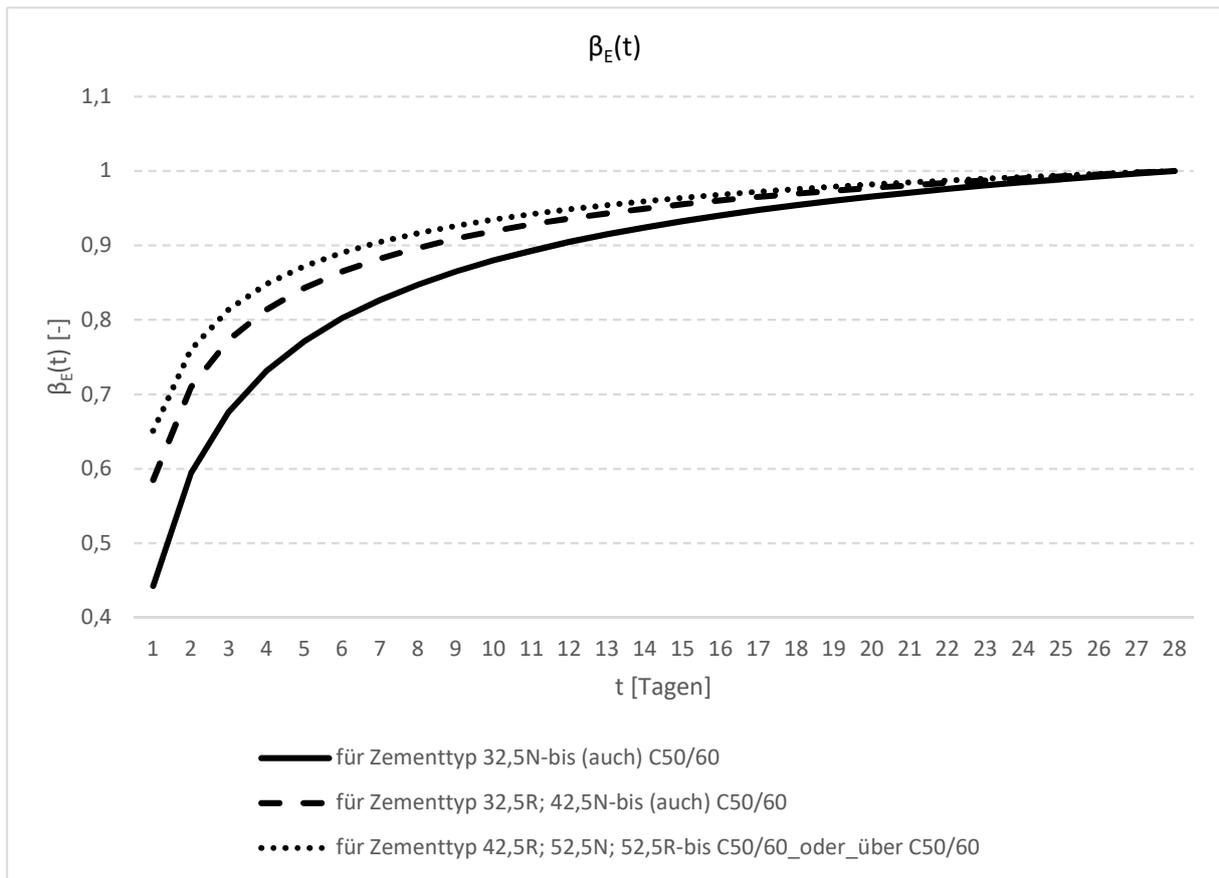


Bild 4.3.12: Die Zeitfunktion $\beta_E(t)$ in den ersten 28 Tagen

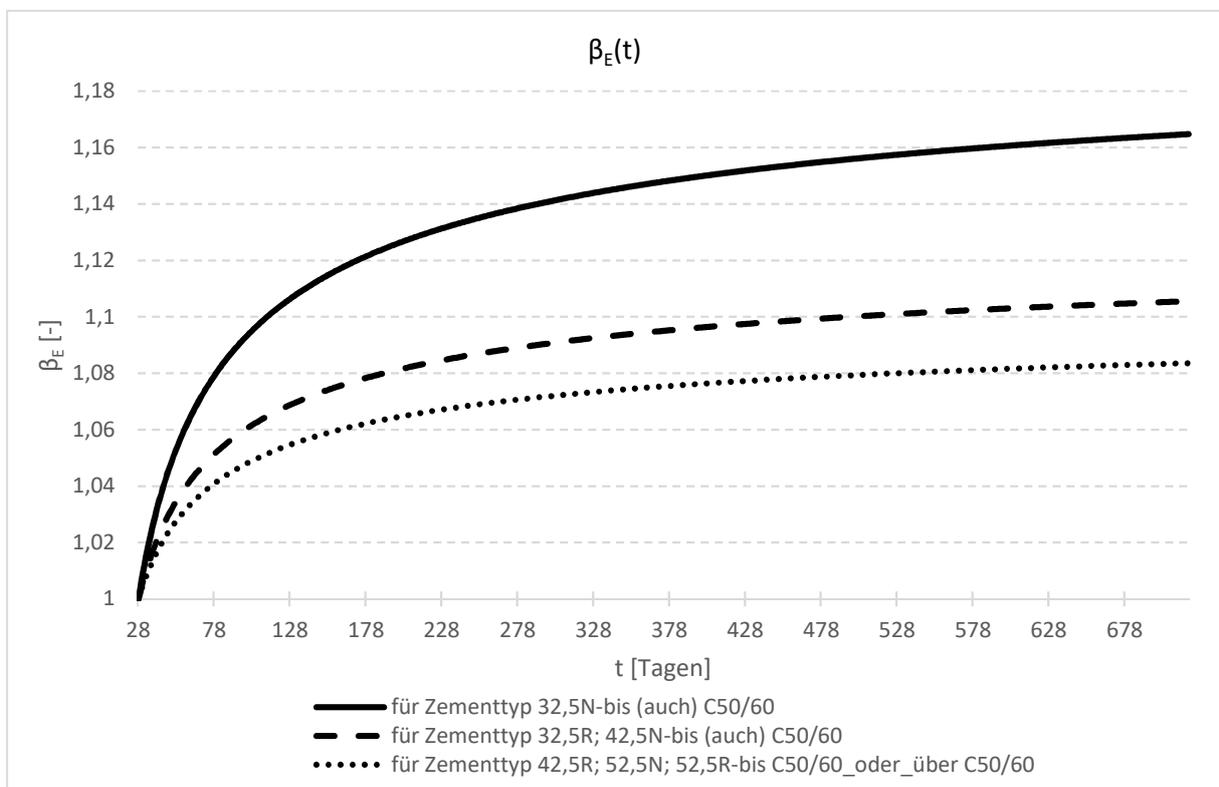


Bild 4.3.13: Die Zeitfunktion $\beta_E(t)$ nach den ersten 28 Tagen

4.3.5. Temperatureffekte nach MC 2010

4.3.5.1. Die Auswirkung von Zementart und Hydratationswärme

Die Auswirkungen der Zementart auf die Kriechzahl des Betons darf durch die Anpassung des Betonalters -nach Gleichung (4.3.32) - bei Belastungsbeginn $t_{0,adj}$ in Gleichung (4.3.18) berücksichtigt werden. Der Wert $t_{0,adj}$ darf wie folgt ermittelt werden:

$$t_{0,adj} = t_{0,T} \cdot \left(\frac{9}{2+t_{0,T}^{1,2}} + 1 \right)^\alpha \geq 0,5 \quad (4.3.32)$$

Dabei ist

$t_{0,T}$ das der Temperatur angepasste Betonalter bei Belastungsbeginn in Tagen, wie nach Eurocode 2, nach Gleichung (4.2.26);

α ein Exponent zur Berücksichtigung der Zementart

$\alpha = -1$ für Zemente der Klasse 32,5N,

$\alpha = 0$ für Zemente der Klasse 32,5R; 42,5N,

$\alpha = 1$ für Zemente der Klasse 42,4R; 52,5N; 52,5R.

Anmerkung:

Model Code 2010 verwendet die gleiche Gleichung - Gleichung (4.3.32) - für die Berücksichtigung der Zementart und Hydratationswärme wie EN 1992-1-1 (Gleichung (4.2.25) nach Eurocode). Für die Werte $\alpha = -1$; $\alpha = 0$; $\alpha = 1$ empfehlen EN 1992-1-1 und MC 2010 aber verschiedene Zementarten.

In dem betrachteten Experiment wurden Zemente der Klasse 42,5N verwendet. Für Zemente der Klasse 42,5N empfehlen EN 1992-1-1 und MC 2010 $\alpha = 0$ zu verwenden.

4.3.5.2. Temperatureffekt auf die Reife des Betons

Die Auswirkung von erhöhten oder erniedrigten Temperaturen auf die Reife des Betons kann durch die Anpassung des Betonalters, gleich wie in Eurocode, nach Gleichung (4.2.26) berücksichtigt werden. MC 2010 empfiehlt das temperaturangepasste Betonalter für Kriechen bis Belastungsbeginn und für Schwinden zu verwenden. MC 2010 schreibt aber nicht vor, dass das temperaturangepasste Betonalter nur bis zu dem Belastungsbeginn bei dem Kriechen des Betons verwendet kann. Der MC 2010 Modell gibt an [5]:

„The effect of elevated or reduced temperatures on the maturity of concrete may be taken into account by adjusting the concrete age”

4.3.5.3. Temperatureffekt auf das Schwinden des Betons

Das Grundswinden wird hauptsächlich durch die zeitliche Entwicklung beeinflusst. Um diesem Effekt Rechnung zu tragen, muss das konkrete Alter t in Gleichung (4.3.7) durch das temperaturangepasste Betonalter t_T nach Gleichung (4.2.26) verwendet werden (die

Auswirkung von erhöhten oder erniedrigten Temperaturen auf die Reife des Betons wird mit MC 2010 Modell gleich wie in Eurocode nach Gleichung (4.2.26) berücksichtigt).

Die Auswirkung einer konstanten Temperatur, die von 20 [° C] abweicht, während der Beton trocknet, wird durch die Gleichungen (4.3.38) - (4.3.45) berücksichtigt.

Die Auswirkung der Temperatur auf die zeitliche Entwicklung des Trocknungsschwindens wird mit $\alpha_{sT}(T)$ berücksichtigt:

$$\alpha_{sT}(T) = 0,0035 \cdot h^2 \cdot \exp[-0,06(T - 20)] \quad (4.3.33)$$

Dabei ist

$\alpha_{sT}(T)$ ein temperaturabhängiger Koeffizient, der „0,035 h²“ in Gleichung (4.3.12) ersetzt.

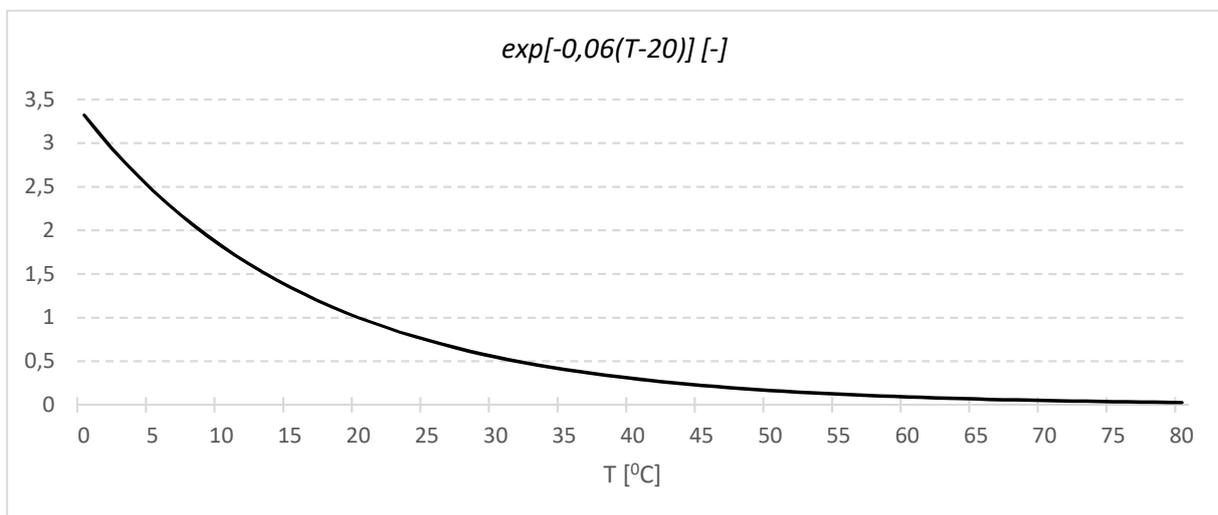


Bild 4.3.18: α_{sT} Werte abhängig von der Temperatur

Die Auswirkung der Temperatur auf die Größe des Trocknungsschwindens wird berücksichtigt durch die Gleichung (4.3.34).

$$\beta_{RH,T} = \beta_{RH} \cdot \beta_{sT} \quad (4.3.34)$$

wobei $\beta_{RH,T}$ ein temperaturabhängiger Koeffizient ist, der β_{RH} in Gleichung (4.3.8) ersetzt. Er wird berechnet mit:

$$\beta_{sT} = 1 + \left(\frac{4}{103-R}\right) \cdot \left(\frac{T-20}{40}\right) \quad (4.3.35)$$

$$\beta_{RH} = -1,55 \cdot \left[1 - \left(\frac{RH}{100}\right)^3\right] \quad \text{für} \quad 40 \leq RH \leq RH_T \quad (4.3.36)$$

$$\beta_{RH} = 0,25 \quad \text{für} \quad RH \geq RH_T \quad (4.3.37)$$

$$RH_T = 99 \cdot \beta_{s1} + \beta_{s1,T} \leq 100\% \quad (4.3.38)$$

$$\beta_{s1} = \left(\frac{35}{f_{cm}}\right)^{0,1} \leq 1,0 \quad (4.3.39)$$

$$\beta_{s1,T} = \left(\frac{T-20}{25}\right)^3 \quad (4.3.40)$$

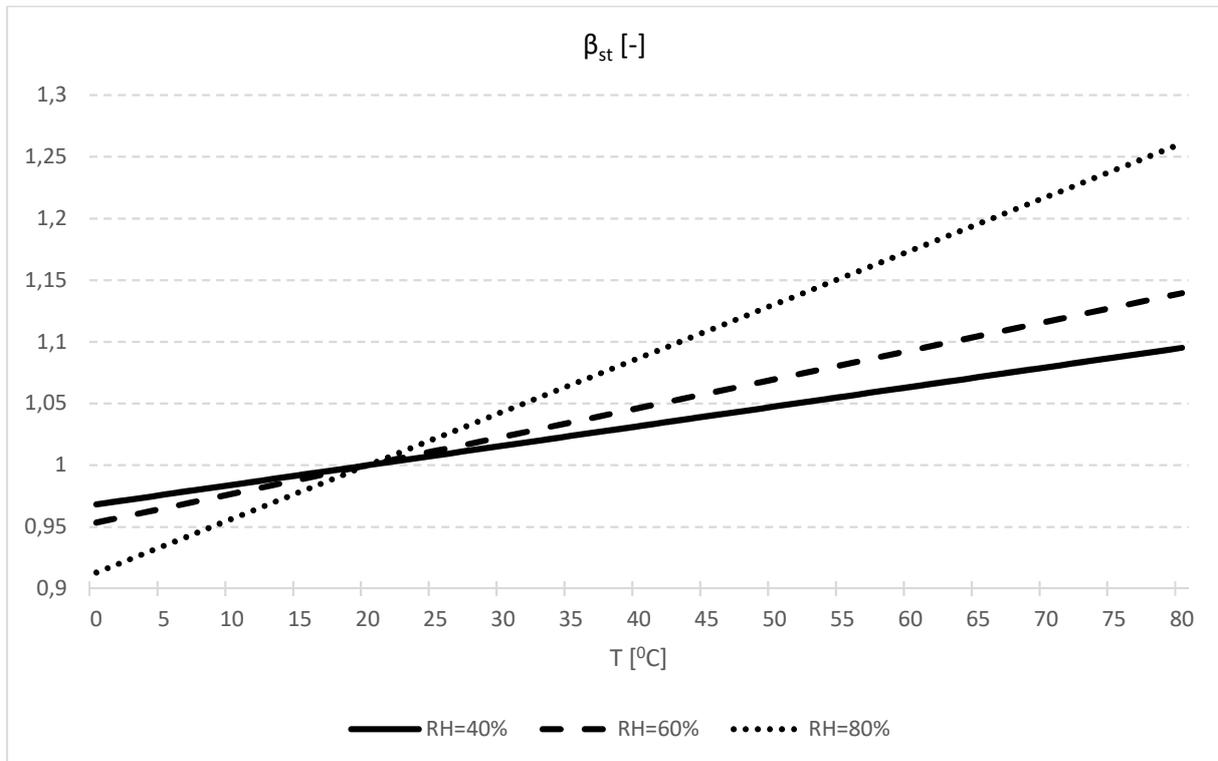


Bild 4.3.19: β_{sT} Werte abhängig von der Temperatur

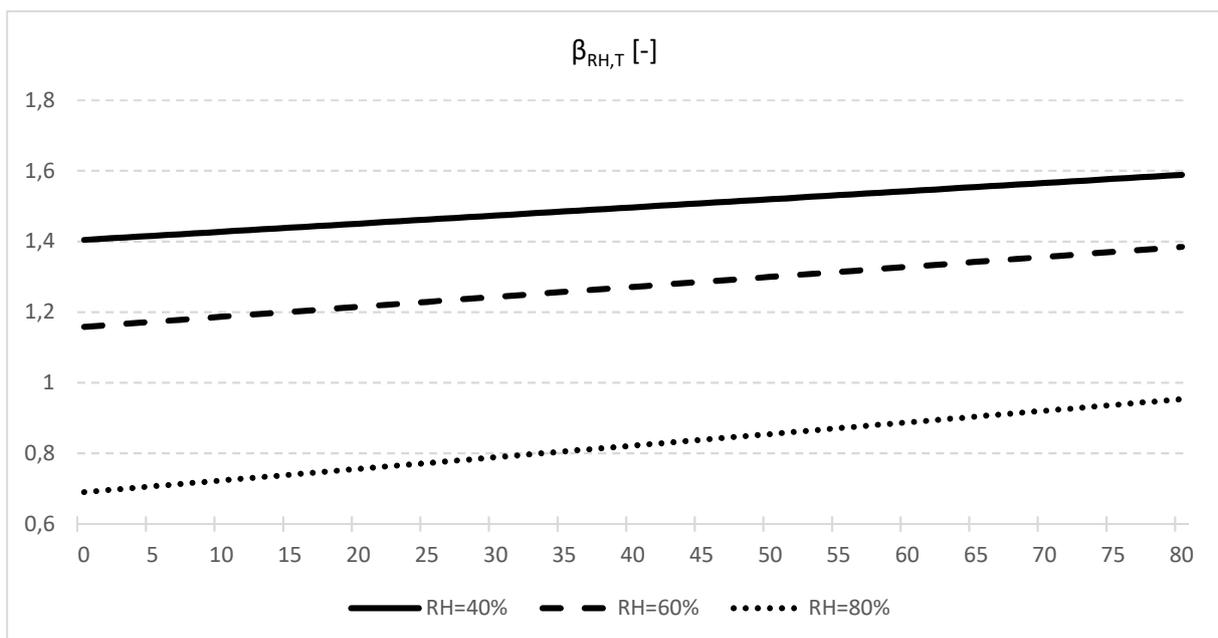


Bild 4.3.20: $\beta_{RH,T}$ Werte abhängig von der Temperatur

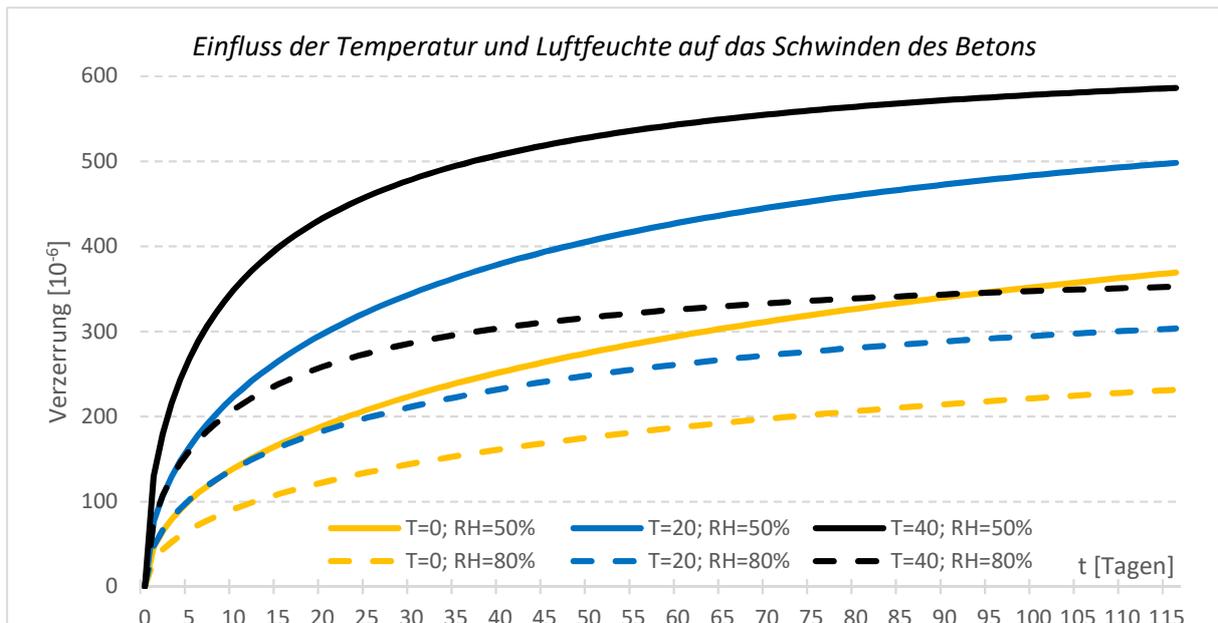


Bild 4.3.21: Einfluss der Temperatur auf das Schwinden- bei $h_0 = 250$ [mm], C30/37 Beton

Nach Bild 4.3.21 wird das Schwinden mit höherer Temperatur und mit kleinerer relativer Luftfeuchte größer.

4.3.5.4. Temperatureffekt auf das Kriechen des Betons

Die Gleichungen (4.3.41) - (4.3.45) beschreiben den Effekt einer konstanten Temperatur, die von 20 [° C] abweicht, während ein Normalfestbeton unter Belastung steht.

Der Wert $\beta_{h,T}$, wird nach Gleichung (4.3.41) berechnet und er wird in die Gleichung (4.3.24) eingesetzt:

$$\beta_{h,T} = \beta_h \cdot \beta_T \quad (4.3.41)$$

$$\beta_T = \exp \left[\frac{1500}{273+T} - 5,12 \right] \quad (4.3.42)$$

Dabei ist

$\beta_{h,T}$ ein temperaturabhängiger Koeffizient, der β_h in Gleichung (4.3.24) ersetzt;

β_h ein Koeffizient nach Gleichung (4.3.24).

Die Auswirkung der Temperatur auf die Kriechzahl wird wie folgt berücksichtigt:

$$\varphi_{bc,T}(T) = \varphi_{bc} \cdot \varphi_T \quad (4.3.43)$$

$$\varphi_{dc,T} = \varphi_{dc} \cdot \varphi_T^{1,2} \quad (4.3.44)$$

$$\varphi_T = \exp[0,015 \cdot (T - 20)] \quad (4.3.45)$$

Dabei ist

$\varphi_{bc,T}$ ein temperaturabhängiger Koeffizient, der φ_{bc} (die Grundkriechzahl) in Gleichung (4.3.15) ersetzt;

- $\varphi_{dc,T}$ ein temperaturabhängiger Koeffizient, der φ_{dc} (die Trocknungskriechzahl) in Gleichung (4.3.15) ersetzt;
- φ_{bc} die Grundkriechzahl nach Gleichung (4.3.16);
- φ_{bc} die Trocknungskriechzahl nach Gleichung (4.3.19).

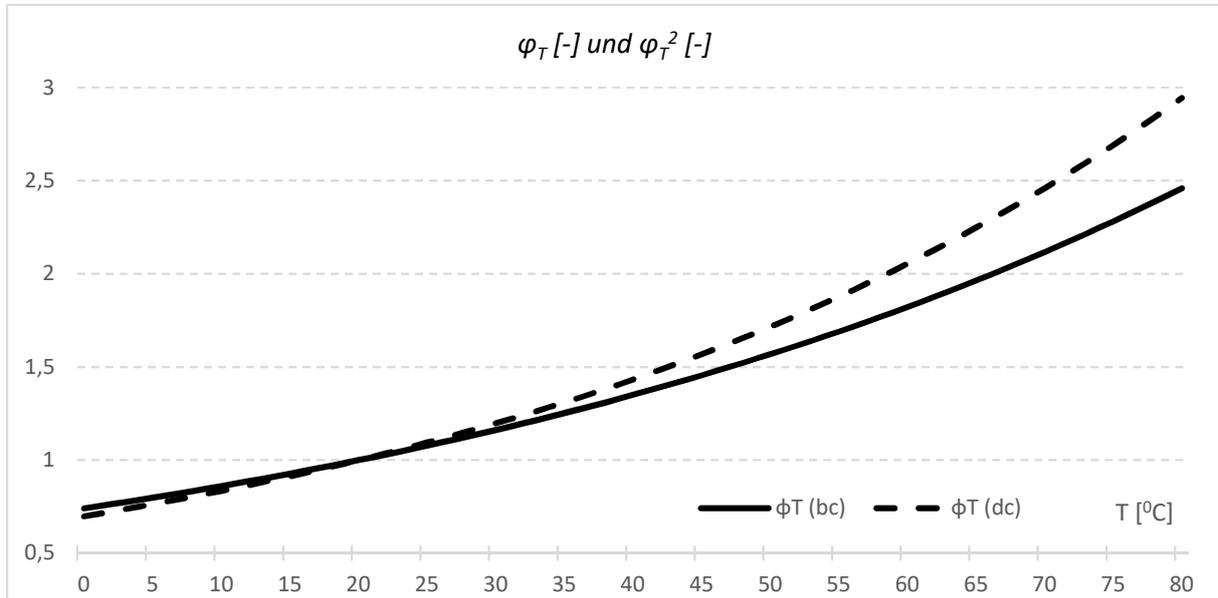


Bild 4.3.15: φ_T und φ_T^2 Werte abhängig von der Temperatur

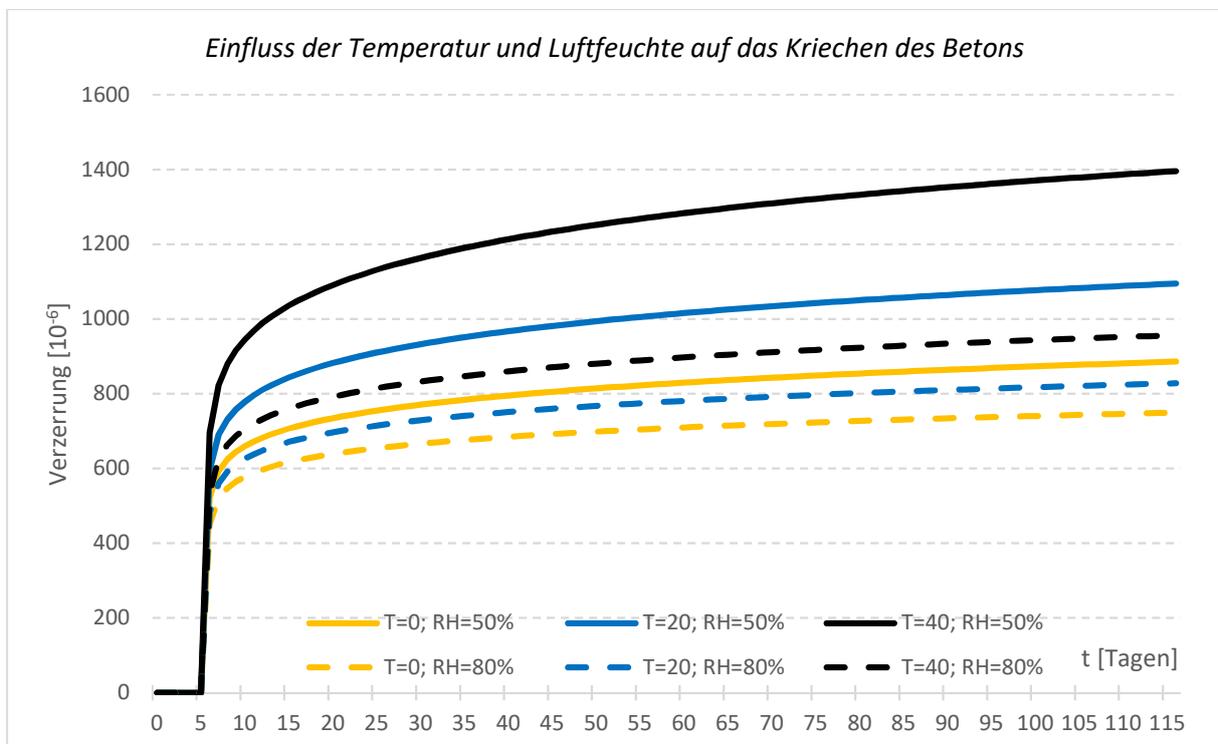


Bild 4.3.17: Einfluss der Temperatur auf das Kriechen- bei $h_0 = 250$ [mm], C30/37 Beton

Nach Bild 4.3.17 wird das Kriechen mit höherer Temperatur und mit kleinerer relativer Luftfeuchte größer.

4.3.6. Vergleich der Ergebnisse des Experiments mit Model Code 2010

4.3.6.1. Schwinden

Bild 4.3.22- 4.3.23; und Bild D.1- D.4 (Bilder D.1- D.4 befinden sich im Anhang D)

Einfluss der Betondruckfestigkeit:

Der Maß des Schwindens nach Model Code 2010 hängt von der mittleren Zylinderdruckfestigkeit des Betons ab, nach Gleichung (4.3.5) - (4.3.6) und Gleichung (4.3.8) - (4.3.9). Die mittlere Zylinderdruckfestigkeit des Betons wurde deswegen nach Model Code 2010 (braune Linie) nach Tabelle 4.2.1 (MC 2010 Modell gibt die gleiche Empfehlung für die Betondruckfestigkeit wie Eurocode 2, EN 1992-1-1) und nach den Laborergebnissen (durchgehende graue Linie; schwarze Linie; rote Linien) nach Kapitel 3.2.1 verwendet.

Einfluss des temperaturangepassten Betonalters:

-horizontale Skalierung der Schwindkurve-

Model Code 2010 empfiehlt für die Berücksichtigung des temperaturangepassten Betonalters für Schwinden die Gleichung (4.2.26). Das temperaturangepasste Betonalter wurde deswegen mit Tagesmittelwerten (rote Linien) nach Bild B.13 und Bild B.14 oder mit einem zu der Messperiode gehörenden Mittelwert (schwarze Linie) nach Tabelle 3.3 berücksichtigt. Die graue Linien und die braune Linie berücksichtigen das temperaturangepasste Betonalter nicht.

Temperatureffekt auf das Schwinden des Betons:

-vertikale Skalierung der Schwindkurve-

Bei der schwarzen und bei den roten Linien wurden die Temperatureffekte nach Gleichung (4.3.33) – (4.3.40) berücksichtigt.

Mit der schwarzen Linie und mit den roten Linien wurden die Gleichungen (4.3.33) - (4.3.40) mit den Mittelwerten der Temperatur über die ganze Messperiode, nach Tabelle 3.3 berechnet. Die anderen Linien (graue Linie; braune Linie) berücksichtigten den Temperatureffekt auf das Schwinden des Betons nicht.

Einfluss der relativen Luftfeuchtigkeit:

Nach Model Code 2010 beeinflusst die relative Luftfeuchte das Trocknungsschwinden nach Gleichung (4.3.8), deswegen wurde der Beiwert $\beta_{RH}(RH)$, der die relative Luftfeuchte berücksichtigt, von den Tagesmittelwerten (gestrichelte Linie) nach Bild 3.21 oder von dem Mittelwert der Luftfeuchte über die ganze Messperiode (durchgehende Linien) nach Gleichung (3.4) berechnet ($RH_{M,S3}= 62,17$ [%]; $RH_{M,S4}=63,22$ [%]).

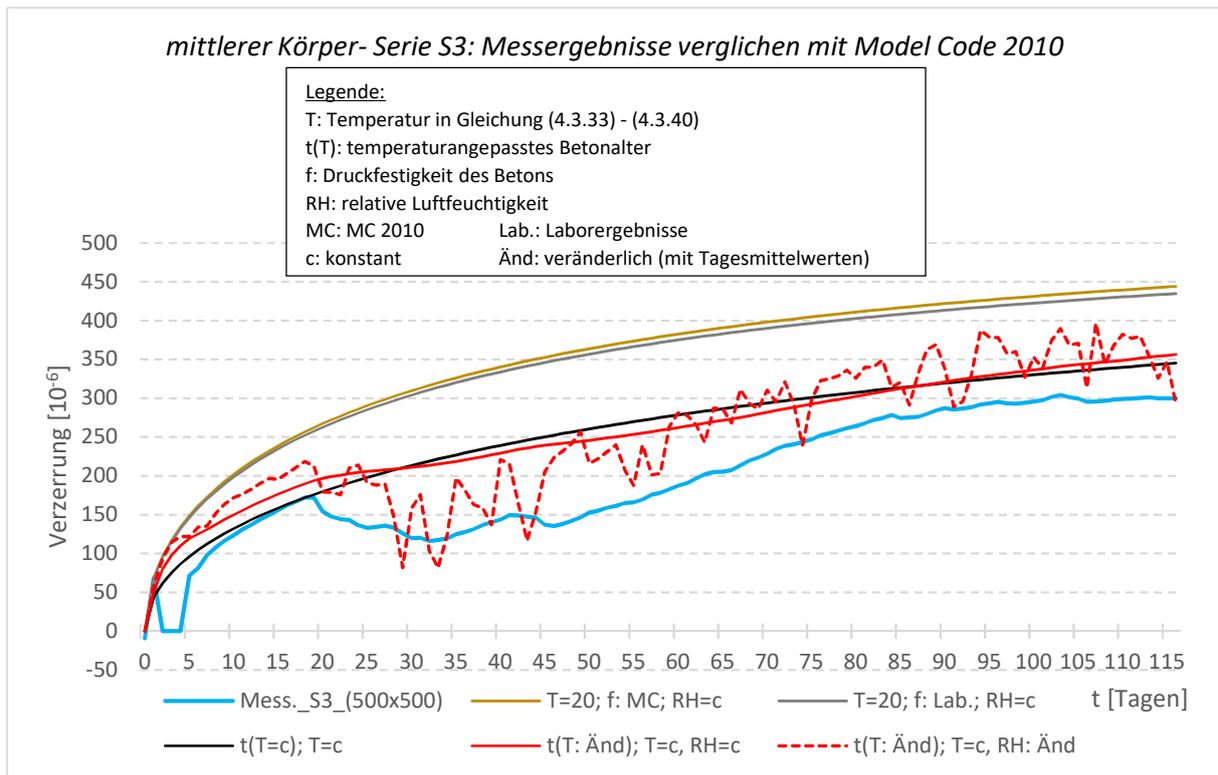


Bild 4.3.22: Schwinden nach Model Code 2010, verglichen mit den Messwerten des Experiments; mittlerer Körper (mit 500x500 [mm] Querschnitt); Serie S3

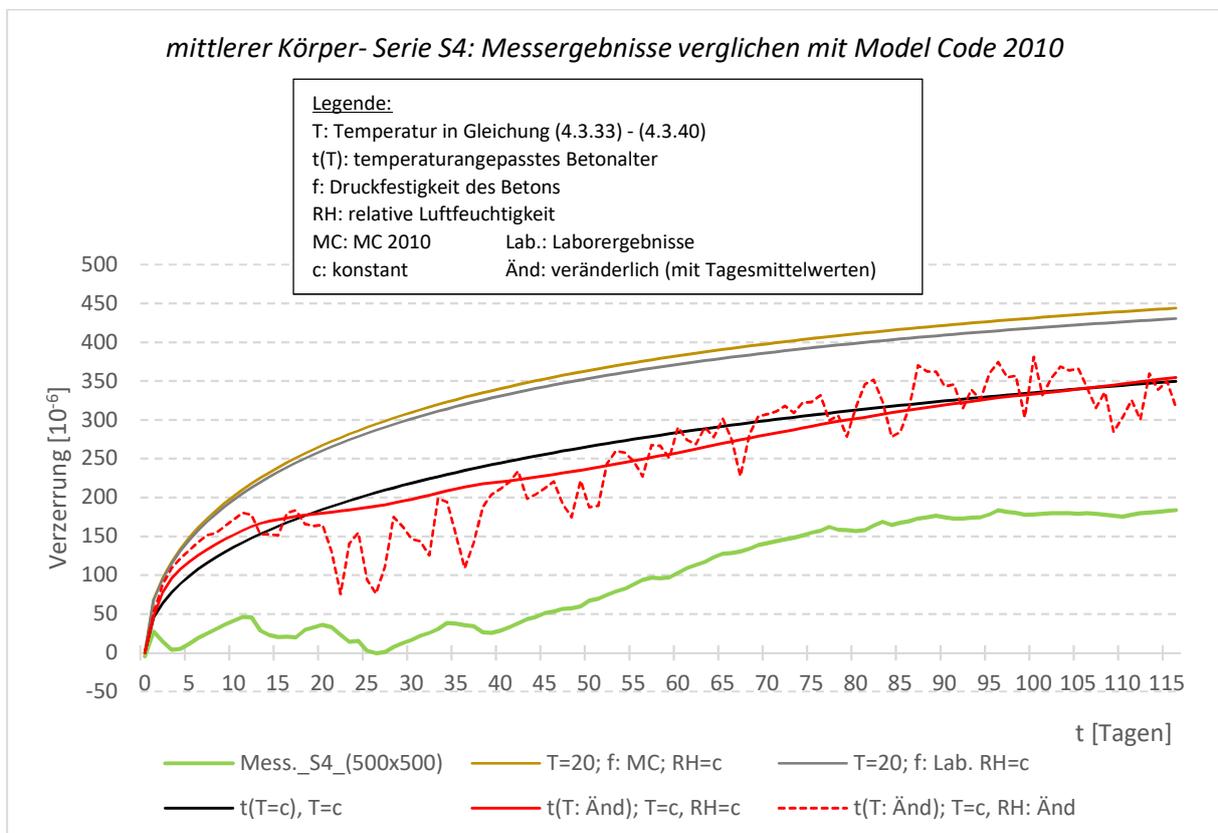


Bild 4.3.23: Schwinden nach Model Code 2010, verglichen mit den Messwerten des Experiments; mittlerer Körper (mit 500x500 [mm] Querschnitt); Serie S4

Auswertung des Schwindens- Bild 4.3.22- 4.3.23; und Bilder D.1- D.4

Die Werte, mit Berücksichtigung des temperaturangepassten Betonalters und des Einflusses der Temperatur auf das Schwinden des Betons (schwarze und rote Linien), sind näher bei den Messwerten und verfolgen auch den Verlauf des Schwindens (Gradienten der Diagramme) besser als die Werte ohne Berücksichtigung des temperaturangepassten Betonalters. Die Berücksichtigung des temperaturangepassten Betonalters mit Tagesmittelwerten (rote Linien) resultierte in ziemlich gutem Einklang mit den Messwerten.

Die Berücksichtigung der relativen Luftfeuchtigkeit mit Tagesmittelwerten (gestrichelte rote Linie) ergab unrealistisch große Schwankungen, aber der Verlauf des Schwindens (Gradienten der Diagramme) wurde besser verfolgt, als wenn die relative Luftfeuchtigkeit mit einem Mittelwert über die Messperiode berücksichtigt wurde (durchgehende rote Linie; schwarze Linie; graue Linien; braune Linie). Der Grund für die Abnahme der Verzerrungen (bei Berücksichtigung der relativen Luftfeuchtigkeit mit Tagesmittelwerten) ist die Schwankung der $\beta_{RH}(RH)$ Werte, in Gleichung (4.3.8) ($\beta_{RH}(RH)$ wurde nach Gleichung (4.3.10) - (4.3.11) berechnet).

Bild 4.3.24 stellt die Werte $\beta_{RH}(RH)$ im Laufe der Zeit für die Serie S3 mit Berücksichtigung der relativen Luftfeuchtigkeit mit Tagesmittelwerten dar.

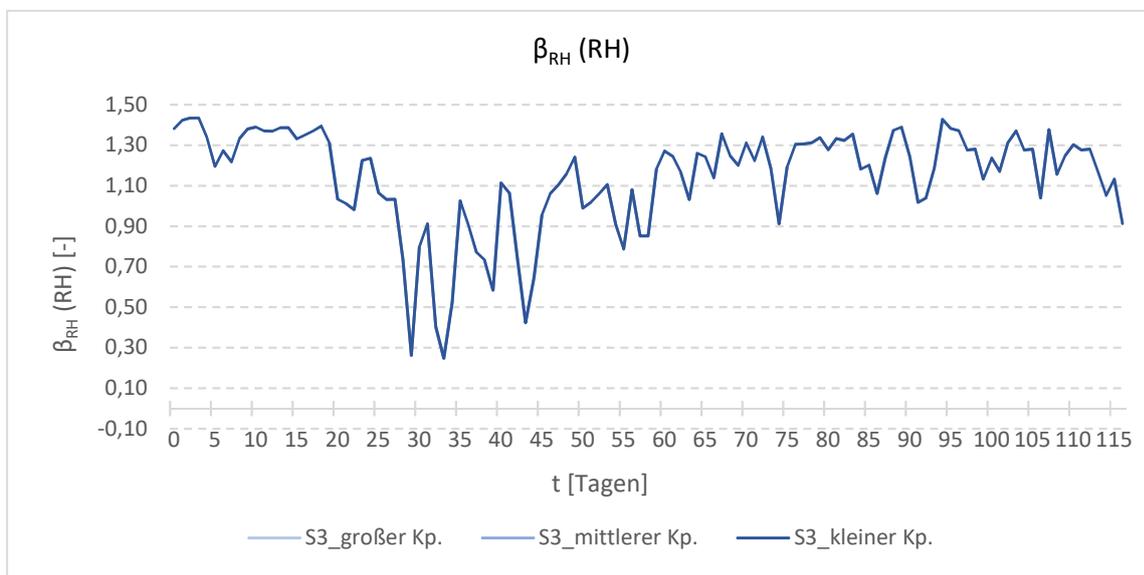


Bild 4.3.24: $\beta_{RH}(RH)$ Werte der Serie S3 im Laufe der Zeit

Bild 4.3.24 zeigt die Werte $\beta_{RH}(RH)$ mit der Berücksichtigung des Temperatureffekts auf das Schwinden des Betons nach den Gleichungen (4.3.34) – (4.3.40). Wie schon geschrieben wurde, wurde in die Gleichungen (4.3.34) - (4.3.40) die Temperatur mit den Mittelwerten der Temperatur über die ganze Messperiode nach Tabelle 3.3 eingesetzt.

4.3.6.2. Kriechen

Bild 4.3.25- 4.3.26; und Bild D.5- D.8 (Bild D.5- D.8 befindet sich im Anhang D)

Die Betondruckspannungen in Körper ergaben sich nach Tabelle 3.5 zwischen 9,43 und 10,00 [N/mm²]. Die mittleren Betondruckspannungen haben die Grenze $0,4 \cdot f_{cm}$ ($0,4 \cdot 38 = 15,2$ [N/mm²]) nicht erreicht, deswegen ist es erlaubt mit linearem Kriechen zu berechnen.

Einfluss des Elastizitätsmoduls und der Druckfestigkeit des Betons:

Der Elastizitätsmodul beeinflusst die elastische Dehnung, nach Gleichung (2.5), deswegen wurden die Werte des Elastizitätsmoduls gemäß Model Code 2010 (punktierte graue Linie) nach den Gleichungen (4.3.28) - (4.3.31) gemäß den Laborergebnissen (gestrichelte graue Linie) nach Kapitel 3.2.3.1 und gemäß den In-situ-Messungen (durchgehende graue Linie; schwarze Linie; rote Linien) nach Kapitel 3.2.3.2 verwendet.

Bei der Annahme des Elastizitätsmoduls nach Model Code 2010 wurde auch die mittlere Zylinderdruckfestigkeit des Betons, in Gleichung (4.3.16) - (4.3.17), in Gleichung (4.3.19) - (4.3.20) und in Gleichung (4.3.24) - (4.3.25) nach Model Code 2010 verwendet. Model Code empfiehlt für die verschiedenen Betonklassen die gleiche mittlere Zylinderdruckfestigkeit wie EN 1992-1-1, deswegen wurde die mittlere Zylinderdruckfestigkeit des Betons in diesem Fall nach Tabelle 4.2.1 ($f_{cm} = 38$ [N/mm²]) verwendet.

Bei der Annahme des Elastizitätsmoduls nach den Laborergebnissen wurde auch die mittlere Zylinderdruckfestigkeit des Betons in Gleichung (4.3.16) - (4.3.17), in Gleichung (4.3.19) - (4.3.20) und in Gleichung (4.3.24) - (4.3.25) nach den Laborergebnissen nach Kapitel 3.2.1 verwendet.

Bei der Annahme des Elastizitätsmoduls nach den In-situ-Messungen wurde die mittlere Zylinderdruckfestigkeit des Betons in Gleichung (4.3.16) - (4.3.17), in Gleichung (4.3.19) - (4.3.20) und in Gleichung (4.3.24) - (4.3.25) nach Model Code 2010 (braune Linie) und nach den Laborergebnissen (durchgehende graue Linie; schwarze Linie; rote Linien) verwendet, um auch den Einfluss der Betondruckfestigkeit untersuchen zu können.

Bei der Annahme des Elastizitätsmoduls nach den In-situ-Messungen ist der Elastizitätsmodul zum Zeitpunkt der Belastung (Vorspannung) bekannt ($t = 6$ Tage). Nach Gleichung (4.3.29) - (4.3.31) wurde der Elastizitätsmodul zum Zeitpunkt $t = 28$ Tage bestimmt. Der Elastizitätsmodul zum Zeitpunkt $t = 28$ Tage ist wichtig für die Bestimmung der Kriechverformung nach Gleichung (4.3.14).

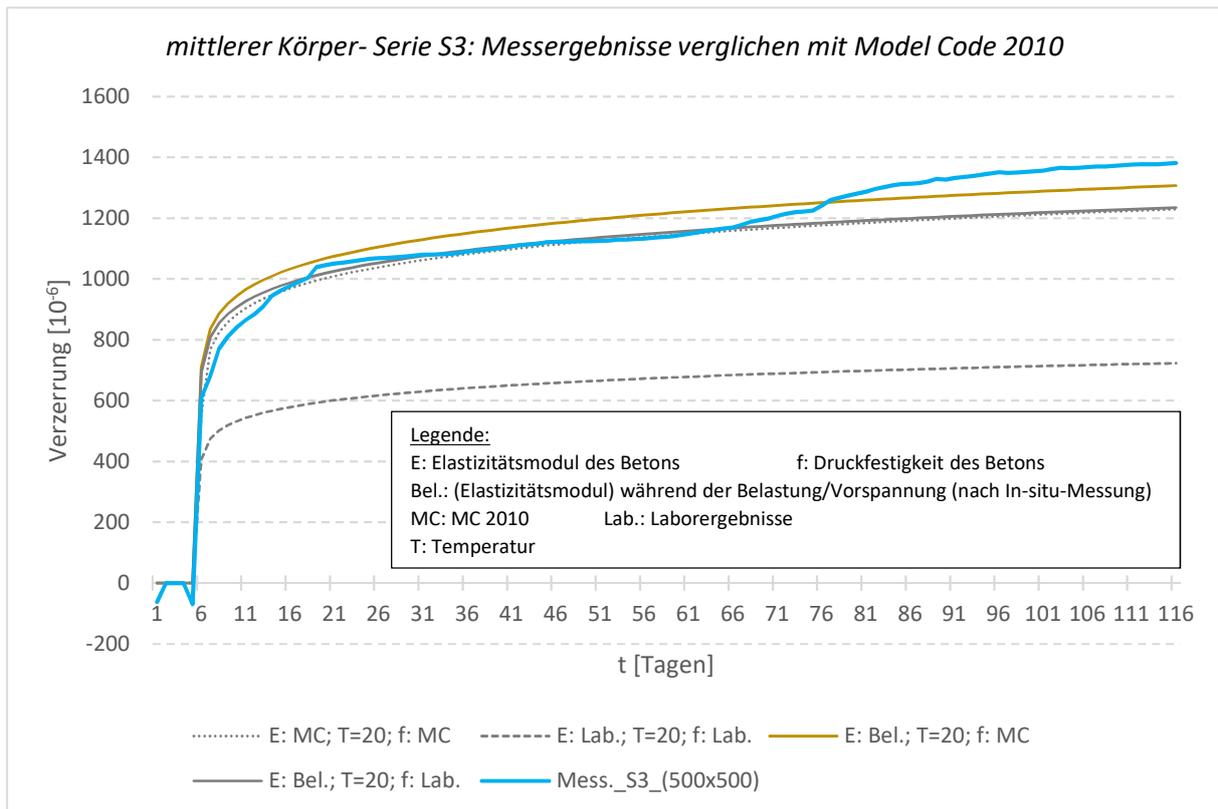


Bild 4.3.25: Kriechen nach Model Code 2010, verglichen mit den Messwerten des Experiments; mittlerer Körper (mit 500x500 [mm] Querschnitt); Serie S3

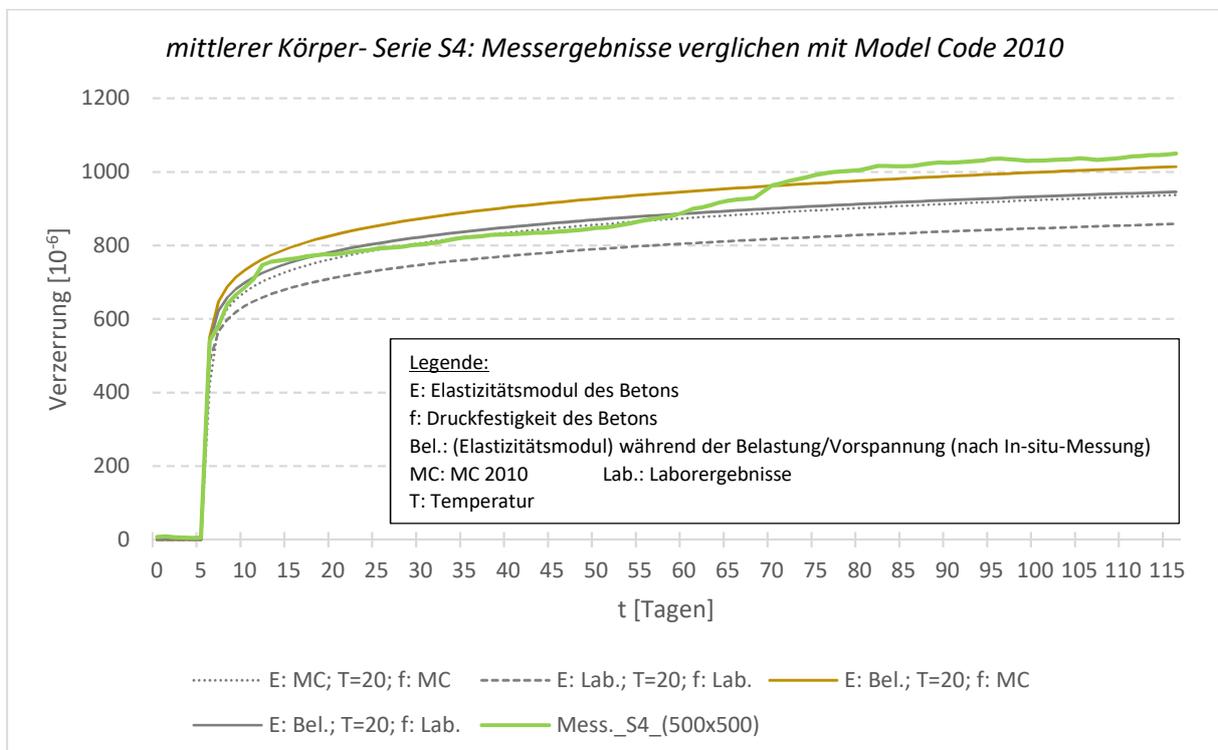


Bild 4.3.26: Kriechen nach Model Code 2010, verglichen mit den Messwerten des Experiments; mittlerer Körper (mit 500x500 [mm] Querschnitt); Serie S3

Auswertung des Kriechens- Bild 4.3.25-4.3.26 und Bilder D.5- D.8:

Einfluss des Elastizitätsmoduls:

(graue Linien verglichen mit den Messwerten)

Gute Übereinstimmung zeigte die Berechnung mit den Messergebnissen, wenn der Elastizitätsmodul nach den In-situ-Messungen oder nach dem Model Code 2010 verwendet wurde. Der größte Unterschied zwischen den Messergebnissen und der Berechnung ergab sich bei der Serie S3 mittlerer Körper (mit 500x500 [mm] Querschnitt) und bei der Serie S3, kleiner Körper (mit 250x250 [mm] Querschnitt), wenn der Elastizitätsmodul nach den Laborergebnissen angenommen wurde.

Einfluss der Betondruckfestigkeit:

(durchgehende graue Linie und braune Linie verglichen mit den Messwerten)

Ob die Betondruckfestigkeit nach Model Code 2010 oder nach den Laborergebnissen berücksichtigt wurde, beeinflusste die Ergebnisse erheblich. Wenn die Festigkeit nach Laborergebnissen verwendet wurde, resultierten größere Verzerrungen in den Körpern (die Betondruckfestigkeit war größer nach den Laborergebnissen als nach dem Model Code 2010).

Bild 4.3.27- 4.3.28; und Bild D.5- D.8 (Bilder D.5- D.8 befinden sich im Anhang D)

Einfluss des temperaturangepassten Betonalters:

-die horizontale Skalierung der Kriechkurve-

Der Model Code empfiehlt die Berücksichtigung des temperaturangepassten Betonalters wie Eurocode 2 nach Gleichung (4.2.26) anzuwenden. Das temperaturangepasste Betonalter wurde mit Tagesmittelwerten (rote Linien) nach Bild 3.22 und nach Bild 3.23 oder mit einem zu der Messperiode gehörenden Mittelwert (schwarze Linie) nach Tabelle 3.3 berücksichtigt. Die braune Linie und die graue Linie berücksichtigten das temperaturangepasste Betonalter nicht (auch im Bild 4.3.25 und im Bild 4.3.26).

Temperatureffekt auf das Kriechen des Betons:

-die vertikale Skalierung der Kriechkurve, mit Skalierung ausgewählter Terme-

Mit den Gleichungen (4.3.41) - (4.3.45) gibt es die Möglichkeit den Temperatureffekt auf das Kriechen des Betons zu berücksichtigen.

Mit der schwarzen Linie und mit den roten Linien wurden die Gleichungen (4.3.41) - (4.3.45) mit den Mittelwerten der Temperatur über die ganze Messperiode nach Tabelle 3.3 berechnet. Die braune Linie und die graue Linien berücksichtigten den Temperatureffekt auf das Kriechen des Betons nicht (auch im Bild 4.3.25 und im Bild 4.3.26).

Einfluss der relativen Luftfeuchtigkeit:

Mit Gleichung (4.3.21) gibt es die Möglichkeit die relative Luftfeuchte zu berücksichtigen.

Die durchgehenden Linien und die grauen Linien berücksichtigten die relative Luftfeuchte mit dem Mittelwert der relativen Luftfeuchte über die ganze Messperiode (nach Gleichung (3.4): $RH_{M,S3}=62,17$ [%]; $RH_{M,S4}=63,22$ [%]).

Die gestrichelte rote Linie berücksichtigte die relative Luftfeuchte mit Tagesmittelwerten nach Bild 3.21.

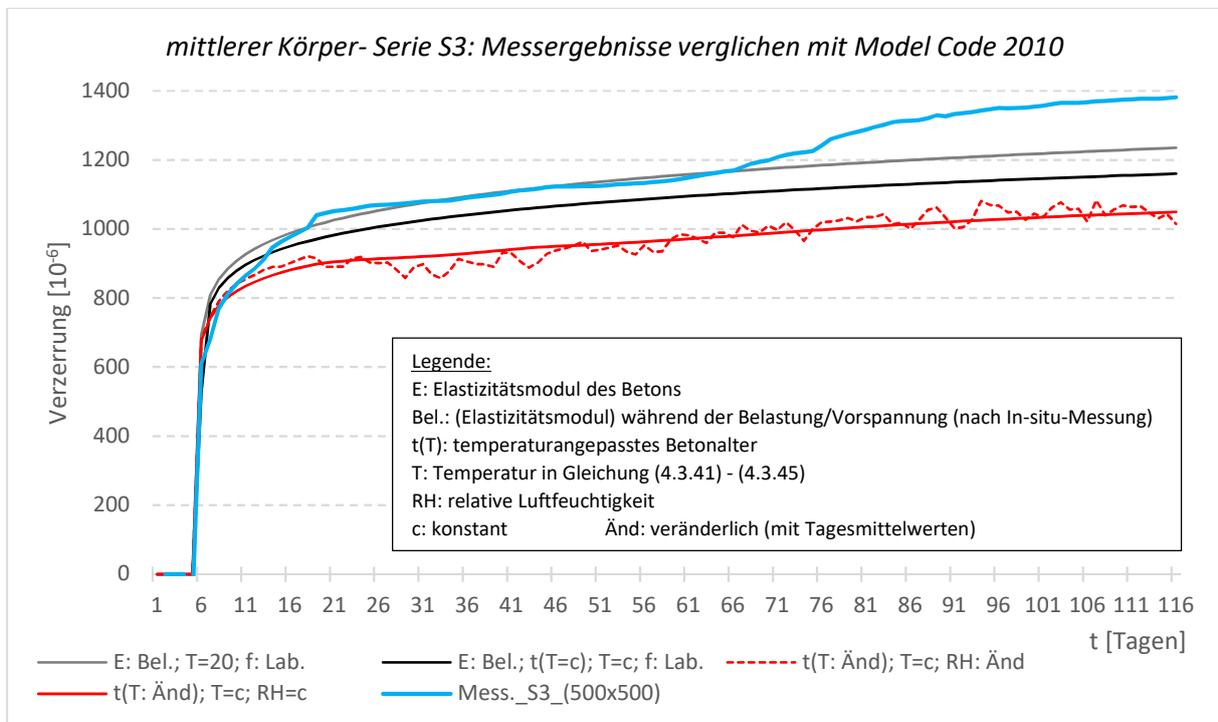


Bild 4.3.27: Kriechen nach Model Code 2010, verglichen mit den Messwerten des Experiments; mittlerer Körper (mit 500x500 [mm] Querschnitt); Serie S3

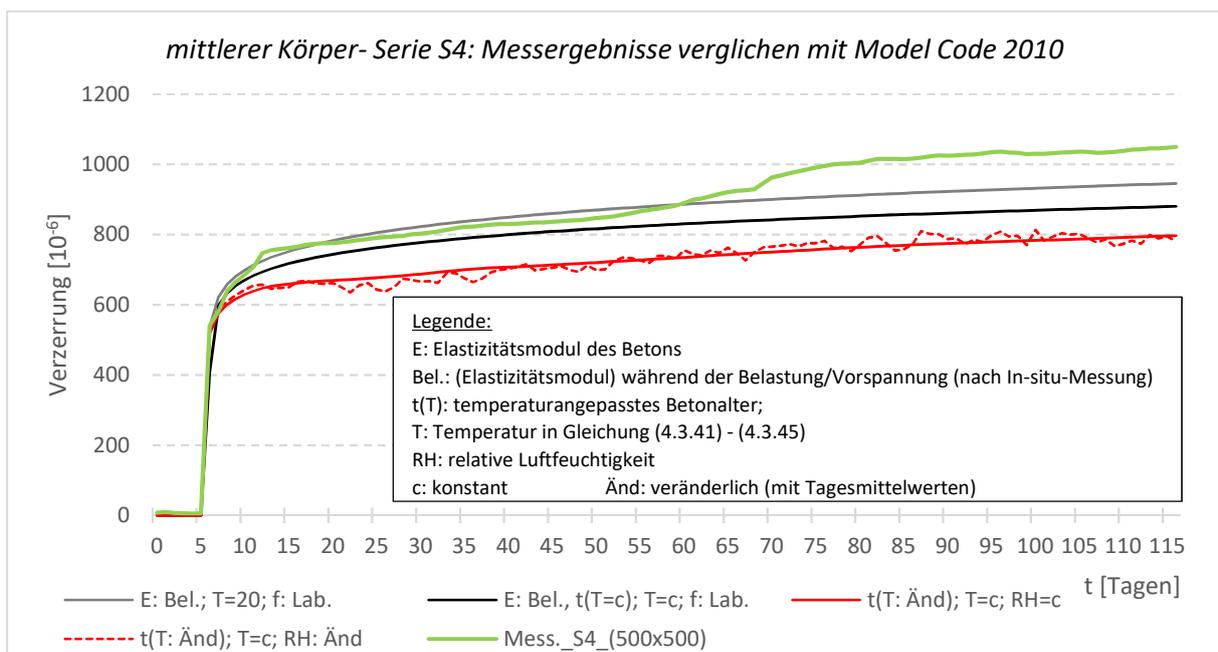


Bild 4.3.28: Kriechen nach Model Code 2010, verglichen mit den Messwerten des Experiments; mittlerer Körper (mit 500x500 [mm] Querschnitt); Serie S4

Auswertung des Kriechens- Bild 4.3.27-4.3.28 und Bilder D.5- D.8:

Einfluss der Temperatur:

(graue Linien, schwarze Linie und rote Linien verglichen mit den Messwerten)

Mit der Berücksichtigung der Temperatur auf das Kriechen des Betons und des temperaturangepassten Betonalters näherte sich der Verlauf (Gradienten der Diagramme) den Messergebnissen besser als mit den Werte, die die Temperatur und das temperaturangepasste Betonalter nicht berücksichtigten. Mit der Berücksichtigung des temperaturangepassten Betonalters mit Tagesmittelwerten folgten die Tendenzen der Berechnungswerten (Gradienten der Diagramme) am besten den Messergebnissen.

Einfluss der relativen Luftfeuchtigkeit:

(rote Linien verglichen mit den Messwerten)

Die Berücksichtigung der relativen Luftfeuchtigkeit mit Tagesmittelwerten resultierte in Abnahmen in den Verzerrungen. Rückgänge in den Dehnungen sind physikalisch aber nicht korrekt, weil die Dehnungen infolge von Kriechen, unter konstanten Spannungen nicht abnehmen dürfen. Der Grund für die Abnahme der Dehnungen ist die Schwankung der $\beta(RH)$ Werte, in Gleichung (4.3.19) ($\beta(RH)$ wurde nach Gleichung (4.3.21) berechnet).

Bild 4.3.29 stellt der Werte $\beta_{RH}(RH)$ im Laufe der Zeit dar, für die Serie S3 mit Berücksichtigung der relativen Luftfeuchtigkeit mit Tagesmittelwerten.

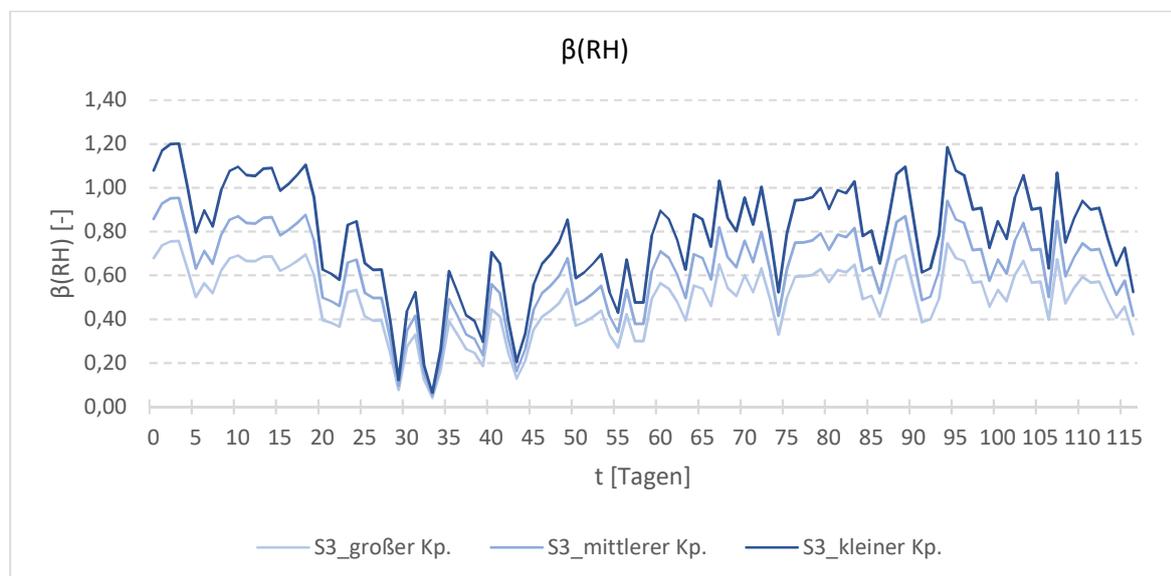


Bild 4.3.29 $\beta_{RH}(RH)$ Werte im Laufe der Zeit; Serie S3

4.4. RILEM Modell B4

nach [28];

Die Gesamtdehnung eines Betonkörpers $\varepsilon(t)$ zum Zeitpunkt t , der mit einer konstanten Spannung σ ab dem Zeitpunkt t' einachsrig belastet ist, kann nach dem RILEM Modell B4 nach Gleichung (4.4.1) berechnet werden:

$$\varepsilon(t) = J(t, t') \cdot \sigma + \varepsilon_{sh}(t) + \varepsilon_{au}(t) + \alpha \cdot \Delta T(t) \quad (4.4.1)$$

Dabei ist

$J(t, t')$	die Kriechfunktion;
σ	die mittlere Spannung in dem betrachteten Körper;
$\varepsilon_{sh}(t)$	die Trocknungsschwinddehnung;
$\varepsilon_{au}(t)$	die autogene Schwinddehnung;
α	der Temperatúrausdehnungskoeffizient;
$\Delta T(t)$	die Temperaturänderung, Bezug auf die Referenztemperatur zum Zeitpunkt t .

4.4.1. Anwendungsbereich- Modell B4

Das vorliegende Modell ist für Portlandzementbeton mit folgenden Parameterbereichen beschränkt:

- 1) $0,22 \leq w/c \leq 0,87$
- 2) $1,0 \leq a/c \leq 13,2$
- 3) $15 [MPa] \leq \bar{f}_c \leq 70 [MPa]$
- 4) $200 [kg/m^3] \leq c \leq 1500 [kg/m^3]$
- 5) $\sigma \leq 0,45 \cdot \bar{f}_c$
- 6) $-25 \text{ } ^\circ\text{C} \leq T \leq 75 \text{ } ^\circ\text{C}$

Dabei ist

w/c	der Wasserzementwert;
a/c	das Aggregat-Zement Verhältnis;
c	der Zementgehalt;
\bar{f}_c	die mittlere Zylinderdruckfestigkeit des Betons;
σ	die mittlere Spannung in dem betrachteten Körper;
T	die Temperatur in [$^\circ\text{C}$].

4.4.2. Schwinden nach Modell B4

$$\varepsilon_{sh,tot}(t, t_0) = \varepsilon_{sh}(t, t_0) + \varepsilon_{au}(t) \quad (4.4.2)$$

Dabei ist

- $\varepsilon_{sh,tot}(t, t_0)$ das gesamte Schwinden zum Zeitpunkt t ;
- $\varepsilon_{sh}(t, t_0)$ das Trocknungsschwinden zum Zeitpunkt t ;
- $\varepsilon_{au}(t)$ das autogene Schwinden.

Trocknungsschwinden

$$\varepsilon_{sh}(t, t_0) = -\varepsilon_{sh}^{\infty}(t_0) \cdot k_h \cdot S(t, t_0) \quad (4.4.3)$$

$$\varepsilon_{sh}^{\infty}(t_0) = \varepsilon_s^{\infty} \cdot \frac{E(7+600)}{E(t_0+\tau_{sh})} \quad (4.4.4)$$

$$\varepsilon_s^{\infty} = k_{\varepsilon a} \cdot \varepsilon_{cem} \cdot \left(\frac{a}{6}\right)^{-0,8} \cdot \left(\frac{w}{c}\right)^{p_{\varepsilon w}} \cdot \left(\frac{6,5c}{\rho}\right)^{0,11} \quad (4.4.5)$$

$$k_h = 1 - h_{env}^3 \quad \text{für} \quad h_{env} \leq 0,98 \quad (4.4.6-1)$$

$$k_h = 12,94 \cdot (1 - h_{env}) - 0,2 \quad \text{für} \quad 0,98 \leq h_{env} \leq 1 \quad (4.4.6-2)$$

$$S(t, t_0) = \tanh \sqrt{\frac{t-t_0}{\tau_{sh}}} \quad (4.4.7)$$

$$\tau_{sh} = \tau_0 \cdot k_{\tau a} \cdot \left(k_s \cdot \frac{D}{1mm}\right)^2 \quad (4.4.8)$$

$$\tau_0 = \tau_{cem} \cdot \left(\frac{a}{6}\right)^{-0,33} \cdot \left(\frac{w}{c}\right)^{p_{\tau w}} \cdot \left(\frac{6,5c}{\rho}\right)^{p_{\tau c}} \quad (4.4.9)$$

$$D = 2 \cdot \frac{v}{s} \quad (4.4.10)$$

Dabei ist

- $\varepsilon_{sh}(t_0)$ die theoretische Größe des Endschwindens für das Trocknungsschwinden bei einer Umgebungsfeuchtigkeit von Null;
- k_h ein, von der Umgebungsfeuchte abhängiger Beiwert;
- $S(t, t_0)$ eine Zeitfunktion, grafisch im Bild 4.4.5 und im Bild 4.4.6 dargestellt;
- $E(t)$ die zeitliche Abwicklung des Elastizitätsmoduls nach Kapitel 4.4.4;
- h_{env} die relative Luftfeuchtigkeit der Umgebung;

- D die effektive Querschnittsdicke in [mm];
- v/s das Volumen zu Oberfläche Verhältnis;
- k_s ein Beiwert, der von der Querschnittsform abhängt:
- $k_s=1,00$ für unendliche Platte (4.4.11-1)
- $k_s=1,15$ für unendliche Zylinder (4.4.11-2)
- $k_s=1,25$ für unendliche quadratische Prisma (4.4.11-3)
- $k_s=1,30$ für Kugel (4.4.11-4)
- $k_s=1,30$ für Würfel (4.4.11-5)
- τ_0 eine Funktion, grafisch in den Bildern 4.4.1 - 4.4.3 dargestellt;
- τ_{sh} eine Funktion, grafisch im Bild 4.4.4 dargestellt;
- $k_{\tau a}, k_{\epsilon a}$ von der Art der Gesteinskörnung abhängige Beiwerten, nach Tabelle 4.4.1;
- $\tau_{cem}, \rho_{\tau w}, \rho_{\tau c}, \rho_{\epsilon w}, \epsilon_{cem}$ von dem Zementtyp abhängige Beiwerte, nach Tabelle 4.4.2.

Art der Gesteinskörnung	$k_{\tau a}$	$k_{\epsilon a}$
Diabas	0,06	0,76
Quarzit	0,59	0,71
Kalkstein	1,80	0,95
Sandstein	2,30	1,60
Granit	4,00	1,05
Quarz Diorit	15,00	2,20

Tabelle 4.4.1: $k_{\tau a}$ und $k_{\epsilon a}$ Werte für verschiedene Gesteinskörnungen

Parameter	Zementtyp		
	N	R	S
τ_{cem}	0,016	0,080	0,010
$\rho_{\tau w}$	-0,06	-2,40	3,55
$\rho_{\tau c}$	-0,10	-2,70	3,80
ϵ_{cem}	360×10^{-6}	860×10^{-6}	410×10^{-6}
$\rho_{\epsilon w}$	1,10	-0,27	1,00

Tabelle 4.4.2: Verschiedene Beiwerte für verschiedene Zementtypen

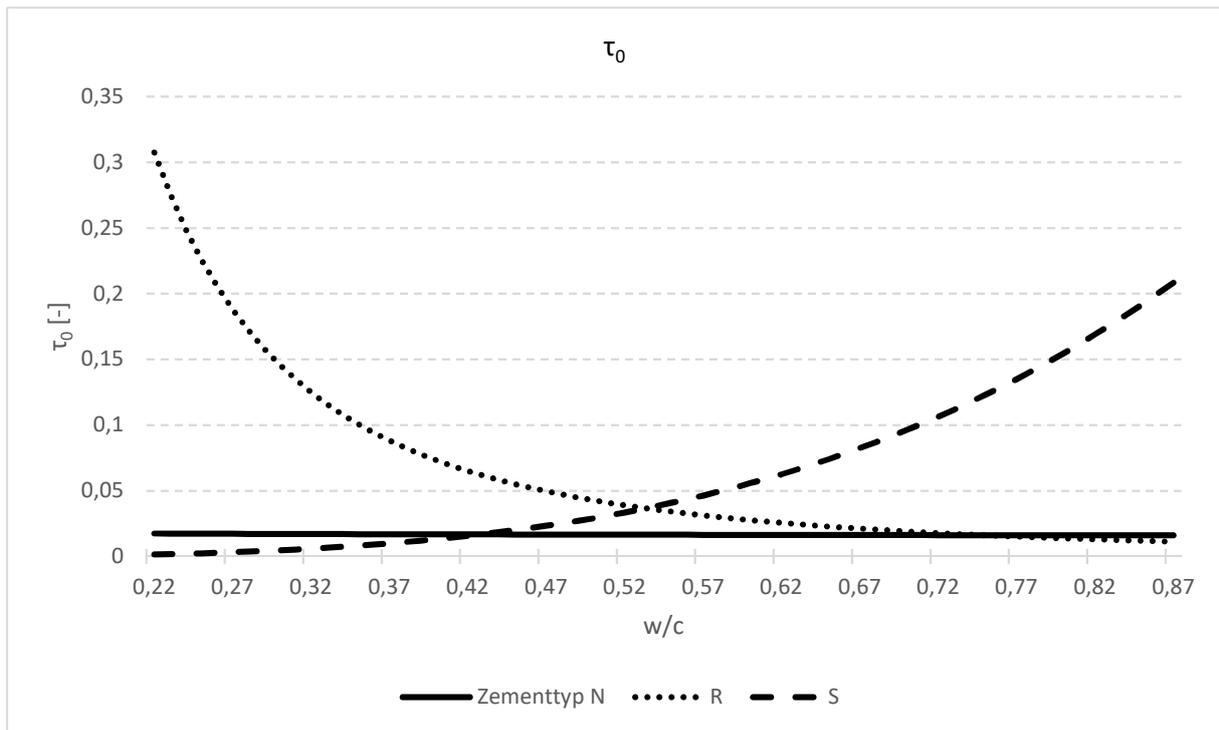


Bild 4.4.1: τ_0 Werte abhängig von dem Wasserzementwert;
 $c = 365 \text{ [kg/m}^3\text{]}; \rho = 2350 \text{ [kg/m}^3\text{]}; a/c = 5$

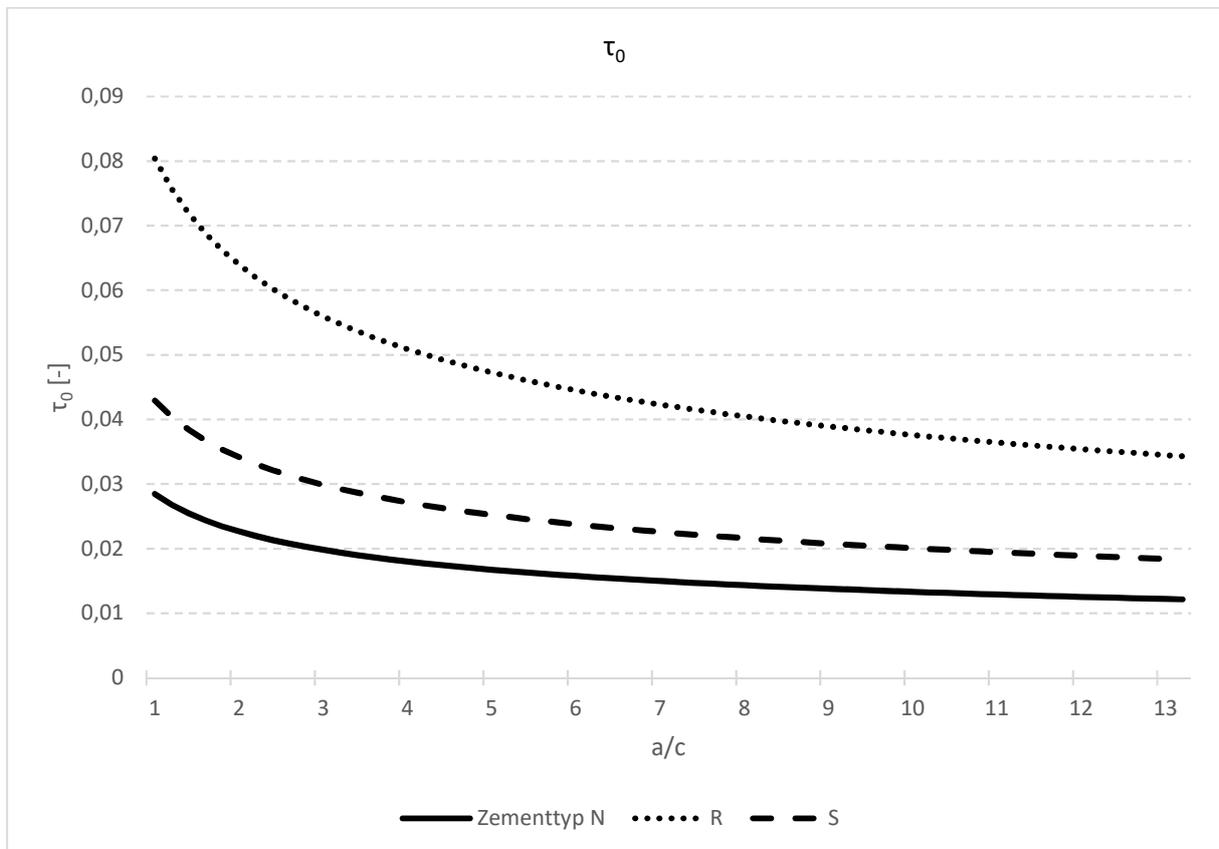


Bild 4.4.2: τ_0 Werte abhängig von dem Aggregat-Zement Verhältnis;
 $c = 365 \text{ [kg/m}^3\text{]}; \rho = 2350 \text{ [kg/m}^3\text{]}; w/c = 0,48$

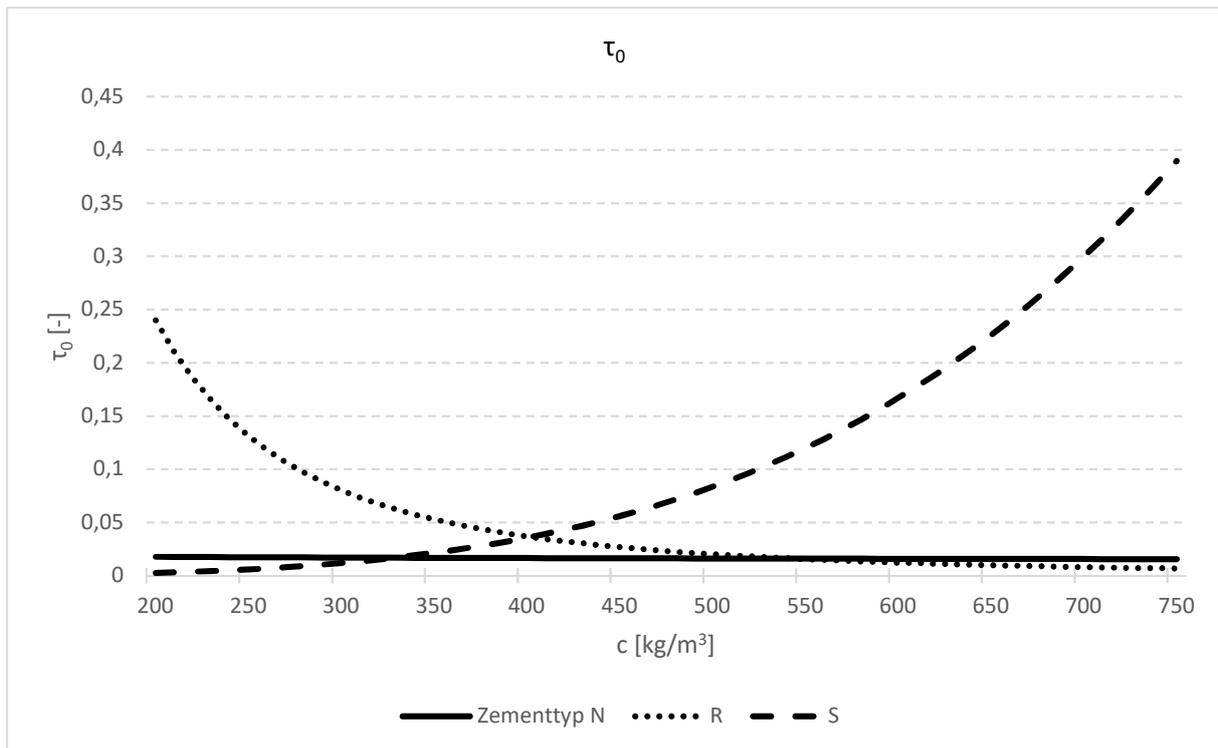


Bild 4.4.3: τ_0 Werte abhängig von dem Zementgehalt;
 $a/c = 5$; $\rho = 2350$ [kg/m³]; $w/c = 0,48$

	τ_{sh} [Tagen]				
	D=100	D=150	D=200	D=250	D=300
Diabas	9,6	21,6	38,4	60	86,4
Quarzit	94,4	212,4	377,6	590	849,6
Kalkstein	288	648	1152	1800	2592
Sandstein	368	828	1472	2300	3312
Granit	640	1440	2560	4000	5760
Quarz Diorit	2400	5400	9600	15000	21600

Tabelle 4.4.3: τ_{sh} Werte für verschiedene Gesteinskörnungen, mit verschiedenen effektiven Querschnittsdicken D [mm]; mit $\tau_0=0,016$ und $k_s=1,0$ angenommen

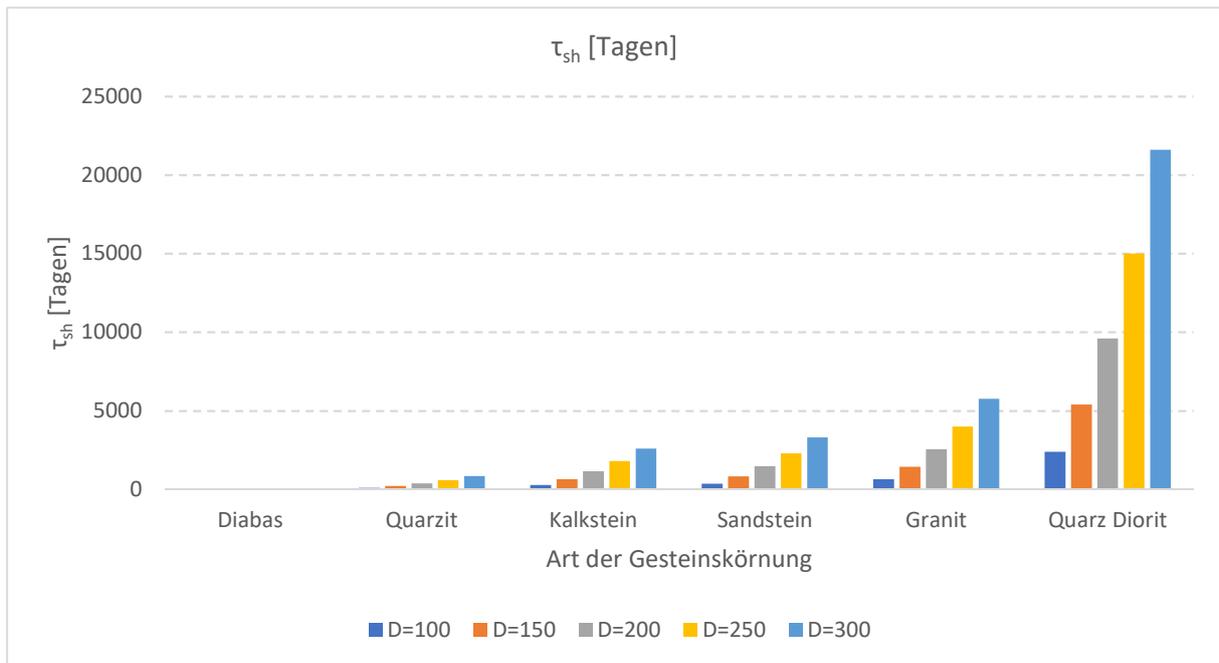


Bild 4.4.4: τ_{sh} Werte für verschiedene Gesteinskörnungen, mit verschiedenen effektiven Querschnittsdicken D [mm]; mit $\tau_0=0,016$ und $k_s=1,0$ angenommen

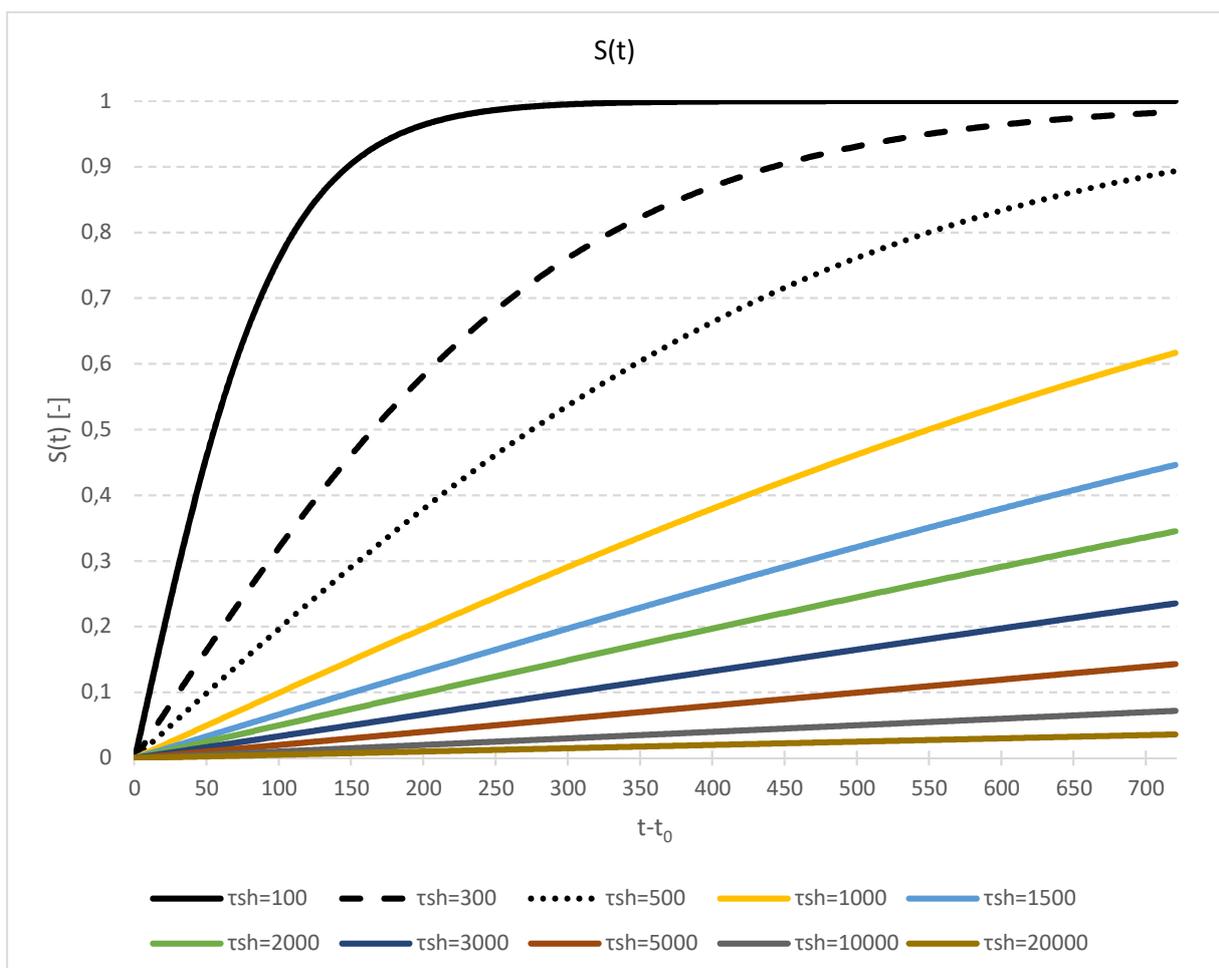


Bild 4.4.5: $S(t)$ Werte abhängig von $t-t_0$ mit verschiedenen τ_{sh} Werte innerhalb der ersten 2 Jahre

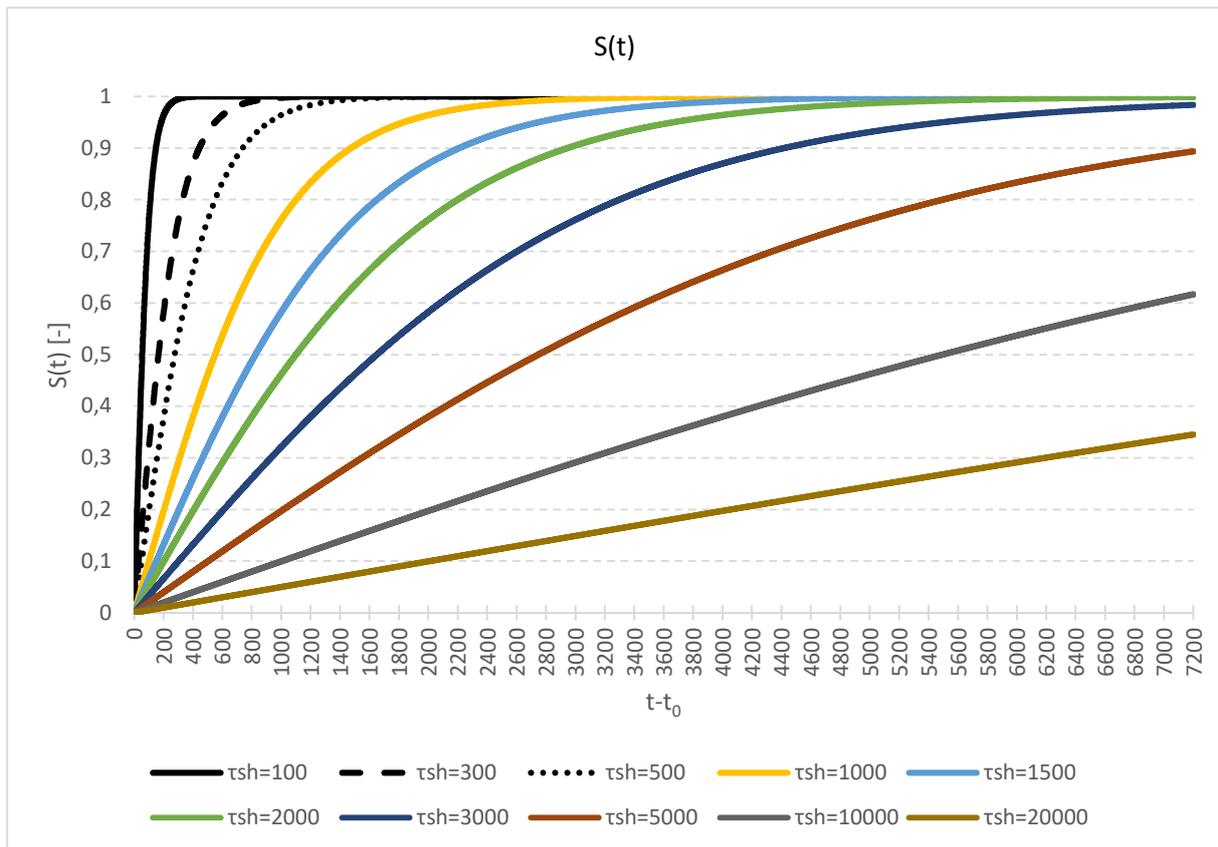


Bild 4.4.6: $S(t)$ Werte abhängig von $t-t_0$ mit verschiedenen τ_{sh} Werten innerhalb der ersten 20 Jahre

Autogenes Schwinden

Die empirische Funktion, die das autogene Schwinden beschreibt, kann nach Gleichung (4.4.12) - Gleichung (4.4.15) berechnet werden.

$$\varepsilon_{au}(t) = -\varepsilon_{au}^{\infty} \cdot \left[1 + \left(\frac{\tau_{au}}{t} \right)^{\alpha} \right]^{-4,5} \quad (4.4.12)$$

$$\varepsilon_{au}^{\infty} = \varepsilon_{au,cem} \left(\frac{a/c}{6} \right)^{-0,75} \cdot \left(\frac{w/c}{0,38} \right)^{r_{\varepsilon w}} \quad (4.4.13)$$

$$\alpha = r_{\alpha} \cdot \left(\frac{w/c}{0,38} \right) \quad (4.4.14)$$

$$\tau_{au} = \tau_{au,cem} \cdot \left(\frac{w/c}{0,38} \right)^3 \quad (4.4.15)$$

WO r_{α} , $r_{\varepsilon w}$, $\varepsilon_{au,cem}$, $\tau_{au,cem}$ von der Zementart abhängige Beiwerte sind, nach Tabelle 4.4.4.

Parameter	Zementtyp		
	N	R	S
r_{α}	1,00	1,40	1,00
$r_{\varepsilon w}$	-3,50	-3,50	-3,50
$\varepsilon_{au,cem}$	$210 \cdot 10^{-6}$	$(-) 84,0 \cdot 10^{-6}$	0
$\tau_{au,cem}$	1,00	41,0	1,00

Tabelle 4.4.4: Verschiedene Beiwerte für verschiedene Zementtypen

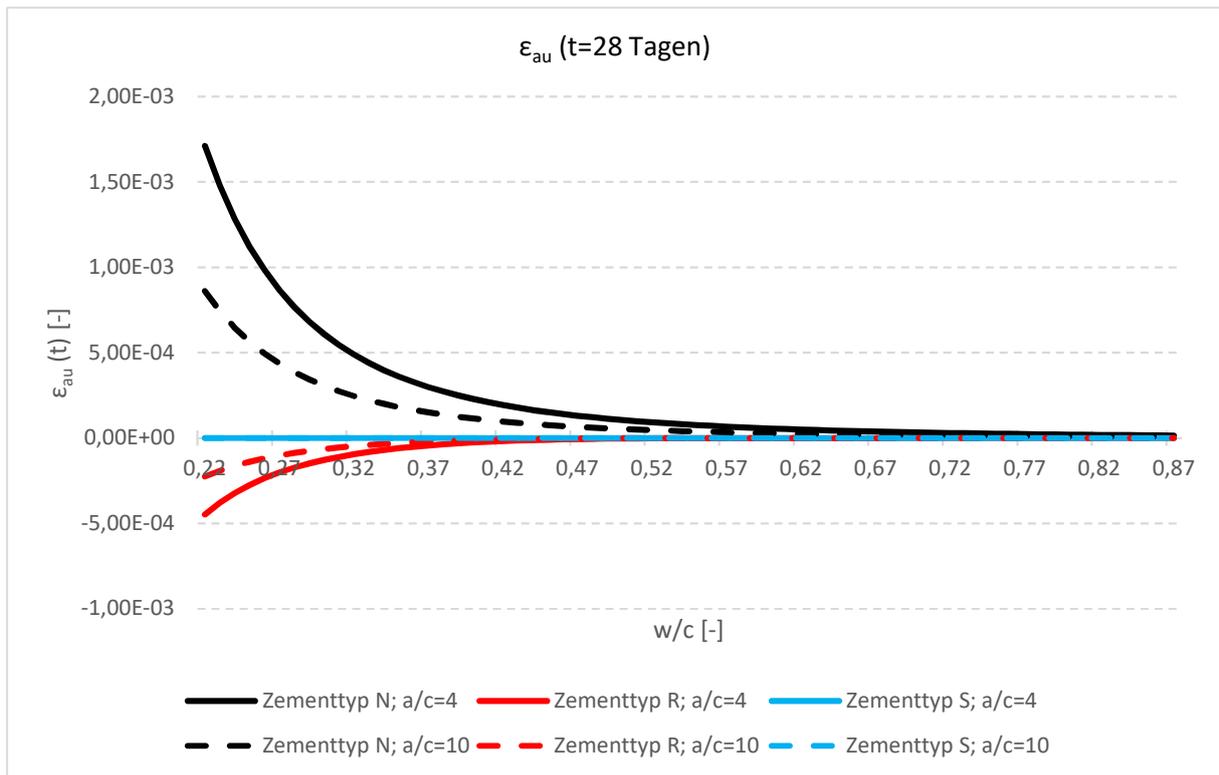


Bild 4.4.7: Werte des autogenen Schwindens, abhängig von dem Wasserzementwert, bei $t = 28$ [Tagen]

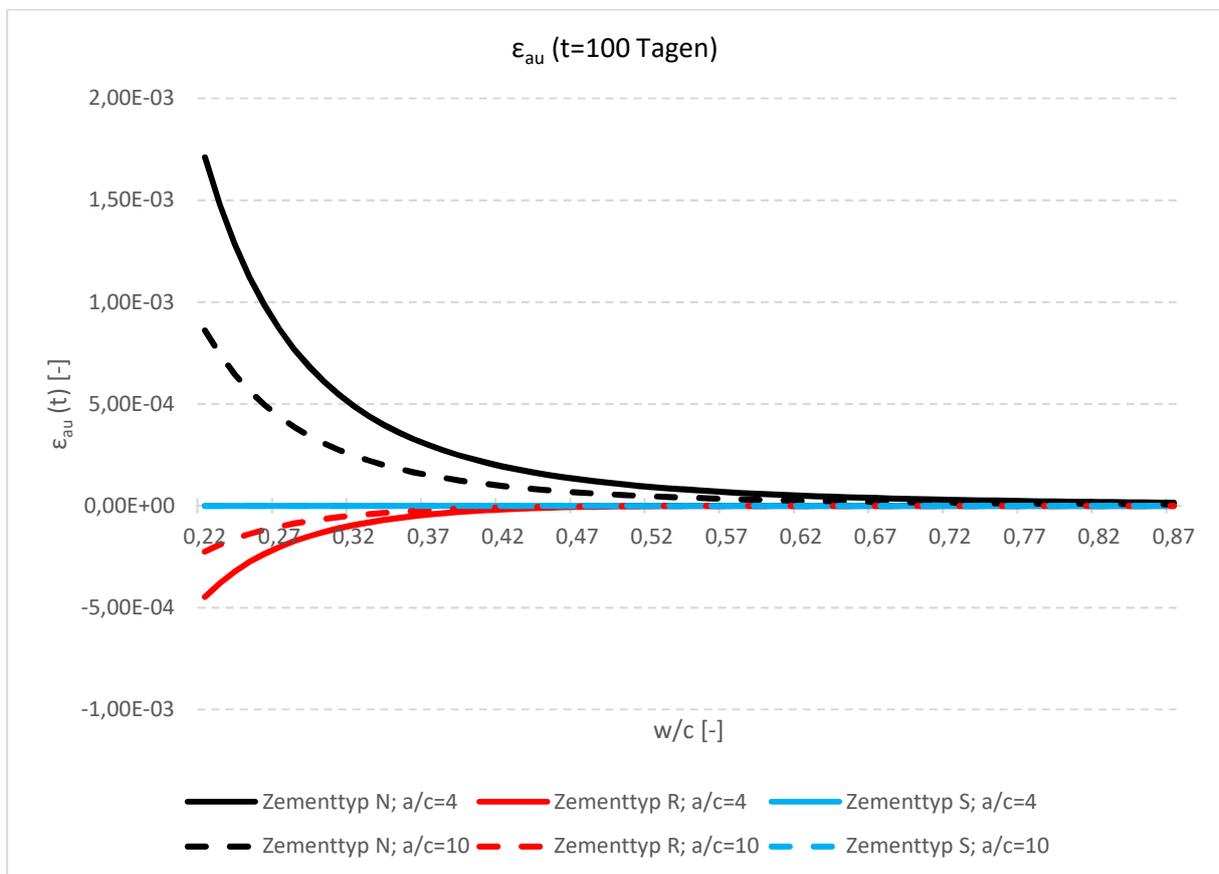


Bild 4.4.8: Werte des autogenen Schwindens, abhängig von dem Wasserzementwert, bei $t = 100$ [Tagen]

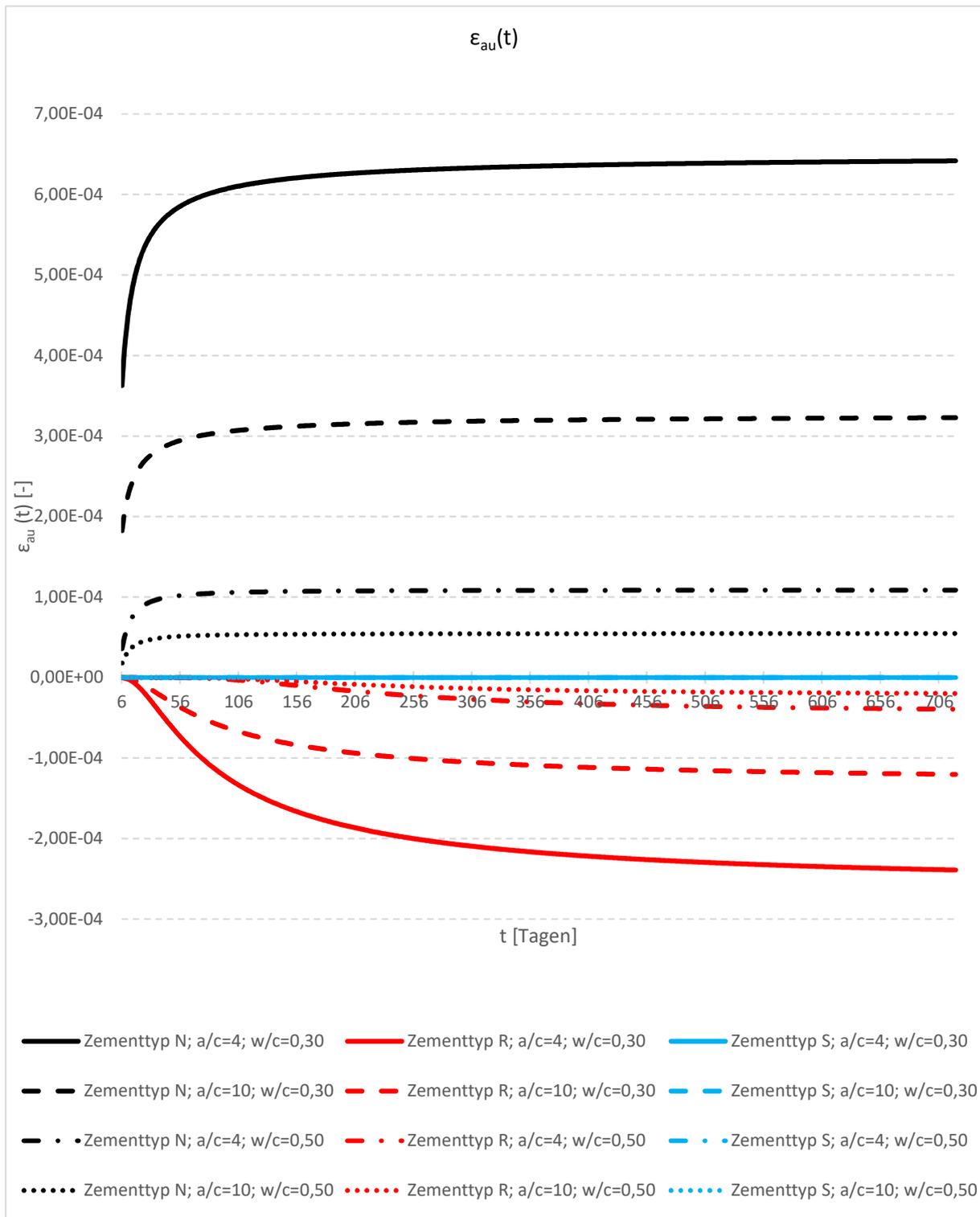


Bild 4.4.9: Werte des autogenen Schwindens, abhängig von der Zeit;
a/c: veränderlich; w/c: veränderlich; Zementtyp: veränderlich

Nach Bild 4.4.9 ist das autogene Schwinden für Zemente der Klasse S gleich Null. Wegen des Wertes $\epsilon_{au, cem}$ hat autogenes Schwinden für Zemente der Klasse R, und N, verschiedene Vorzeichen. Mit zunehmendem Wasserzementwert wird autogenes Schwinden kleiner. Mit zunehmendem a/c Wert wird auch autogene Schwinden kleiner.

4.4.3. Kriechen nach Modell B4

Die allgemeine Form der Kriechfunktion kann mit dem Modell B4 nach Gleichung (4.4.16) berechnet werden:

$$J(t, t') = q_1 + J_b(t, t') + J_d(t, t', t_0) \quad (4.4.16)$$

Dabei ist

q_1	von dem Elastizitätsmodul abhängiger Wert;
$J_b(t, t')$	die Kriechfunktion für das Grundkriechen (Kriechen bei konstantem Feuchtigkeitsgehalt) zum Zeitpunkt t ;
$J_d(t, t', t_0)$	die zusätzliche Kriechfunktion aufgrund des zeitlichen Trocknungsvorgangs zum Zeitpunkt t , grafisch im Bild 4.4.16- Bild 4.4.19 dargestellt;
t'	das Belastungsanfangsalter;
t_0	Trocknungsanfangsalter.

Der Wert q_1 kann nach Gleichung (4.4.17) berechnet werden.

$$q_1 = \frac{p_1}{E_{28}} \quad (4.4.17)$$

wo p_1 ein Beiwert ist der den Zementtyp berücksichtigt, nach Tabelle 4.4.5.

Die Kriechfunktion $J_b(t, t')$ die das Grundkriechen berücksichtigt kann nach Gleichung (4.4.18) berechnet werden.

$$J_b(t, t') = q_2 \cdot Q(t, t') + q_3 \cdot \ln[1 + (t - t')^n] + q_4 \cdot \ln\left(\frac{t}{t'}\right) \quad (4.4.18)$$

Die einzelnen Glieder der Kriechfunktion $J_b(t, t')$ für das Grundkriechen können nach Gleichung (4.4.19) - (4.4.25) berechnet werden.

$$q_2 = \frac{p_2}{1 [GPa]} \cdot \left(\frac{w/c}{0,38}\right)^3 \quad (4.4.19)$$

$$Q(t, t') = Q_f(t') \cdot \left[1 + \left(\frac{Q_f(t')}{Z(t, t')}\right)^{r(t')}\right]^{\frac{1}{r(t')}} \quad (4.4.20)$$

$$Q_f(t') = [0,086(t')^{2/9} + 1,21 \cdot (t')^{4/9}]^{-1} \quad (4.4.21)$$

$$Z(t, t') = (t')^{-m} \cdot \ln[1 + (t - t')^n] \quad (4.4.22)$$

$$r(t') = 1,7 \cdot (t')^{0,12} + 8 \quad (4.4.23)$$

$$q_3 = p_3 \cdot q_2 \cdot \left(\frac{a/c}{6}\right)^{-1,1} \cdot \left(\frac{w/c}{0,38}\right)^{0,4} \quad (4.4.24)$$

$$q_4 = \frac{p_4}{1 [GPa]} \cdot \left(\frac{a}{6}\right)^{-0,9} \cdot \left(\frac{w/c}{0,38}\right)^{2,45} \quad (4.4.25)$$

Dabei ist

- m empirischer Parameter; für normal Beton: $m=0,5$;
- n empirischer Parameter; für normal Beton: $n=0,1$;
- p_i von dem Zementtyp abhängige Beiwerte, nach Tabelle 4.4.5.

	Zementtyp		
	N	R	S
p_1	0,70	0,60	0,80
p_2	$58,6 \cdot 10^{-3}$	$17,4 \cdot 10^{-3}$	$40,5 \cdot 10^{-3}$
p_3	$39,3 \cdot 10^{-3}$	$39,3 \cdot 10^{-3}$	$39,3 \cdot 10^{-3}$
p_4	$3,4 \cdot 10^{-3}$	$3,4 \cdot 10^{-3}$	$3,4 \cdot 10^{-3}$
p_5	$777 \cdot 10^{-6}$	$94,6 \cdot 10^{-6}$	$496 \cdot 10^{-6}$

Tabelle 4.4.5: p_i Werte für verschiedene Zementtypen

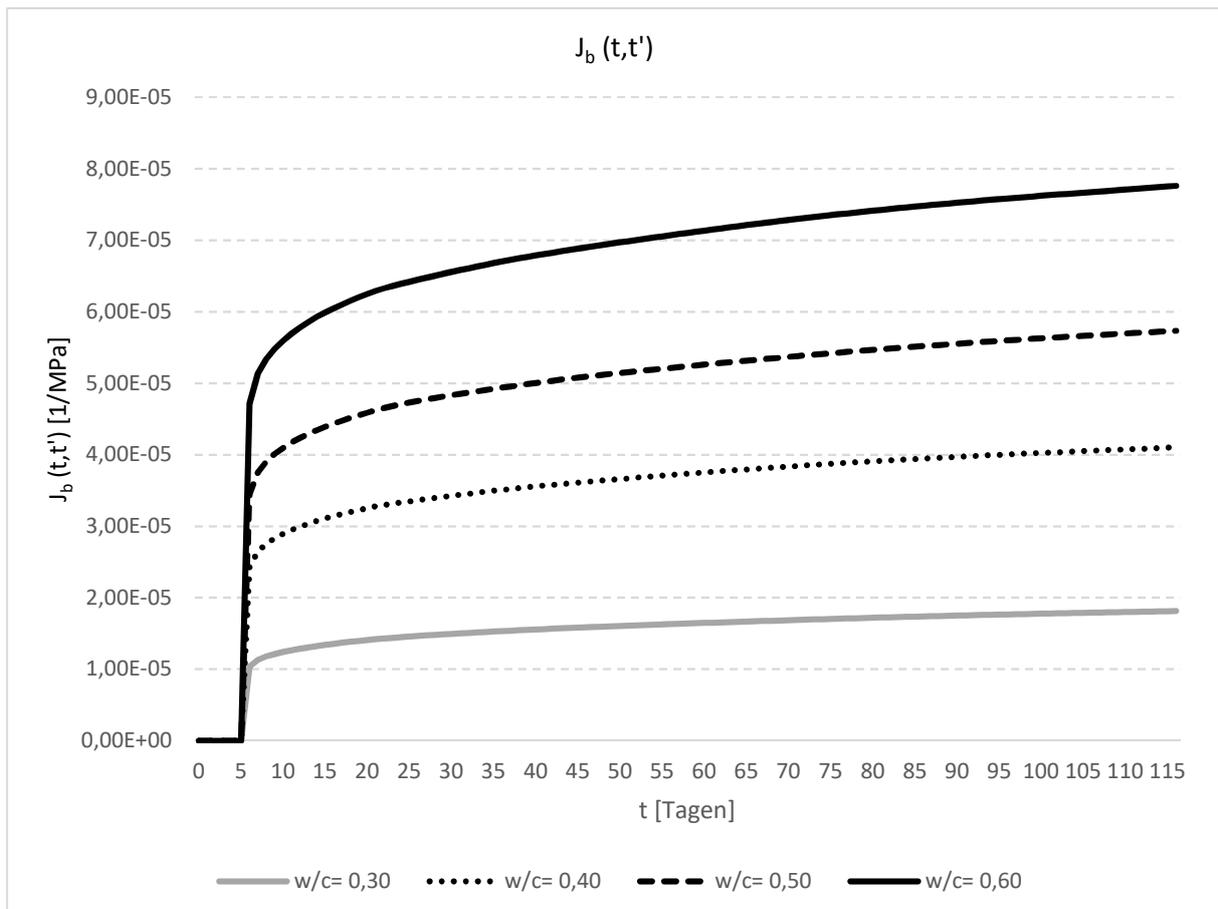


Bild 4.4.10: $J_b(t, t')$ Werte abhängig von der Zeit;
 w/c : veränderlich; $t' = 6$ [Tagen]; $a/c = 5,05$

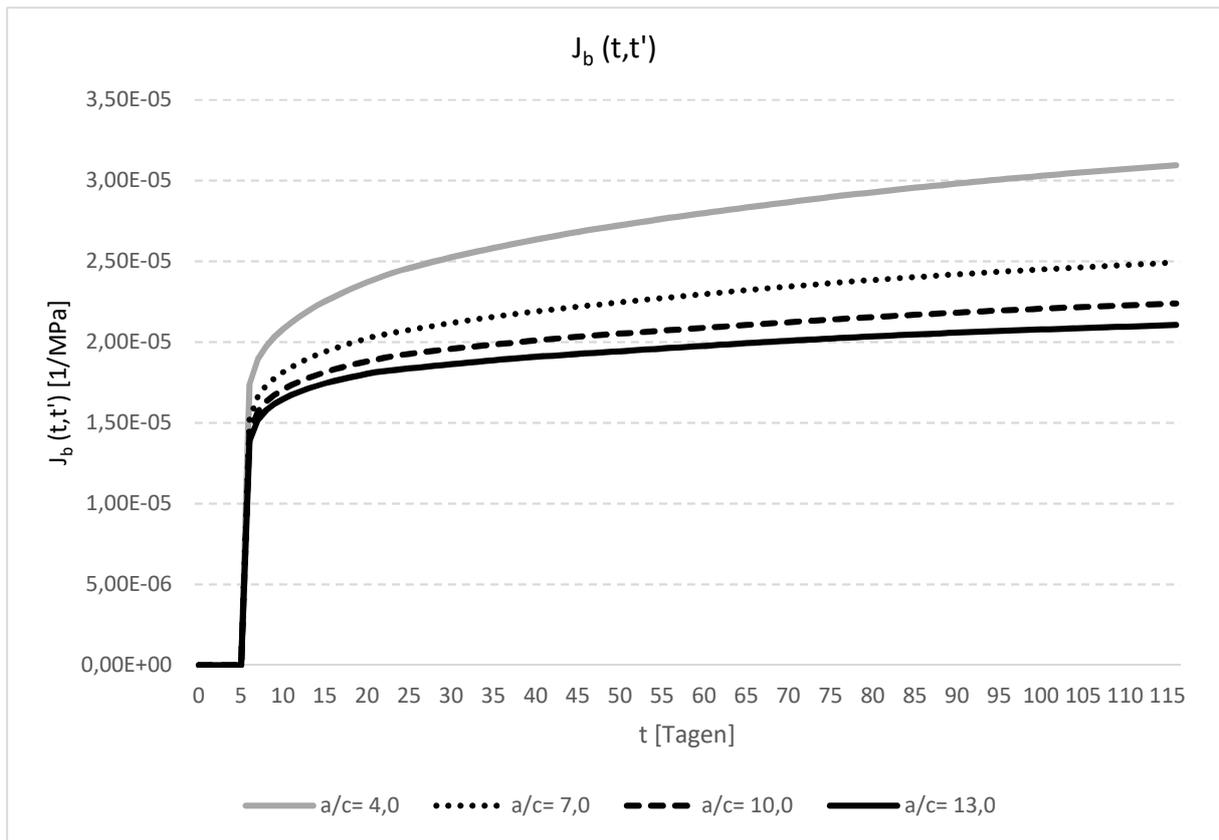


Bild 4.4.11: $J_b(t, t')$ Werte abhängig von der Zeit;
 a/c : veränderlich; $t' = 6$ [Tagen]; $w/c = 0,35$

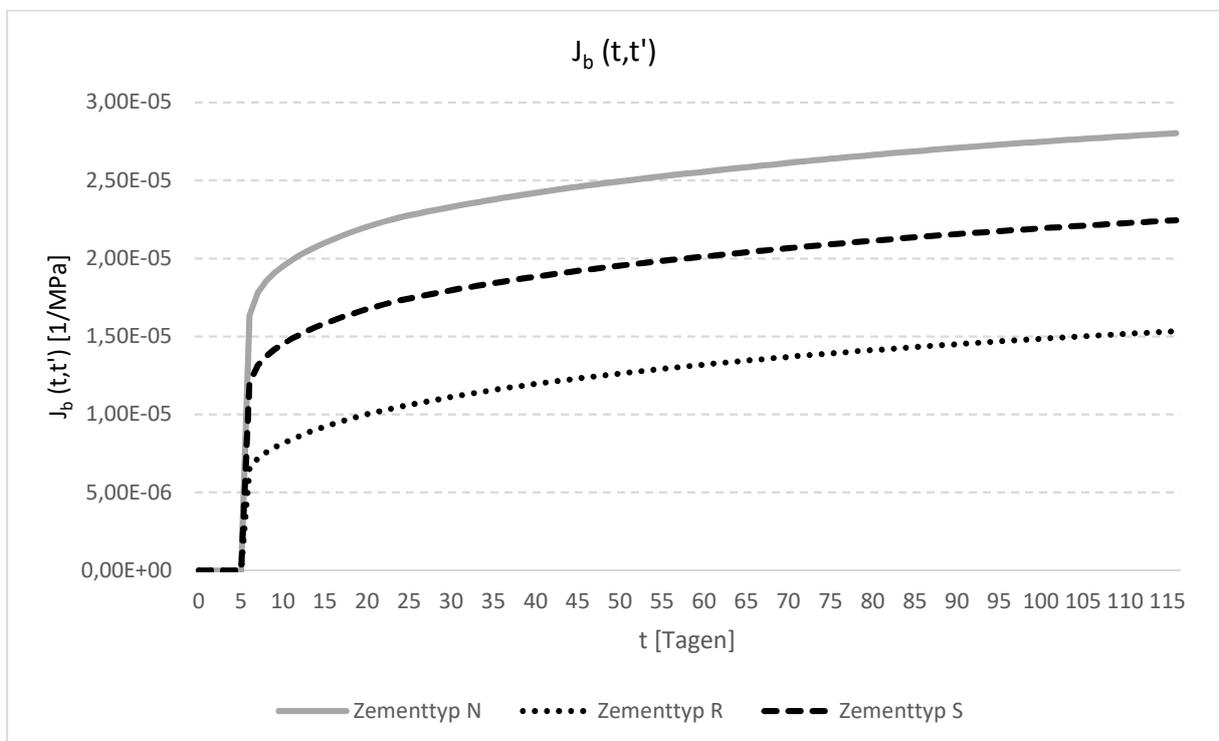


Bild 4.4.12: $J_b(t, t')$ Werte abhängig von der Zeit, mit verschiedenen Zementtypen;
 $t' = 6$ [Tagen]; $w/c = 0,35$; $a/c = 5,05$

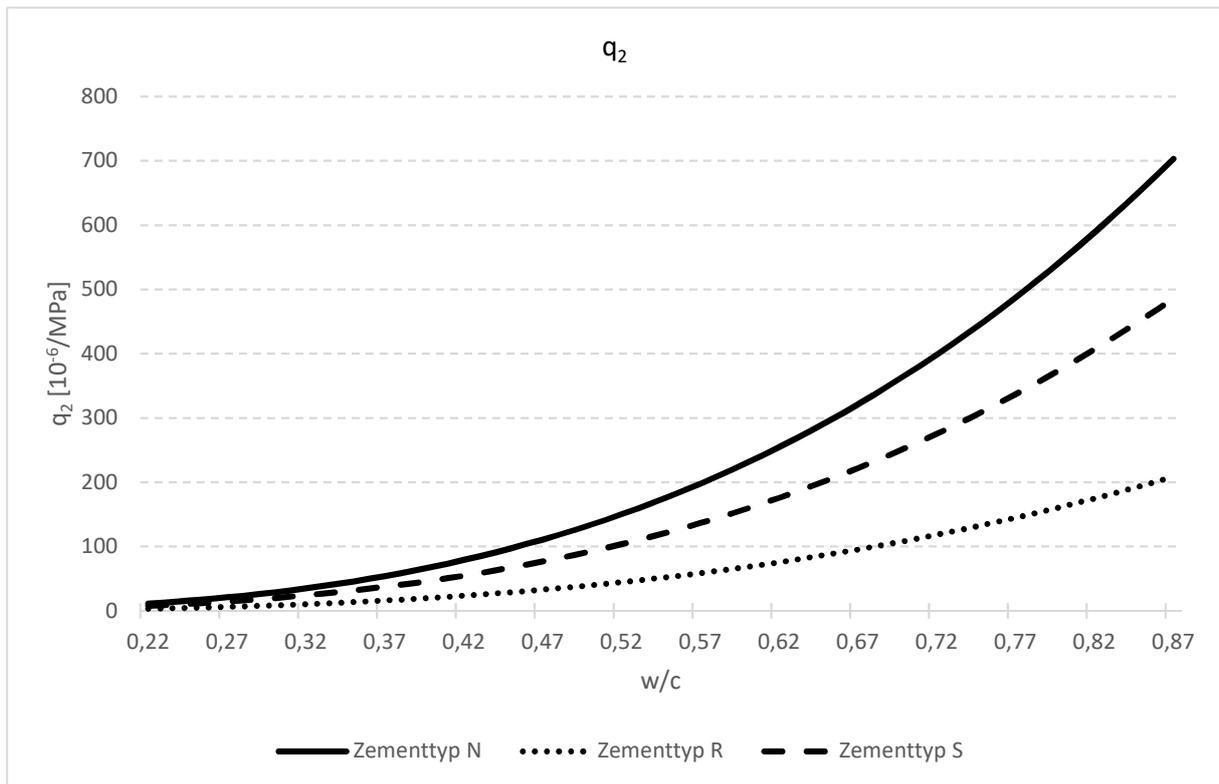


Bild 4.4.13: q_2 Werte für verschiedenen Zementarten; abhängig von dem Wasserzementwert

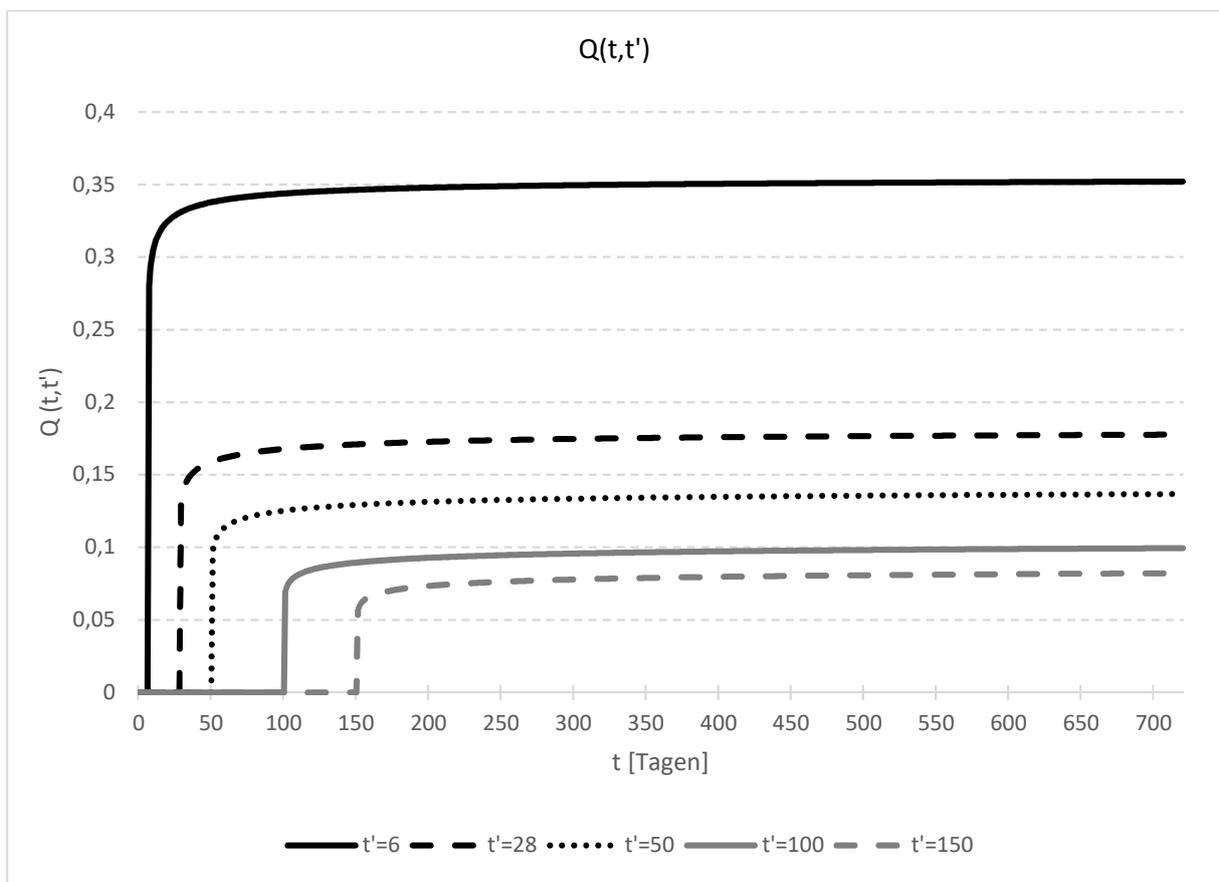


Bild 4.4.14: $Q(t, t')$ Werte für verschiedene Belastungsanfänge t' ; abhängig von der Zeit t

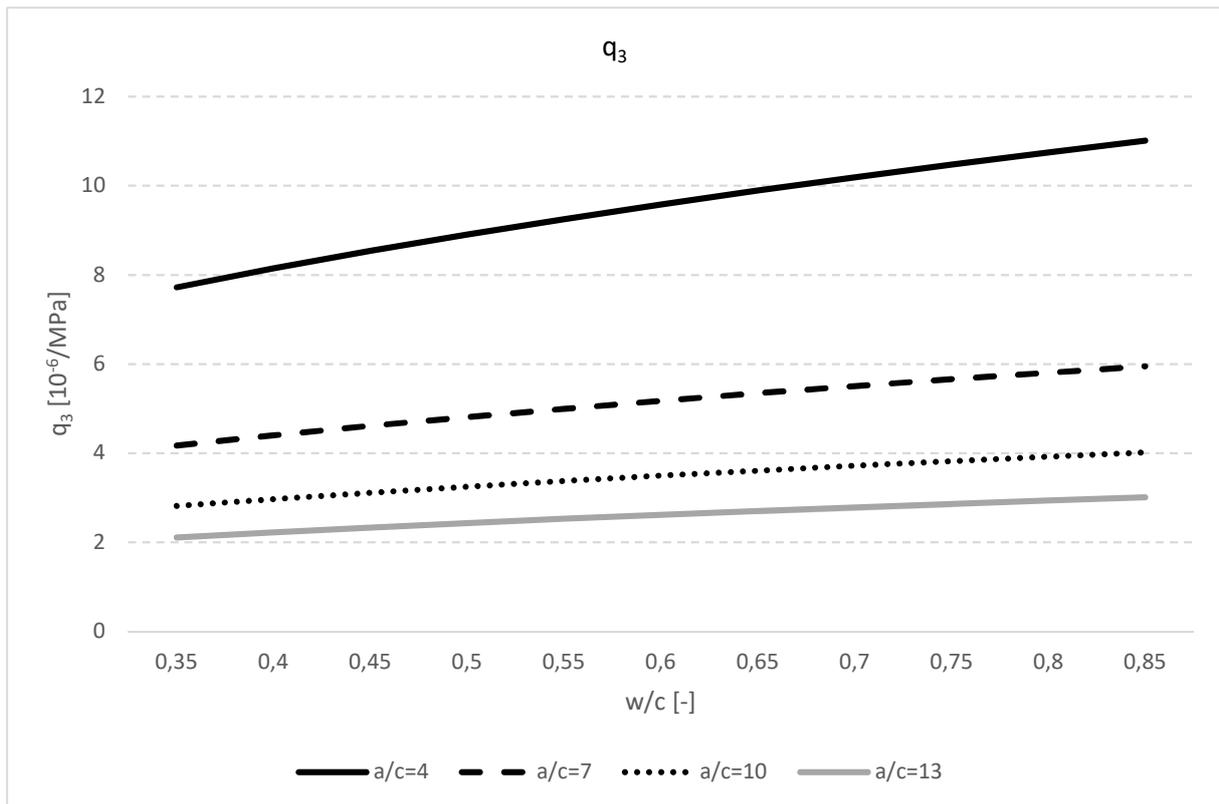


Bild 4.4.15: q_3 Werte abhängig von dem Wasserzementwert; a/c : veränderlich; $q_2=130$

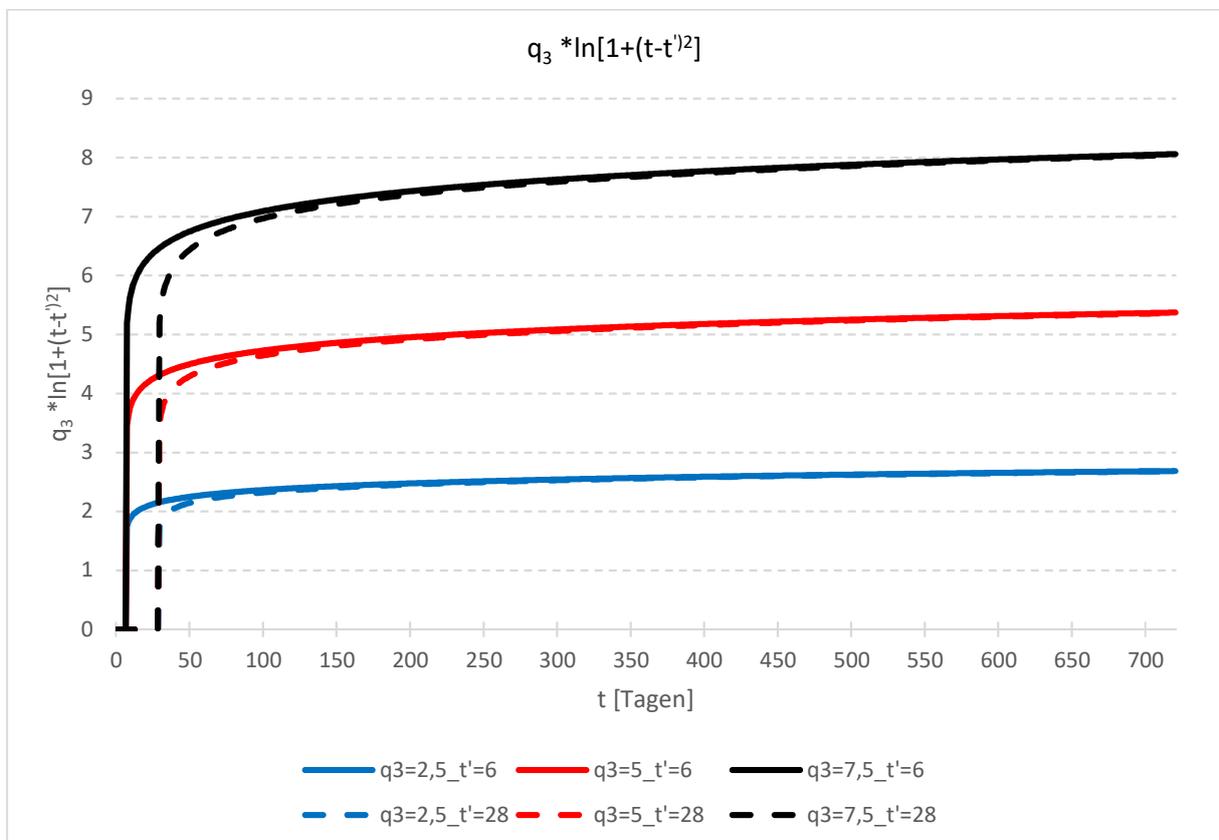


Bild 4.4.16: $q_3 \cdot \ln[1+(t-t')^2]$ Werte mit verschiedene Belastungsbeginns und q_3 Werte

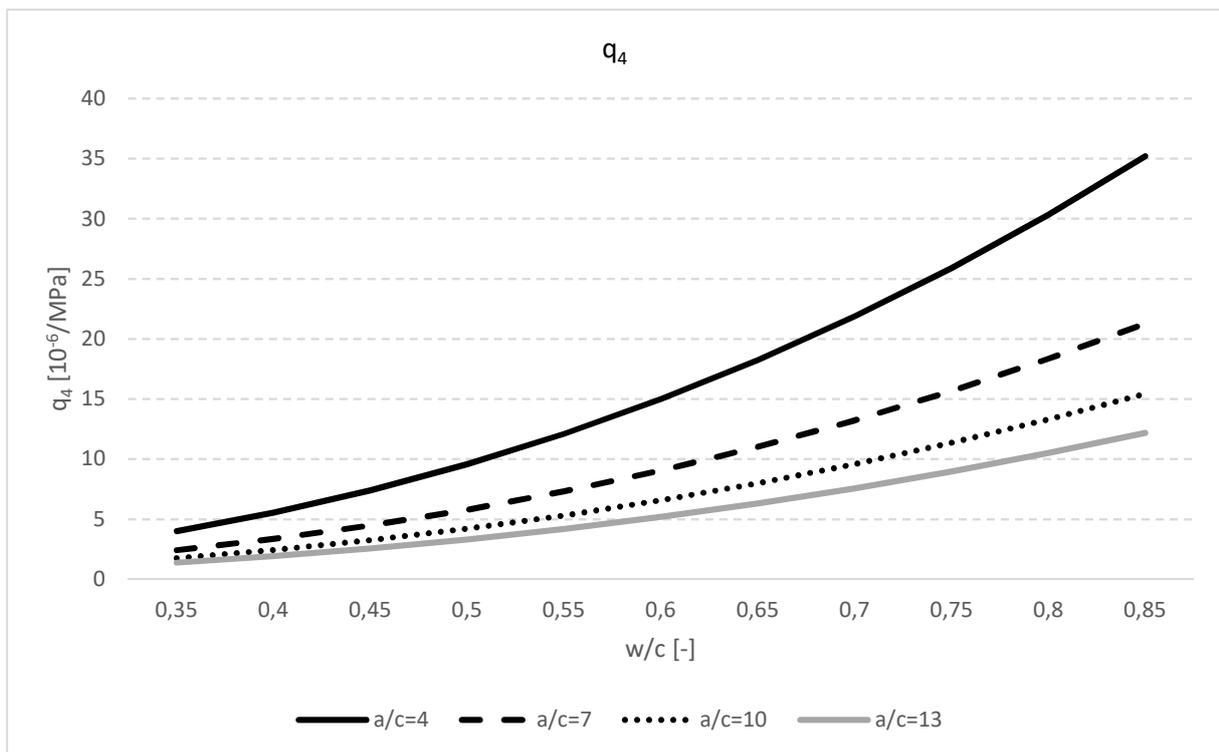


Bild 4.4.14: q_4 Werte abhängig von dem Wasserzementwert; a/c veränderlich

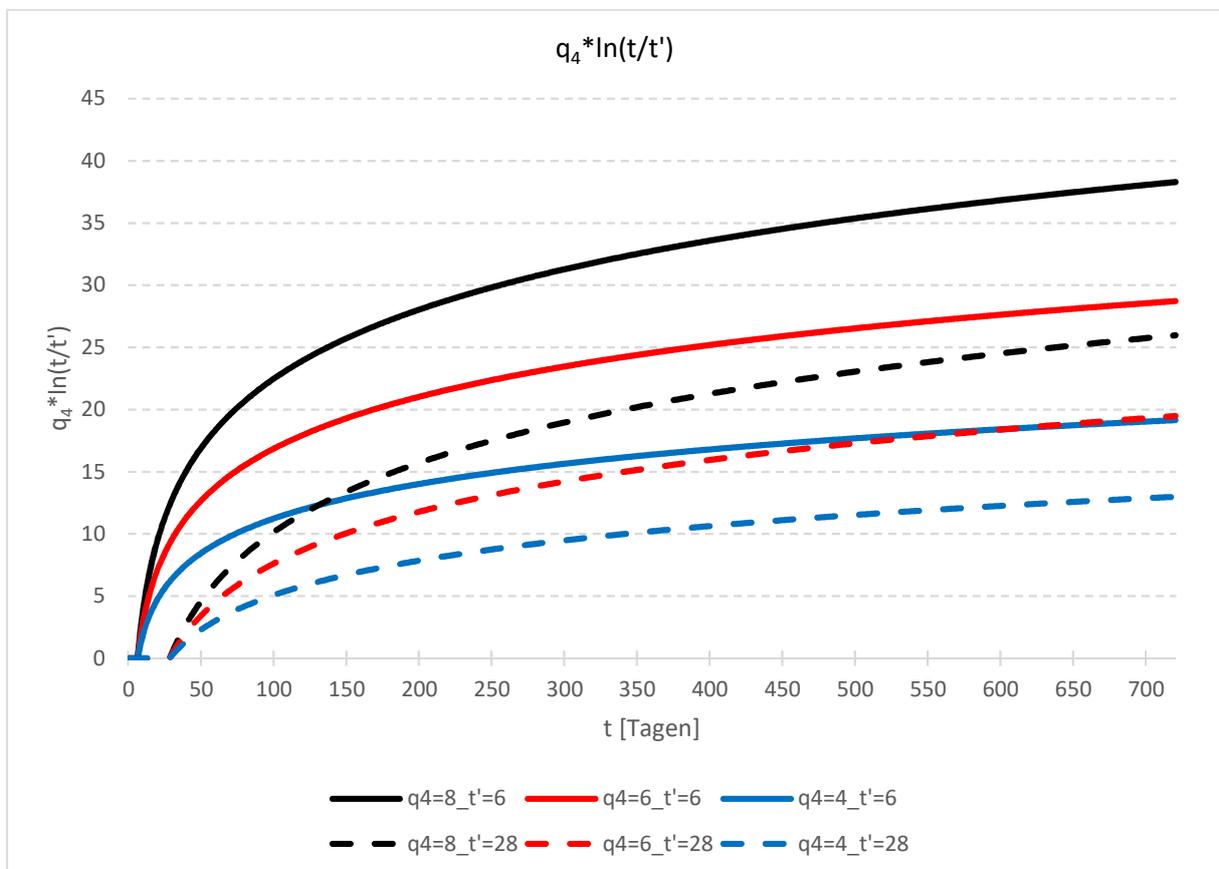


Bild 4.4.15: $q_4 \ln(t/t')$ Werte für verschiedene q_4 Werte und Belastungsbeginns; abhängig von der Zeit t

Die zusätzliche Kriechfunktion aufgrund des zeitlichen Trocknungsvorgangs kann wie folgt, nach Gleichung (4.4.26) - (4.4.28) bestimmt werden.

$$J_d(t, t', t_0) = q_5 \cdot \sqrt{\langle e^{-g(t-t_0)} - e^{-8g((t'-t_0))} \rangle} \quad (4.4.26)$$

Die eckigen Klammern bezeichnen den positiven Teil.

$$q_5 = \frac{p_5}{1 \text{ GPa}} \cdot \left(\frac{a}{6}\right)^{-1} \cdot \left(\frac{w}{c}\right)^{0,78} \cdot |k_h \cdot \varepsilon_{sh}^\infty(t_0)|^{-0,85} \quad (4.4.27)$$

$$g(t - t_0) = p_{5H} \cdot [1 - (1 - h_{env}) \cdot S(t)] \quad (4.4.28)$$

Dabei ist

- h_{env} die relative Luftfeuchte der Umgebung;
- k_h ein, von der relativen Luftfeuchte abhängiger Beiwert, nach Gleichung (4.4.6);
- p_5 ein, von dem Zementtyp abhängiger Beiwert, nach Tabelle 4.4.5;
- p_{5H} ein, von dem Zementtyp abhängiger Beiwert

$p_{5H} = 8$	für	Zementtyp N, und S
$p_{5H} = 1$	für	Zementtyp R
- τ_{sh} ein Beiwert nach Gleichung (4.4.8)
- D effektive Querschnittsdicke, nach Gleichung (4.4.10)

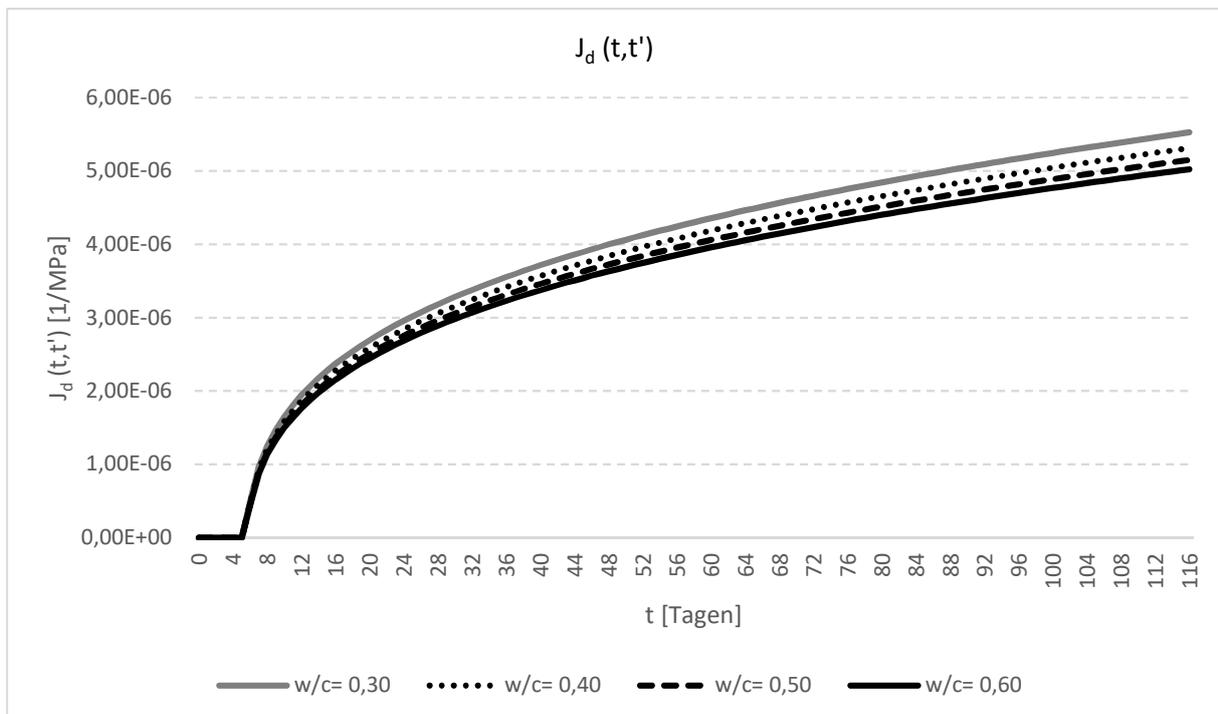


Bild 4.4.16: $J_d(t, t')$ Werte abhängig von der Zeit;
 w/c : veränderlich, $t' = 6$ [Tagen]; $a/c = 5,05$; Sandstein Gesteinskörnung; $RH = 62$ [%]

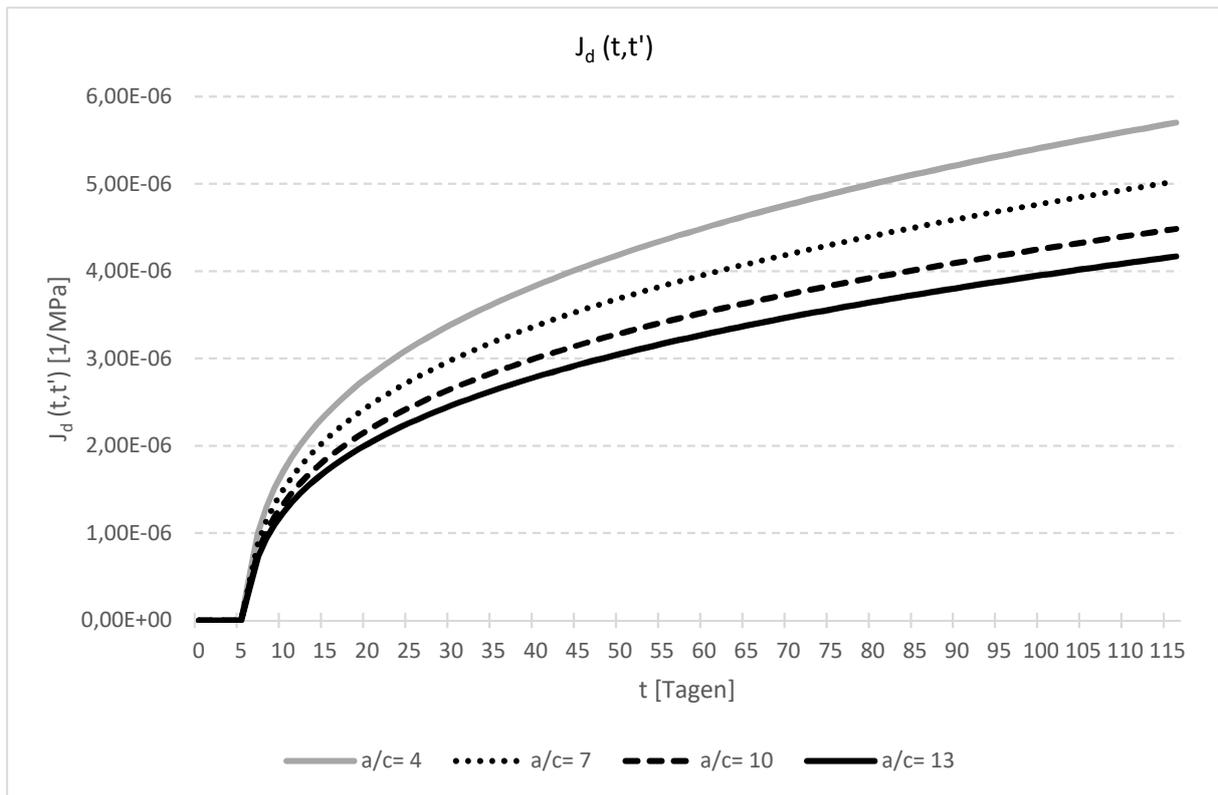


Bild 4.4.17: $J_d(t, t')$ Werte abhängig von der Zeit;
 a/c : veränderlich; $t' = 6 [Tagen]$; $w/c = 0,35$; Sandstein Gesteinskörnung; $RH = 62 [\%]$

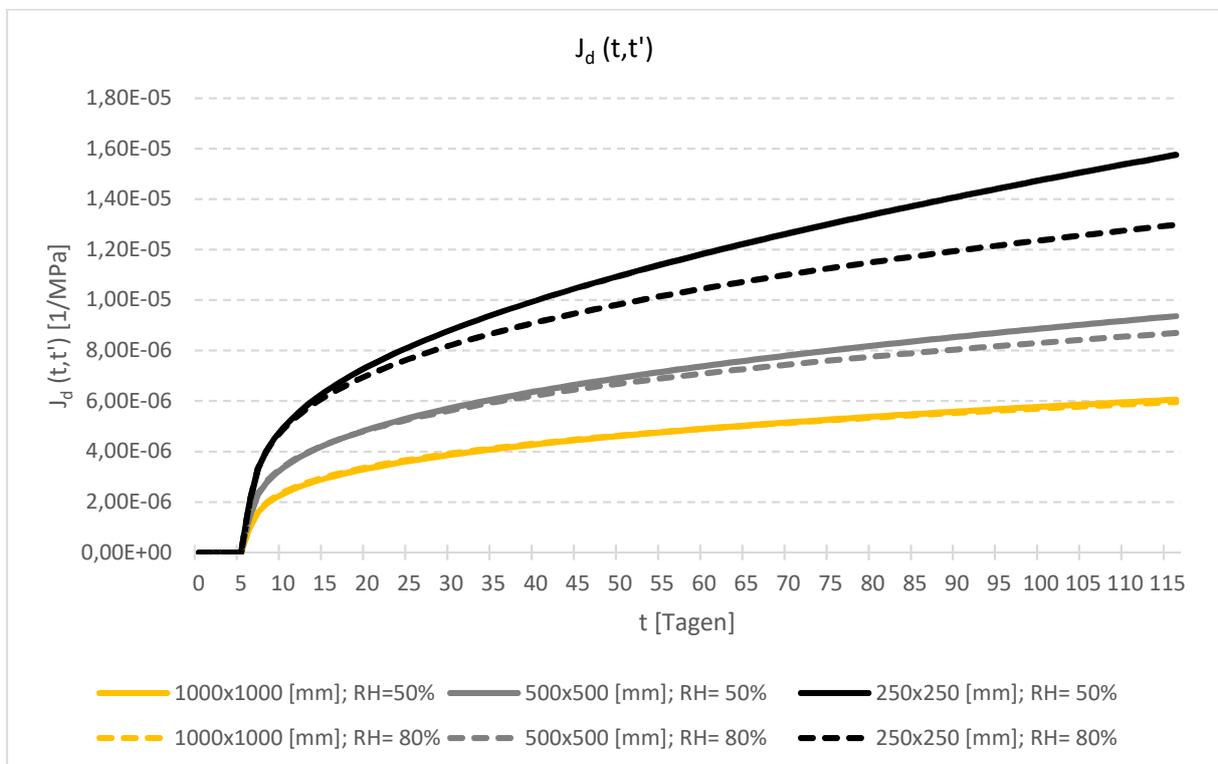


Bild 4.4.18: $J_d(t, t')$ Werte abhängig von der Zeit, bei verschiedene relative Luftfeuchte und Querschnitte; $t' = 6 [Tagen]$; $w/c = 0,35$; $a/c = 5,05$; Sandstein Gesteinskörnung

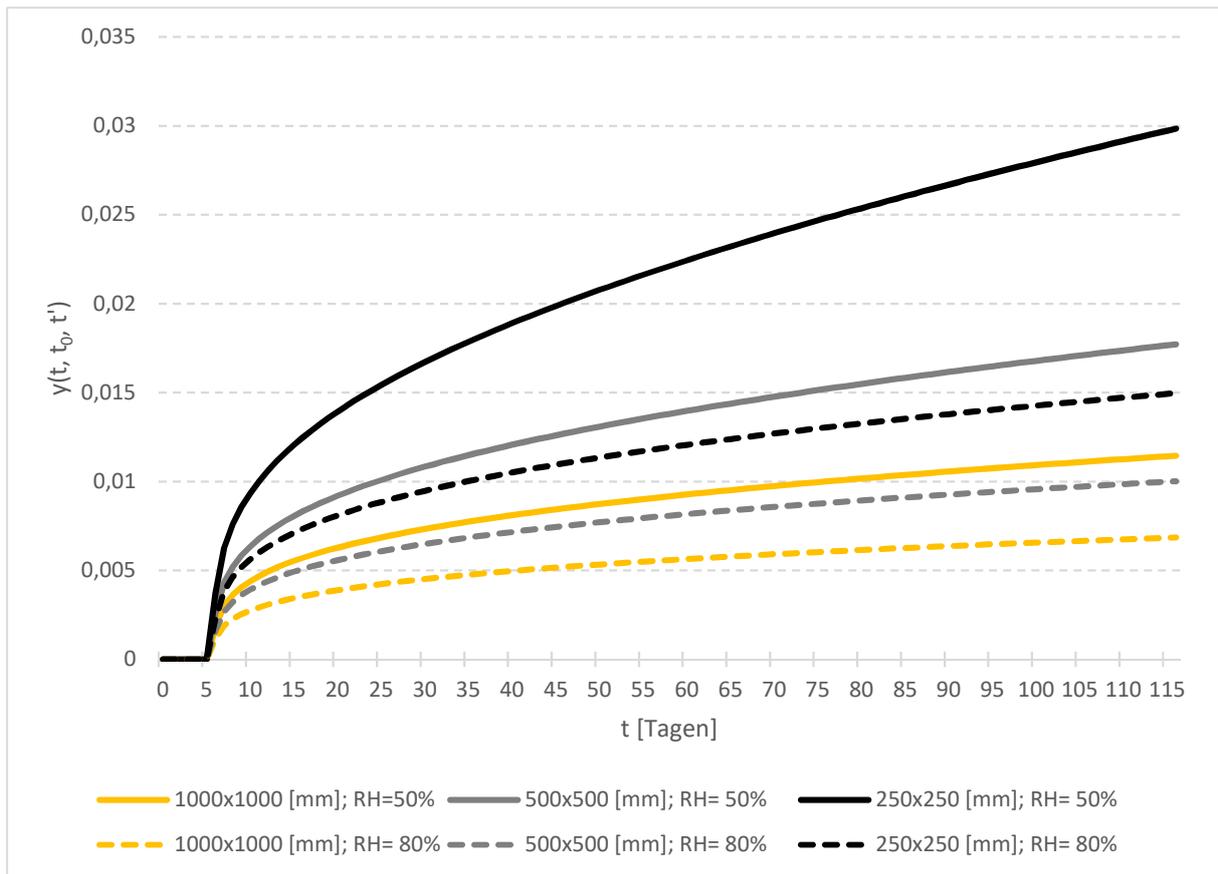


Bild 4.4.19: $y(t, t_0, t') = \sqrt{\langle e^{-g(t-t_0)} - e^{-g(t'-t_0)} \rangle}$ Werte abhängig von der Zeit, bei verschiedener relativer Luftfeuchte und Querschnitte; $t' = 6$ [Tagen]; Sandstein Gesteinskörnung

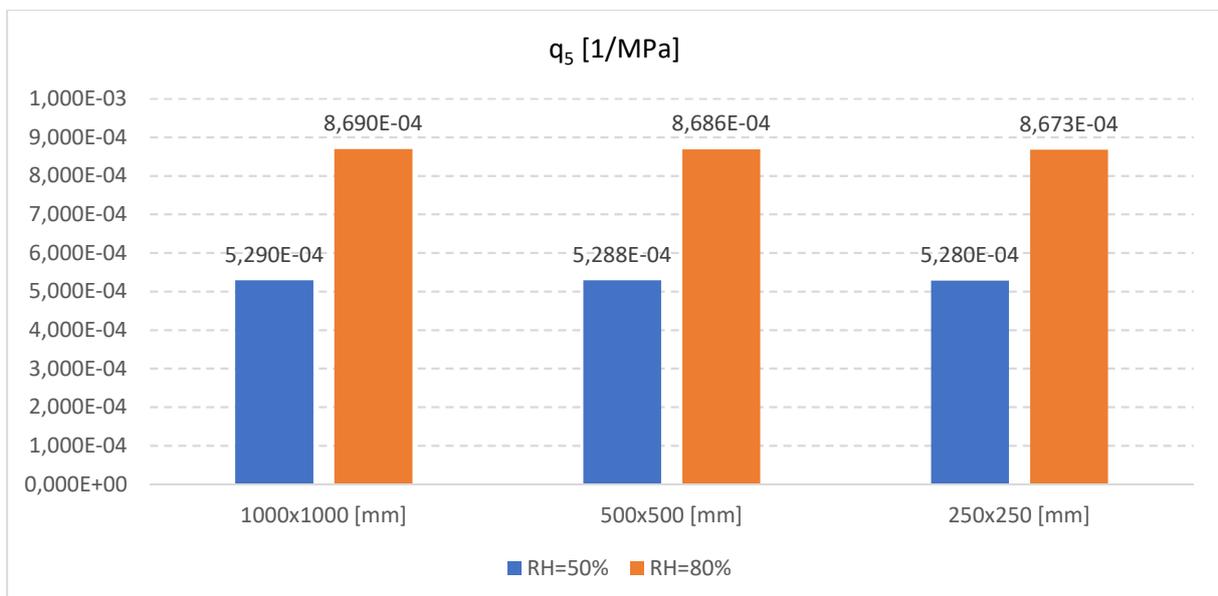


Bild 4.4.20: q_5 Werte bei verschiedener Luftfeuchte und Querschnitte, mit $w/c = 0,35$; $a/c = 5,05$; Sandstein Gesteinskörnung

4.4.4. Elastizitätsmodul nach Modell B4

Für die zeitliche Abwicklung des Elastizitätsmoduls macht das Modell B4 die folgende Empfehlung, nach ACI Formel, nach Gleichung (4.4.29):

$$E(t) = E_{28} \cdot \sqrt{\frac{7t}{28+6t}} \quad (4.4.29)$$

Dabei ist

- E(t) Elastizitätsmodul zum Zeitpunkt t;
- E₂₈ Elastizitätsmodul zum Zeitpunkt t=28 Tagen.

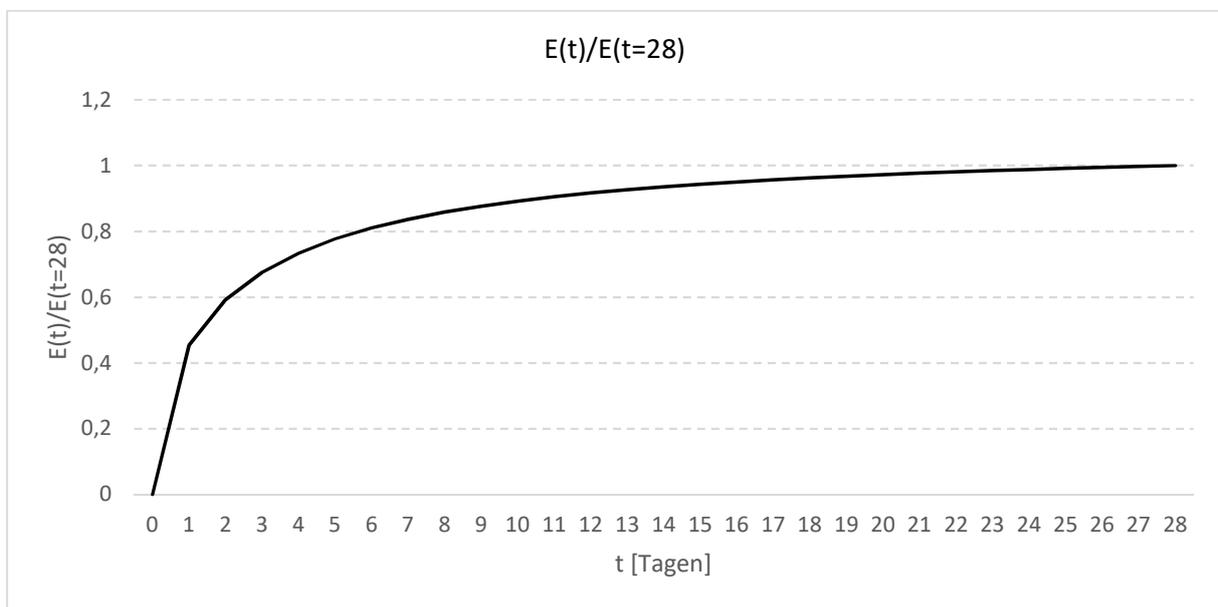


Bild 4.4.21: $E(t)/E(t=28)$ Werte abhängig von der Zeit in den ersten 28 Tagen

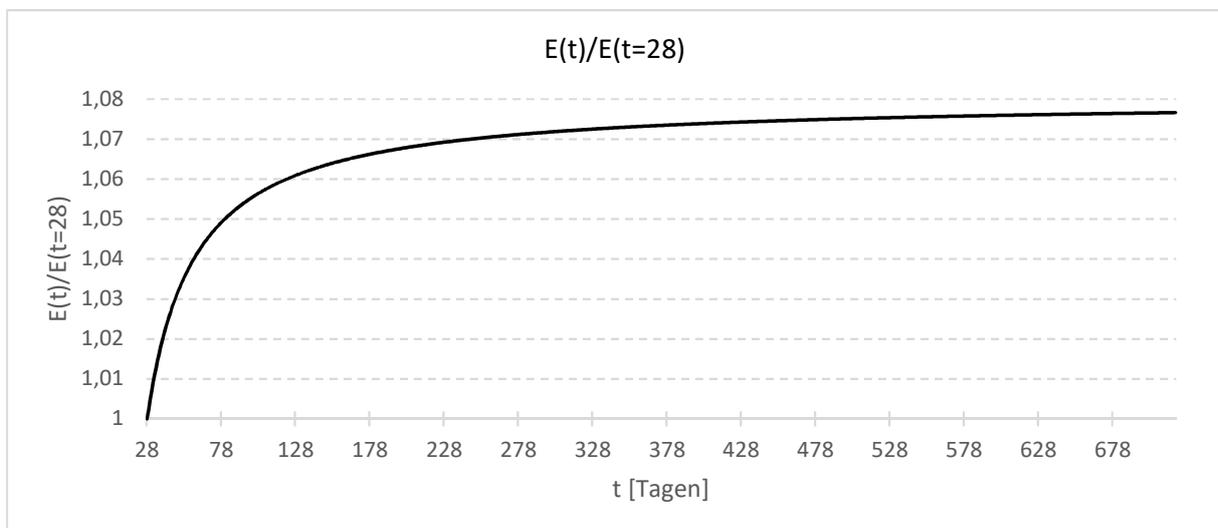


Bild 4.4.22: $E(t)/E(t=28)$ Werte abhängig von der Zeit nach den ersten 28 Tagen

4.4.5. Temperatureffekte nach Modell B4

Das RILEM Modell B4 wurde auf die Bezugstemperatur $T_0=293$ [K] kalibriert. Der Einfluss der Temperatur auf das Kriechen und auf das Schwinden wird durch eine Beschleunigung der Zeit (horizontale Skalierung der Kriech- und Schwindkurven) in Kombination mit der vertikalen Skalierung ausgewählter Terme (die das Grundkriechen beschreiben) berücksichtigt.

Das Konzept der Zeitbeschleunigung bei höheren Temperaturen ist in der Theorie der „*microprestress-solidification*“ (auf Deutsch: *Mikrovorspannung- Aushärtung*) eingeführt.

Die Theorie der „*microprestress-solidification*“:

Der Einfluss von Temperatur und Luftfeuchtigkeit auf den Prozess in der Mikrostruktur kann durch die Einführung von drei transformierten Zeitvariablen, nach den Gleichung (4.4.30-4.4.38) beschrieben werden:

- „*the equivalent age*“ t_e (auf Deutsch: das äquivalente Alter), das indirekt den Grad der Hydratation gekennzeichnet;
- „*the reduced time*“ t_r (auf Deutsch: reduzierte Zeit), der den Veränderungen der Bindungsbruchrate auf der Mikrostrukturebene charakterisiert;
- „*the reduced microprestress time*“ t_s (auf Deutsch: reduzierte Zeit vor der Mikrovorspannung)

$$\frac{dt_e}{dt} = \beta_{eT}(T) \cdot \beta_{eh}(h) \quad (4.4.30)$$

$$\frac{dt_r}{dt} = \beta_{rT}(T) \cdot \beta_{rh}(h) \quad (4.4.31)$$

$$\frac{dt_s}{dt} = \beta_{sT}(T) \cdot \beta_{sh}(h) \quad (4.4.32)$$

$$\beta_{eT}(T) = \exp \left[\frac{Q_e}{R} \cdot \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T} \right) \right] \quad (4.4.33)$$

$$\beta_{rT}(T) = \exp \left[\frac{Q_r}{R} \cdot \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T} \right) \right] \quad (4.4.34)$$

$$\beta_{sT}(T) = \exp \left[\frac{Q_s}{R} \cdot \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T} \right) \right] \quad (4.4.35)$$

Dabei ist

T	die Temperatur [K];
T_0	die Bezugstemperatur (=293 [K]);
R	die allgemeine Gaskonstante;

- Q_e die Aktivierungsenergie für Hydratation,
Empfehlung nach Bazant, Z. P: 2700 [K];
- Q_r die Aktivierungsenergie für viskose Prozesse,
Empfehlung nach Bazant, Z. P: 5000 [K];
- Q_s die Aktivierungsenergie für die Relaxation vor der Mikrovorspannung,
Empfehlung nach Bazant, Z. P: 3000 [K].

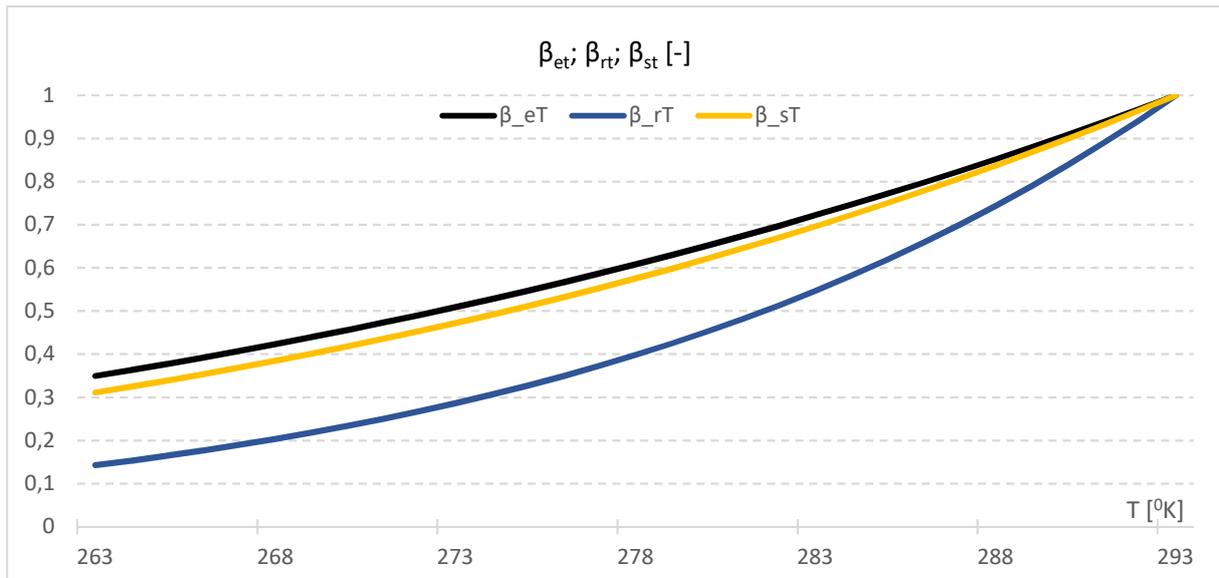


Bild 4.4.23: $\beta_{eT}(T)$; $\beta_{rT}(T)$; $\beta_{sT}(T)$ Werte abhängig von der Temperatur im Bereich von 10°C - 20°C ; die Aktivierungsenergie wurden nach der Empfehlung von Bazant, Z. P angenommen ($Q_e= 2700$ [K]; $Q_r= 5000$ [K]; $Q_s= 3000$ [K])

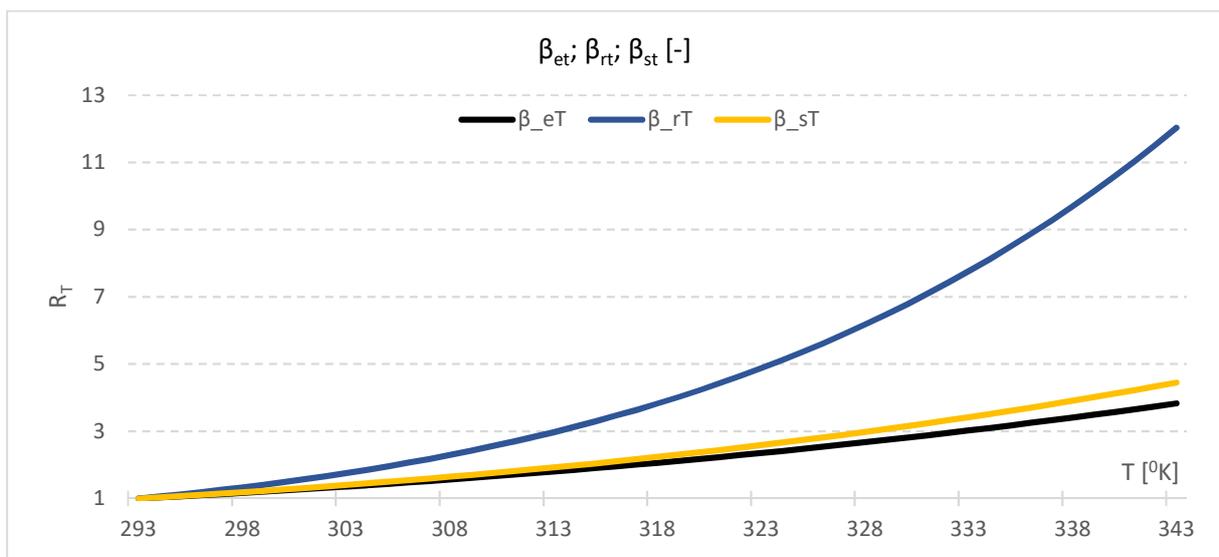


Bild 4.4.24: $\beta_{eT}(T)$; $\beta_{rT}(T)$; $\beta_{sT}(T)$ Werte abhängig von der Temperatur im Bereich von 20°C - 70°C ; die Aktivierungsenergie wurden nach der Empfehlung von Bazant, Z. P angenommen ($Q_e= 2700$ [K]; $Q_r= 5000$ [K]; $Q_s= 3000$ [K])

$$\beta_{eh}(h) = \frac{1}{1 + [\alpha_e(1-h)]^4} \quad (4.4.36)$$

$$\beta_{rh}(h) = \alpha_r + (1 - \alpha_r) \cdot h^2 \quad (4.4.37)$$

$$\beta_{sh}(h) = \alpha_s + (1 - \alpha_s) \cdot h^2 \quad (4.4.38)$$

wobei der Wert α_e ist gleich 10; und die Werte für α_r und α_s sind gleich 0,1 nach der Empfehlung von Bazant, Z. P. nach den Daten der vorherigen Experimente. In den Gleichungen (4.4.36) - (4.4.38) bezeichnen h die relative Porenfeuchtigkeit.

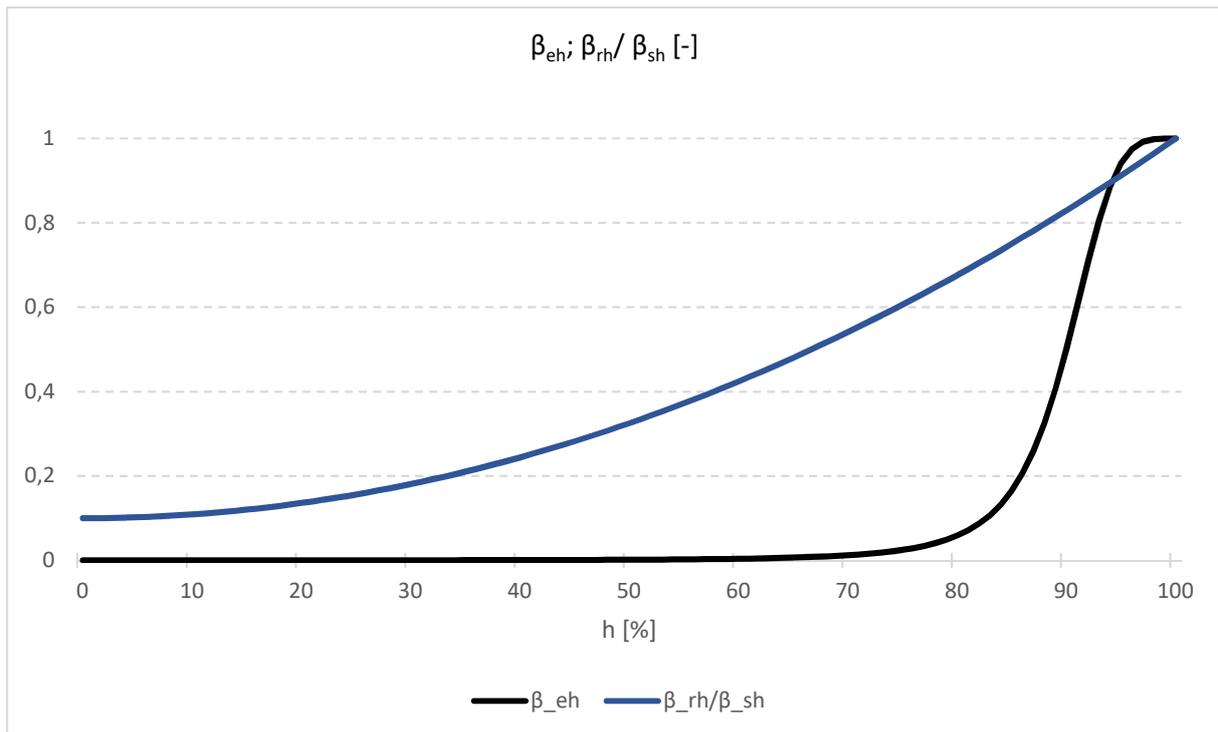


Bild 4.4.25: $\beta_{eh}(h)$; $\beta_{rh}(h)/\beta_{sh}(h)$ Werte abhängig von der Porenfeuchtigkeit

Nach RILEM Modell B4 ist es genug für die praktische Anwendung nur einen Beiwert statt der Gleichungen (4.4.33) - (4.4.35) zu verwenden, nach Gleichung (4.4.39).

$$\beta_T(T) = \exp \left[\frac{Q}{R} \cdot \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T} \right) \right] \quad (4.4.39)$$

Für den Wert Q/R nach Modell B4 ist 4000 [K] empfohlen.

Für die praktische Anwendung nach Modell B4 ist:

$$\frac{dt_e}{dt} = \beta_T(T) \quad (4.4.40)$$

Für eine allgemeine Temperaturhistorie kann die äquivalente Zeit durch die Integration von der Gleichung (4.4.40) erhalten werden, nach Gleichung (4.4.41).

$$t_e(t) = \int_0^t \beta_T(T(t')) dt' \quad (4.4.41)$$

Nach Bazant, Z. P [21] gibt es die Möglichkeit den Beiwert $\beta_T(T)$ vor der Belastung (in dem betrachteten Experiment: Vorspannung) mit $\beta_T(T)$, und nach der Belastung mit $\beta'_T(T)$ zu berücksichtigen. Die Werte der $\beta_T(T)$ kann nach Gleichung (4.4.42), und der Wert der $\beta'_T(T)$ kann nach Gleichung (4.4.44) berechnet werden.

$$\beta_T = \exp \left[\frac{U_h}{R} \cdot \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T} \right) \right] \quad (4.4.42)$$

$$\frac{U_h}{R} = 5000 \text{ [}^0K\text{]} \quad (4.4.43)$$

$$\beta'_T = \exp \left[\frac{U_c}{R} \cdot \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T} \right) \right] \quad (4.4.44)$$

$$\frac{U_c}{R} = 3418 \cdot w^{-0,27} \cdot \bar{f}_c^{0,54} \quad (4.4.45)$$

$$t'_e = \int_0^{t'} \beta_T(t'') dt'' \quad (4.4.46)$$

$$t_T - t'_e = \int_{t'}^t \beta'_T(t') dt' \quad (4.4.47)$$

Dabei ist

- U_h Aktivierungsenergie der Zementhydratation;
- U_c Aktivierungsenergien des Kriechens, die die Beschleunigung der Kriechrate und die Vergrößerung des Kriechens aufgrund des Temperaturanstiegs beschreiben.

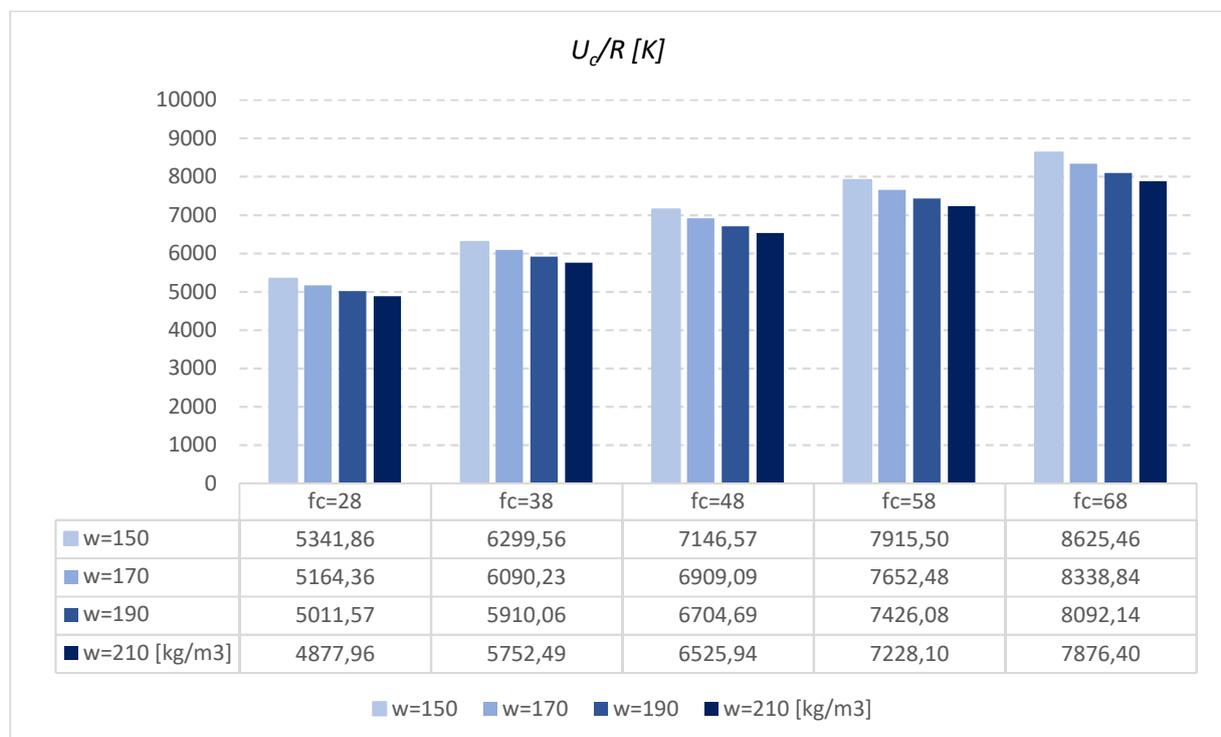


Bild 4.4.26: U_c/R Werte nach der Empfehlung Bazant, Z. P [21]

Das Modell B4 empfiehlt die Kriechfunktion für das Grundkriechen um einen multiplikativen Faktor R_T zu erhöhen. Den Wert R_T kann nach Gleichung (4.4.39) berechnet werden, mit $Q/R=4000$ [K], oder nach [21]:

$$R_T = \exp \left[\frac{U'_c}{R} \cdot \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T} \right) \right] \quad (4.4.48)$$

$$U'_c = 0,18 \cdot U_c \quad (4.4.49)$$

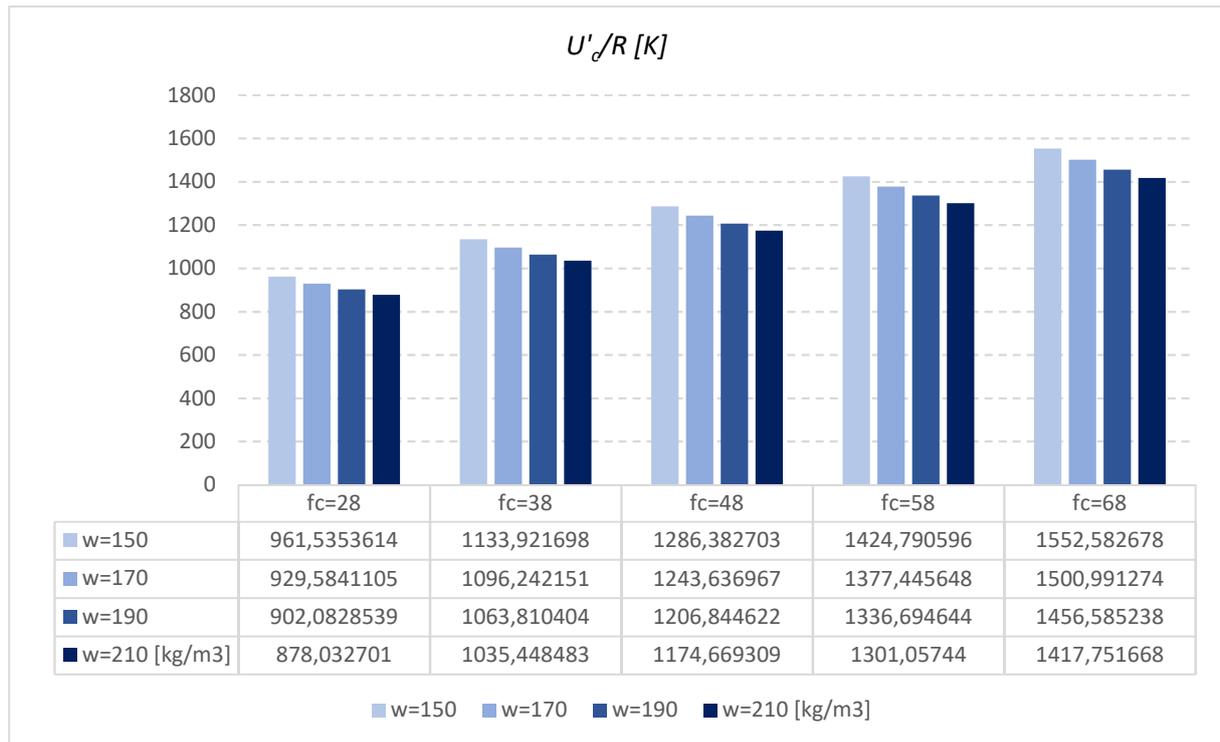


Bild 4.4.27: U'_c/R Werte nach der Empfehlung Bazant, Z. P [21]

Die Temperatureffekte auf die Kriech- und Schwindverzerrungen können nach Gleichung (4.4.51) berechnet werden.

$$\varepsilon(t) = \sigma \cdot [q_1 + R_T \cdot J_b(t_e(t), t_e(t')) + J_d(t_e(t), t_e(t'))] + \varepsilon_{sh,tot}(t_e(t), t_{e0}) \quad (4.4.50)$$

Die Kriechverzerrungen sind:

$$\varepsilon_{c\sigma}(t) = \sigma \cdot [q_1 + R_T \cdot J_b(t_e(t), t_e(t')) + J_d(t_e(t), t_e(t'))] \quad (4.4.51)$$

Die Schwindverzerrungen sind $\varepsilon_{sh,tot}(t_e(t), t_{e0})$.

4.4.6. Vergleich der Ergebnisse des Experiments mit dem Modell B4

Alle Kriterien nach Kapitel 4.4.1 sind erfüllt, deswegen ist Modell B4 anwendbar.

4.4.6.1. Schwinden

Bild 4.4.28- 4.4.29; Bild E.1-E.4 (Bilder E.1- E.4 befinden sich im Anhang E):

Einfluss der Rohdichte:

Der Maß des Schwindens nach Modell B4 hängt von der Rohdichte nach Gleichung (4.4.5) und nach Gleichung (4.4.9) ab. Die Rohdichte wurde deswegen gemäß den Angaben der geplanten Betoneigenschaften (braune Linie), nach Kapitel 3.2.2; und gemäß den Laborergebnissen (durchgehende graue Linie), in dem Alter von 28 Tagen, nach Kapitel 3.2.1 verwendet. Die anderen Kurven (schwarze Linie; rote Linien) berücksichtigten die Rohdichte nach den Laborergebnissen.

Einfluss des temperaturangepassten Betonalters:

-die horizontale Skalierung der Schwindkurve-

Das temperaturangepasste Betonalter beeinflusst nach Gleichung (4.4.46) das Schwinden des Betons. Die roten Linien haben das temperaturangepasste Betonalter mit Tagesmittelwerten der Temperatur, nach Bild B.13 und Bild B.14, während die schwarze Linie mit den Mittelwerten der Temperatur über die ganze Messperiode, nach Tabelle 3.3 berücksichtigt. Die graue und die braune Linie berücksichtigten das temperaturangepasste Betonalter nicht.

Einfluss der relativen Luftfeuchtigkeit:

Die relative Luftfeuchte beeinflusst nach Gleichung (4.4.6) das Trocknungsschwinden.

Die relative Luftfeuchte wurde nach Gleichung (3.4) mit einem Mittelwert über die ganze Messperiode berücksichtigt (durchgehende Linien) oder mit Tagesmittelwerten (gestrichelte rote Linie), nach Bild 3.21.

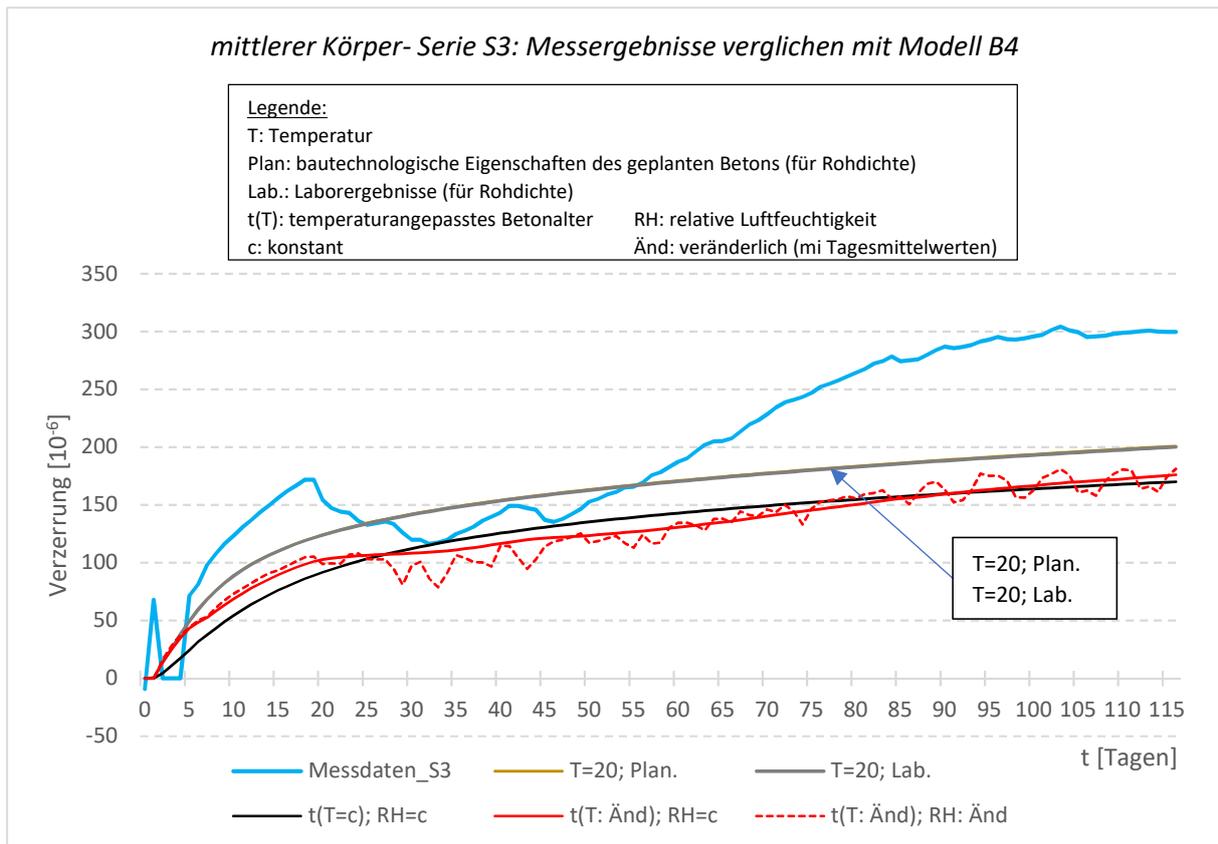


Bild 4.4.28: Schwinden nach Modell B4, verglichen mit den Messwerten des Experiments; mittlerer Körper (mit 500x500 [mm] Querschnitt); Serie S3

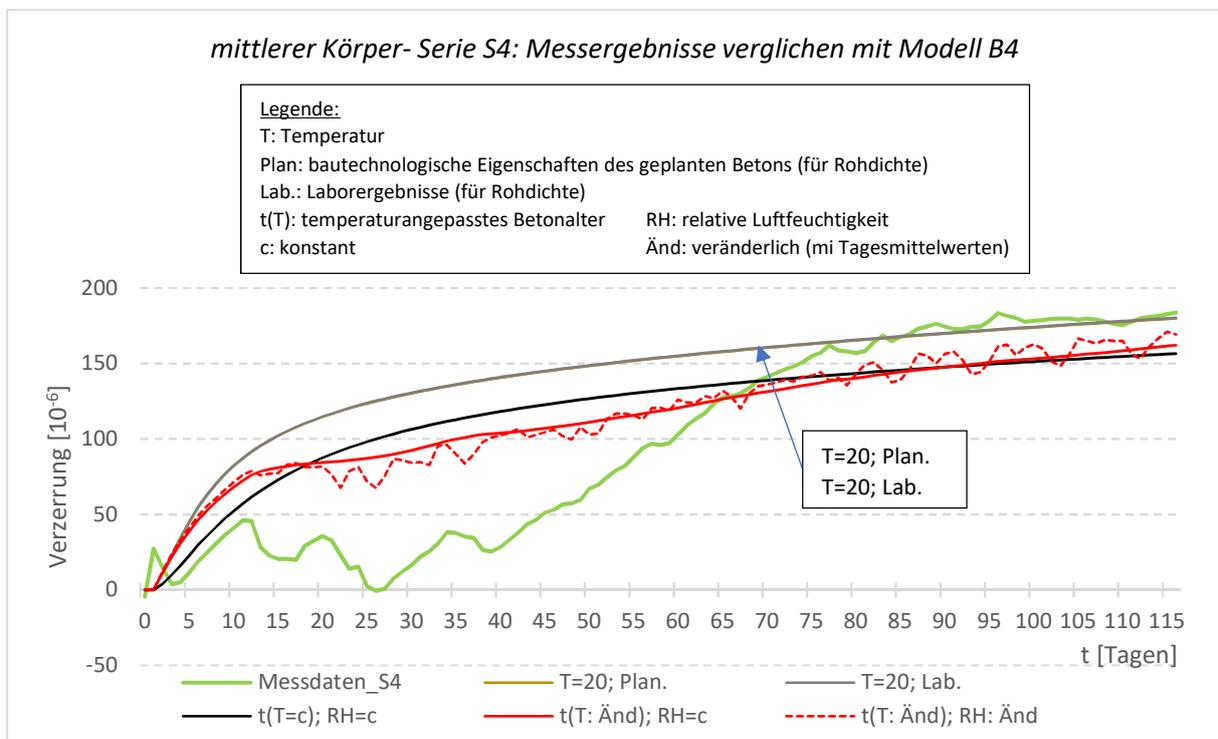


Bild 4.4.29: Schwinden nach Modell B4, verglichen mit den Messwerten des Experiments; mittlerer Körper (mit 500x500 [mm] Querschnitt); Serie S3

Auswertung des Schwindens- Bild 4.4.28; Bild 4.4.29; Bild E.1-E.4:

Einfluss der Rohdichte

(graue Linie, braune Linie vergleichen mit den Messwerten):

Nach den Bildern werden die Ergebnisse sehr wenig davon beeinflusst, ob die Rohdichte nach den geplanten Betoneigenschaften oder nach den Laborergebnissen verwendet wurde. Der Unterschied ist so gering, dass es in den Diagrammen nicht sichtbar ist. Tabelle 4.4.6 für Serie S3 und Tabelle 4.4.7 für Serie S4 zeigen die Werte der Schwindkurven nach Anwendung der Rohdichte nach den betontechnologischen Eigenschaften des geplanten Betons und nach den Laborergebnissen.

		t=1	t=2	3	4	5	6	7	8	9	10
großer Kp.	Plan	0,42	9,21	19,12	29,78	39,82	48,77	56,56	63,32	69,18	74,29
	Lab.	0,42	9,18	19,08	29,72	39,76	48,69	56,48	63,23	69,08	74,19
mittlerer Kp.	Plan	0,42	13,87	25,71	37,85	49,13	59,16	67,94	75,60	82,31	88,21
	Lab.	0,42	13,80	25,61	37,73	48,99	59,01	67,78	75,42	82,11	88,00
kleiner Kp.	Plan	0,42	23,29	39,00	54,08	67,83	80,03	90,74	100,17	108,51	115,93
	Lab.	0,42	23,15	38,80	53,84	67,56	79,72	90,41	99,81	108,12	115,52

Tabelle 4.4.6: Werte der Schwindkurve mit der Annahme der Rohdichte nach den geplanten Betoneigenschaften und Laborergebnissen, für Serie S3, innerhalb den ersten 10 Tagen [der Einheit ist 10^{-6}]

		t=1	t=2	3	4	5	6	7	8	9	10
großer Kp.	Plan	0,42	8,12	17,59	27,90	37,65	46,34	53,90	60,44	66,11	71,04
	Lab.	0,42	8,13	17,60	27,92	37,67	46,36	53,93	60,48	66,14	71,07
mittlerer Kp.	Plan	0,42	11,68	22,62	34,07	44,77	54,29	62,62	69,86	76,17	81,70
	Lab.	0,42	11,71	22,66	34,11	44,82	54,35	62,68	69,92	76,24	81,78
kleiner Kp.	Plan	0,42	18,83	32,72	46,43	59,03	70,23	80,06	88,68	96,27	103,01
	Lab.	0,42	18,88	32,79	46,51	59,13	70,34	80,17	88,81	96,41	103,16

Tabelle 4.4.7: Werte der Schwindkurve mit der Annahme der Rohdichte nach den geplanten Betoneigenschaften und Laborergebnissen, für Serie S4, innerhalb den ersten 10 Tagen [der Einheit ist 10^{-6}]

Einfluss des temperaturangepassten Betonalters:

(durchgehende Linien)

Der Verlauf der Messwerte des Schwindens (Gradienten der Kurve) stimmt am besten mit den Berechnungskurven überein, die das temperaturangepasste Betonalter mit Tagesmittelwerten der Temperatur berücksichtigt (rote Linien).

Einfluss der relativen Luftfeuchte:

(rote Linien)

Die Berücksichtigung der relativen Luftfeuchtigkeit mit Tagesmittelwerten resultierte in keiner besseren Übereinstimmung mit den Messergebnissen, aber es ergaben sich manchmal Abnahmen in den Schwindverzerrungen. Der Grund für die Abnahme der Verzerrungen -wenn

die relative Luftfeuchtigkeit mit Tagesmittelwerten berücksichtigt wurde- ist die Schwankung der k_h Werte, in Gleichung (4.4.3) (k_h wurde nach Gleichung (4.4.6-1) - (4.4.6-2) berechnet). Bild 4.4.30 stellt die Werte k_h im Laufe der Zeit dar, für die Serie S3 mit Berücksichtigung der relativen Luftfeuchtigkeit mit Tagesmittelwerten.

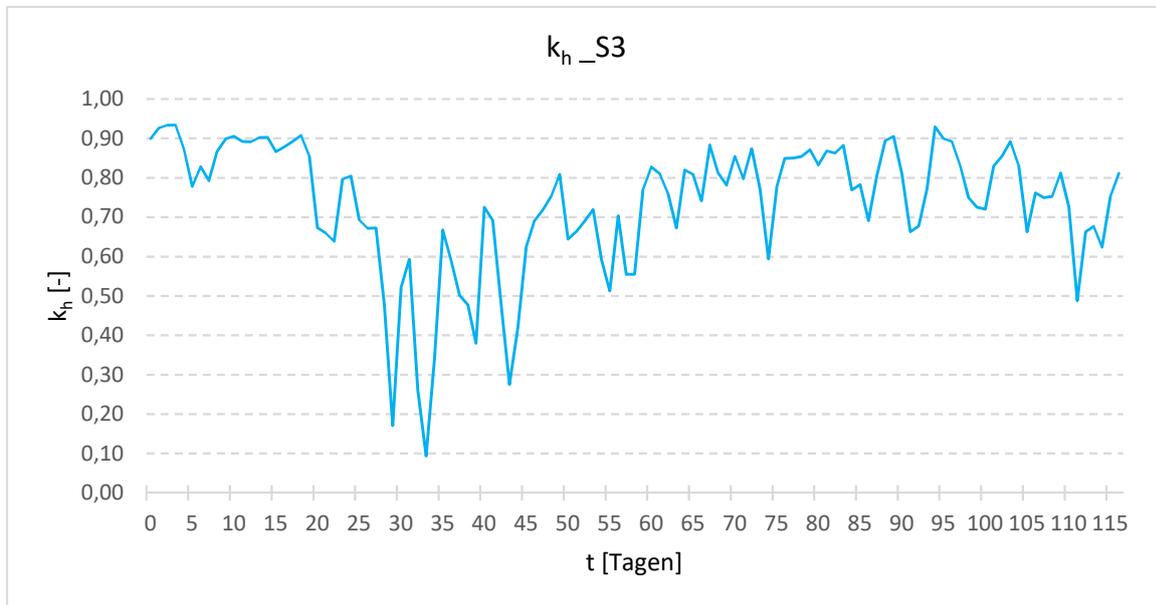


Bild 4.4.30: k_h Werte im Laufe der Zeit; Serie S3

4.4.6.2. Kriechen

Bild 4.4.31-4.4.32; Bild E.5- E.8 (Bilder E.5- E.8 befinden sich im Anhang E):

Einfluss des Elastizitätsmoduls:

Die elastische Dehnung wird durch die Gleichung (4.4.17) und durch die Gleichungen (4.4.18) - (4.4.24) berücksichtigt. Nach Gleichung (4.4.17) beeinflusst der Elastizitätsmodul die elastische Dehnung, deswegen wurde der Elastizitätsmodul nach den Laborergebnissen (gestrichelte graue Linie) nach Kapitel 3.2.3.1 und nach den In-situ-Messungen (alle anderen Linien) nach Kapitel 3.2.3.2 verwendet.

Einfluss der Rohdichte:

Nach Gleichung (4.4.27) und Gleichung (4.4.4) - (4.4.5) beeinflusst die Rohdichte das Kriechen. Bei der braunen Linie wurde die Rohdichte nach den Laborergebnissen nach Kapitel 3.2.1 verwendet und bei den anderen Linien wurden die Rohdichte nach den geplanten Betoneigenschaften nach Kapitel 3.2.2 verwendet.

Die anderen Werte, die das Kriechverhalten nach Modell B4 beeinflussen, wie Wasserzementwert, Bindemittelgehalt, wurden nach den geplanten Betoneigenschaften nach Kapitel 3.2.2 verwendet.

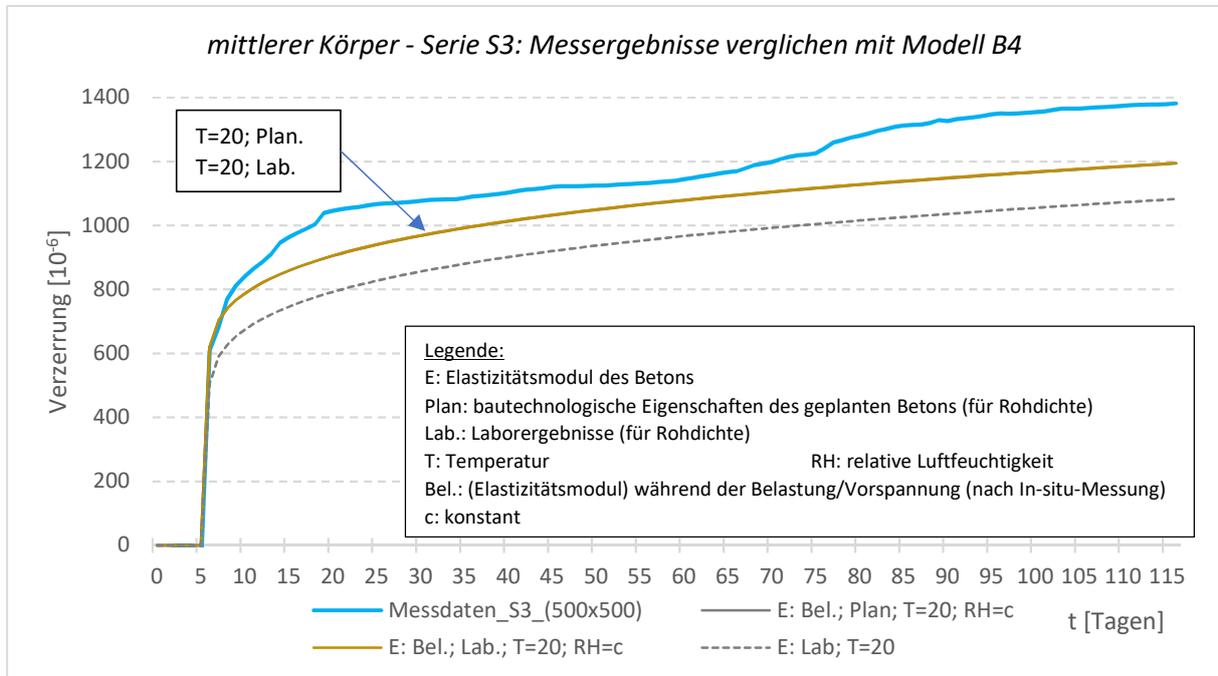


Bild 4.4.31: Kriechen nach Modell B4, verglichen mit den Messwerten des Experiments; Körper 2; Serie S3

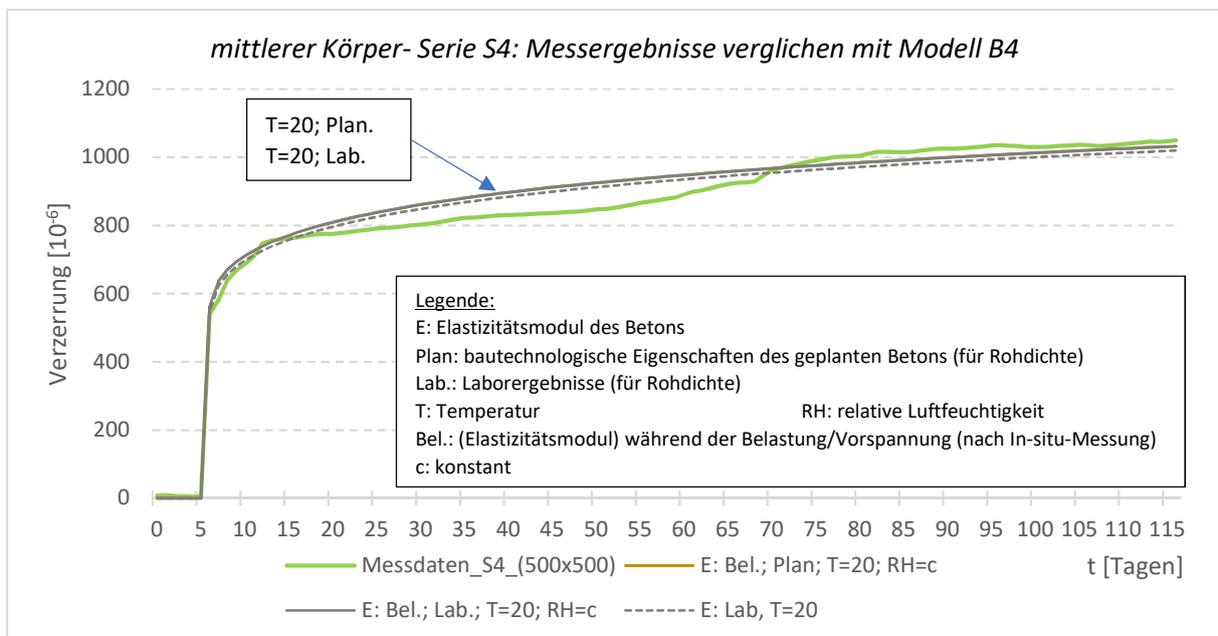


Bild 4.4.32: Kriechen nach Modell B4, verglichen mit den Messwerten des Experiments; Körper 2; Serie S3

Auswertung des Bildes 4.4.31; Bild 4.4.32 und Bild E.5-E.8:

Einfluss des Elastizitätsmoduls:

(durchgehende und gestrichelte graue Linie vergleichen)

Nach RILEM Modell B4 ergab sich ein kleinerer Unterschied, je nachdem ob der Elastizitätsmodul nach Laborergebnissen oder nach den In-situ-Messungen berechnet wurde als bei den anderen Modellen.

Einfluss der Rohdichte:

(durchgehende und doppelte graue Linie)

Nach den Bildern beeinflusst es die Ergebnisse sehr wenig, ob die Rohdichte nach den geplanten Betoneigenschaften oder nach den Laborergebnissen verwendet wurde. Der Unterschied ist so klein, dass er in den Diagrammen nicht sichtbar ist. Tabelle 4.4.8 zeigt für Serie S3 und Tabelle 4.4.9 zeigt für Serie S4 die Werte der Schwindkurven nach Anwendung der Rohdichte nach den betontechnologischen Eigenschaften des geplanten Betons und nach den Laborergebnissen.

		6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
großer Kp.	Plan	539,74	613,66	645,92	668,62	686,70	701,92	715,14	726,88	737,46	747,11
	Lab.	539,78	613,74	646,02	668,74	686,83	702,06	715,30	727,05	737,63	747,28
mittlerer Kp.	Plan	622,03	703,71	740,52	766,70	787,69	805,44	820,92	834,71	847,18	858,59
	Lab.	622,08	703,82	740,66	766,87	787,88	805,65	821,15	834,95	847,44	858,85
kleiner Kp.	Plan	645,82	740,05	784,51	816,70	842,78	865,02	884,56	902,09	918,03	932,70
	Lab.	645,90	740,21	784,73	816,96	843,07	865,33	884,90	902,45	918,41	933,10

Tabelle 4.4.8: Werte der Kriechkurve mit der Annahme der Rohdichte nach den geplanten Betoneigenschaften und Laborergebnisse, für Serie S3, innerhalb den ersten 10 Tagen der Belastung [der Einheit ist 10⁻⁶]

		6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
großer Kp.	Plan	543,70	615,86	646,39	667,67	684,53	698,68	710,94	721,80	731,57	740,46
	Lab.	543,69	615,83	646,36	667,63	684,49	698,64	710,90	721,76	731,52	740,41
mittlerer Kp.	Plan	563,26	638,04	670,34	692,99	711,01	726,17	739,34	751,02	761,54	771,13
	Lab.	563,25	638,01	670,30	692,95	710,96	726,12	739,28	750,96	761,48	771,06
kleiner Kp.	Plan	608,79	704,91	734,53	757,48	776,52	792,93	807,40	820,40	832,21	843,05
	Lab.	608,77	704,86	734,47	757,41	776,44	792,84	807,32	820,30	832,11	842,95

Tabelle 4.4.9: Werte der Kriechkurve mit der Annahme der Rohdichte nach den geplanten Betoneigenschaften und Laborergebnisse, für Serie S4, innerhalb den ersten 10 Tagen der Belastung [der Einheit ist 10⁻⁶]

Bild 4.4.33-4.4.34; Bild E.5- E.8 (Bilder E.5- E.8 befinden sich im Anhang E):

Einfluss der Temperatur und der relativen Luftfeuchtigkeit:

Der Einfluss der Temperatur wurde nach Gleichung (4.4.42) - (4.4.51) berücksichtigt und der Einfluss der relativen Luftfeuchtigkeit wurde nach den Gleichungen (4.4.27) - (4.4.28) berücksichtigt.

Bei der *schwarzen Linie* wurde die Mittelwerte über die ganze Messperiode für die relative Luftfeuchtigkeit (nach Gleichung (3.4): $RH_{M,S3}= 62,17$ [%]; und $RH_{M,S4}= 63,22$ [%]) und auch für die Temperatur (mittlere Körper: $T_{S3,m}=10,79$ °C; $T_{S4,m}= 11,43$ °C) nach Tabelle 3.3 verwendet.

Die *orange Linien* haben die Temperatur mit Tagesmittelwerten berücksichtigt (nach Bild 3.22 und Bild 3.23). Die *gestrichelte orange Linie* berücksichtigte die relative Luftfeuchte mit Tagesmittelwerten nach Bild 3.21 und die *durchgehende orange Linie* berücksichtigte die relative Luftfeuchte mit einem Mittelwert über die ganze Messperiode nach Gleichung (3.4), mit $RH_{M,S3}= 62,17$ [%] und mit $RH_{M,S4}= 63,22$ [%].

Die *roten Linien* berücksichtigten das temperaturangepasste Betonalter nach Gleichung (4.4.42) - (4.4.47) mit Tagesmittelwerten nach Bild 3.22 und Bild 3.23, aber für den Wert R_T - Gleichung (4.4.48) - wurde der Mittelwert der Temperatur über die Messperiode verwendet, nach Tabelle 3.3. Die *gestrichelte rote Linie* berücksichtigte die relative Luftfeuchte mit Tagesmittelwerten nach Bild 3.21 und die *durchgehende rote Linie* berücksichtigte die relative Luftfeuchte mit einem Mittelwert über die ganze Messperiode, nach Gleichung (3.4), mit $RH_{M,S3}= 62,17$ [%]; und mit $RH_{M,S4}= 63,22$ [%].

Die *graue und die braune Linie* haben die Temperaturänderung und die Änderung der Luftfeuchte nicht berücksichtigt. Die Temperatur wurde mit der braunen und mit den grauen Linien, mit 20 [°C], und die relative Luftfeuchtigkeit mit einem Mittelwert über die ganze Messperiode, (mit $RH_{M,S3}= 62,17$ [%]; und mit $RH_{M,S4}= 63,22$ [%]) nach Gleichung (3.4) angenommen.

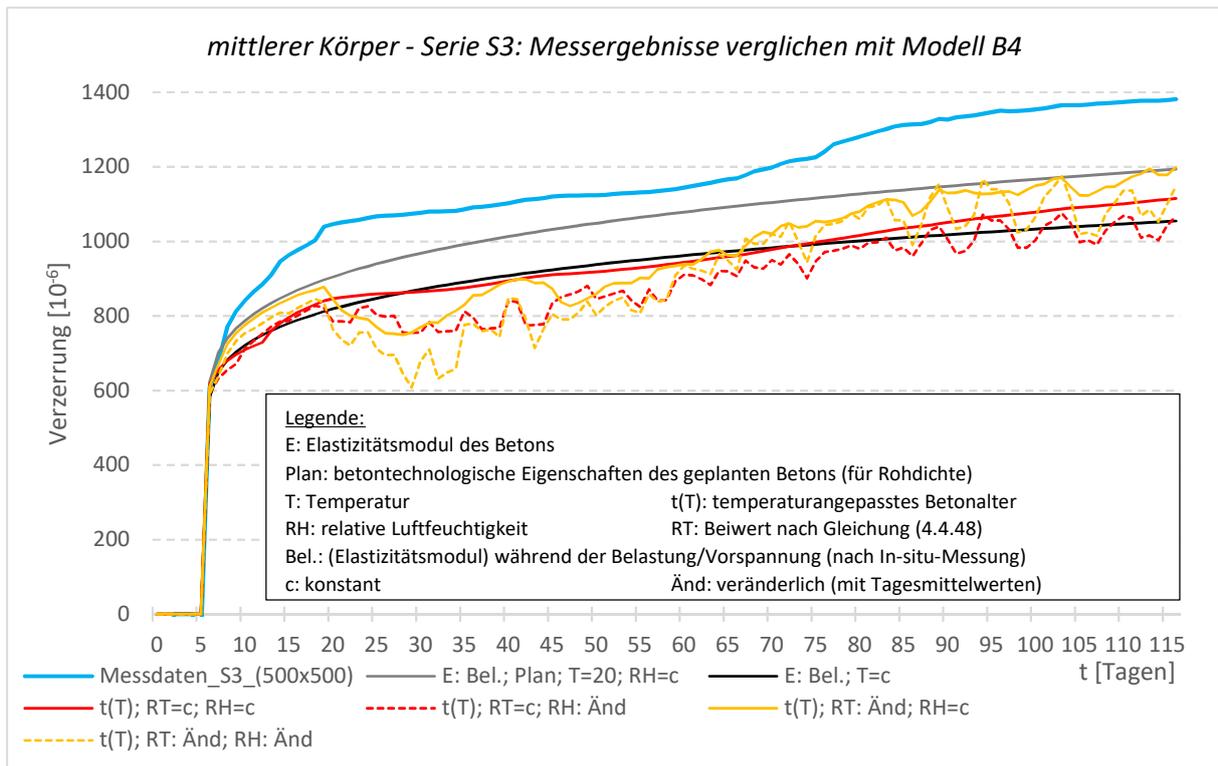


Bild 4.4.33: Kriechen nach Modell B4, verglichen mit den Messwerten des Experiments; Körper 2; Serie S3

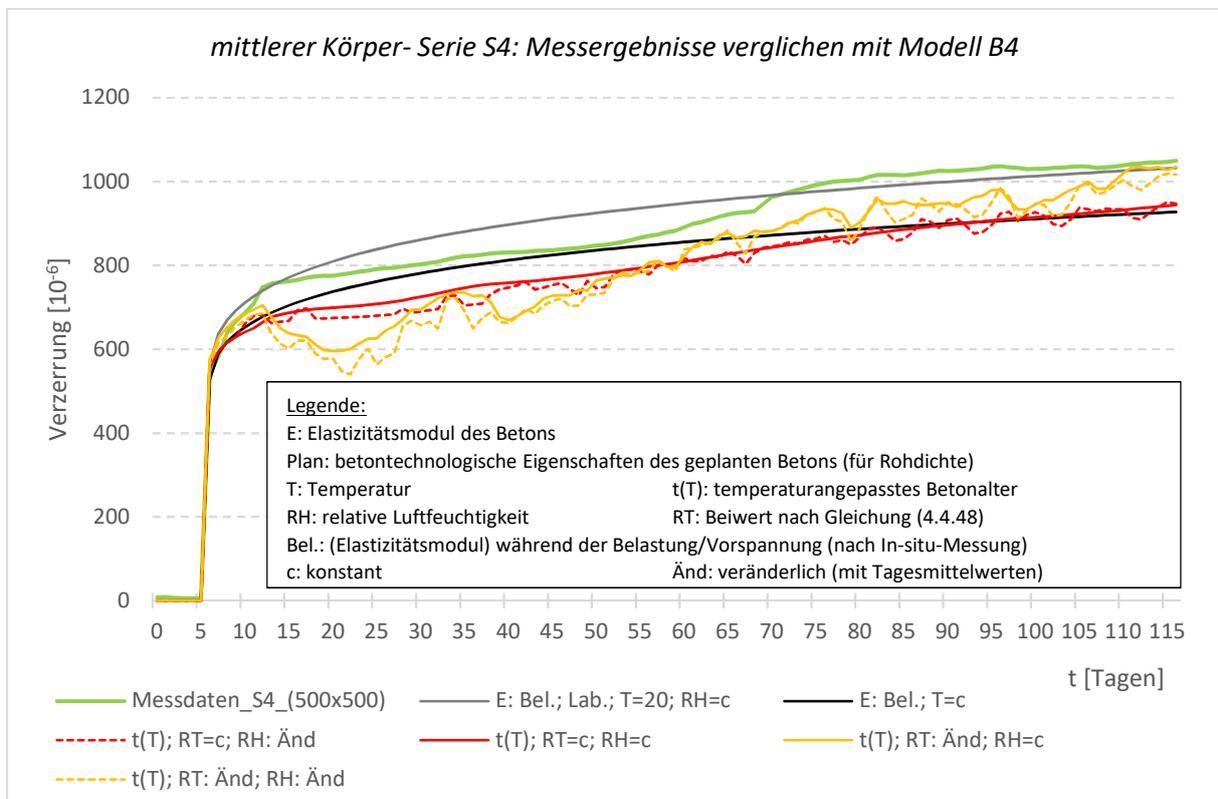


Bild 4.4.34: Kriechen nach Modell B4, verglichen mit den Messwerten des Experiments; Körper 2; Serie S3

Auswertung des Bildes 4.4.33, Bild 4.4.34 und Bild E.5-E.8:

Einfluss der Temperatur:

(graue, schwarze, rote und orange Linien)

Mit der Berücksichtigung der Temperatur auf das Kriechen des Betons, und mit Berücksichtigung des temperaturangepassten Betonalters, näherte sich der Verlauf der Kriechkurven den Messergebnissen besser an (Gradienten der Kurve) als die Werte ohne Berücksichtigung der Temperatur auf das Kriechen des Betons und ohne Berücksichtigung des temperaturangepassten Betonalters. Mit der Berücksichtigung des temperaturangepassten Betonalters mit Tagesmittelwerten verfolgten die Werte die Messergebnisse am besten.

Mit der Berücksichtigung der Temperatur in Gleichung (4.4.48) mit Tagesmittelwerten ergaben sich manchmal Abnahmen in den Kriechverzerrungen (orange Linien). Rückgänge in den Verzerrungen sind physikalisch nicht korrekt, weil die Verzerrungen infolge Kriechen, unter konstanten Spannungen nicht abnehmen dürfen. Der Grund für die Abnahme der Dehnungen nach dem Modell ist die Schwankung der R_T Werte in Gleichung (4.4.51).

Bild 4.4.35 zeigt die R_T Werte im Laufe der Zeit dar, für die Serie S3 mit Berücksichtigung der Temperatur mit Tagesmittelwerten.

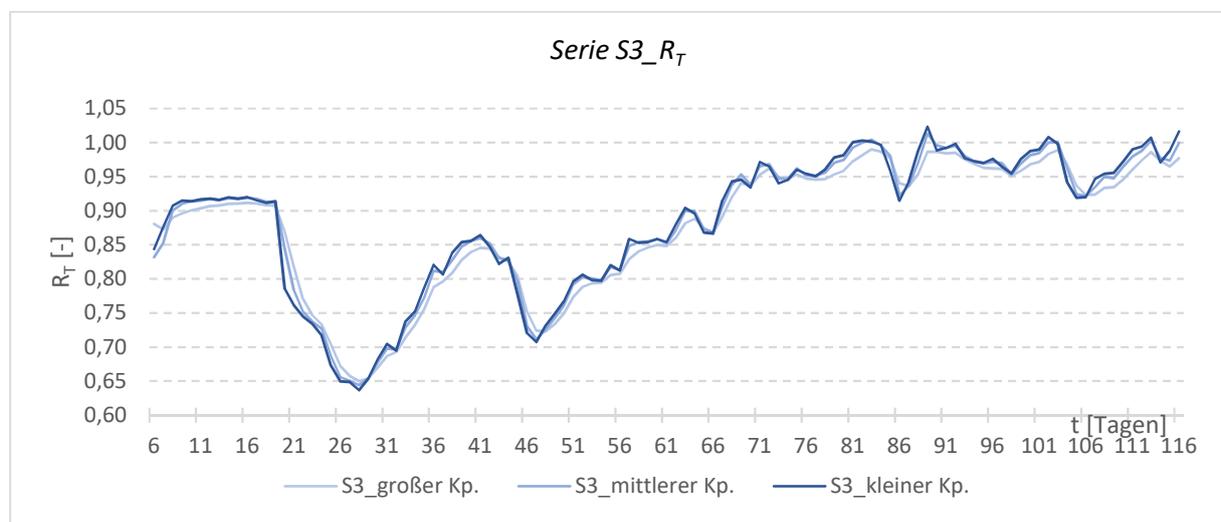


Bild 4.4.35: R_T Werte mit Tagesmittelwerten der Temperatur; Serie S3

Einfluss der relativen Luftfeuchte:

(rote Linien; orange Linie verglichen mit den Messwerten)

Die Berücksichtigung der relativen Luftfeuchtigkeit mit Tagesmittelwerten resultierte in keiner besseren Übereinstimmung mit den Messergebnissen (als mit Berücksichtigung der relativen Luftfeuchtigkeit mit einem Mittelwert über der Messperiode), aber es ergaben sich manchmal Abnahmen in den Kriechverzerrungen (gestrichelte rote Linie; gestrichelte orange Linie).

Rückgänge in den Verzerrungen sind physikalisch nicht korrekt, weil die Dehnungen infolge Kriechen unter konstanten Spannungen nicht abnehmen dürfen. Der Grund für die Abnahme der Dehnungen nach dem Modell, ist die Schwankung der $J_d(t, t', t_0)$ Werte in Gleichung (4.4.26).

Der Grund für die Schwankung der $J_d(t, t', t_0)$ Werte ist die Änderung der Werte von q_5 nach Gleichung (4.4.27) und die Änderung der Werte von $g(t-t_0)$ nach Gleichung (4.4.28) mit der Änderung der relativen Luftfeuchtigkeit.

Bild 4.4.31 zeigt die $J(t, t', t_0)$ Werte im Laufe der Zeit für die Serie S3 mit Berücksichtigung der relativen Luftfeuchtigkeit mit Tagesmittelwerten.

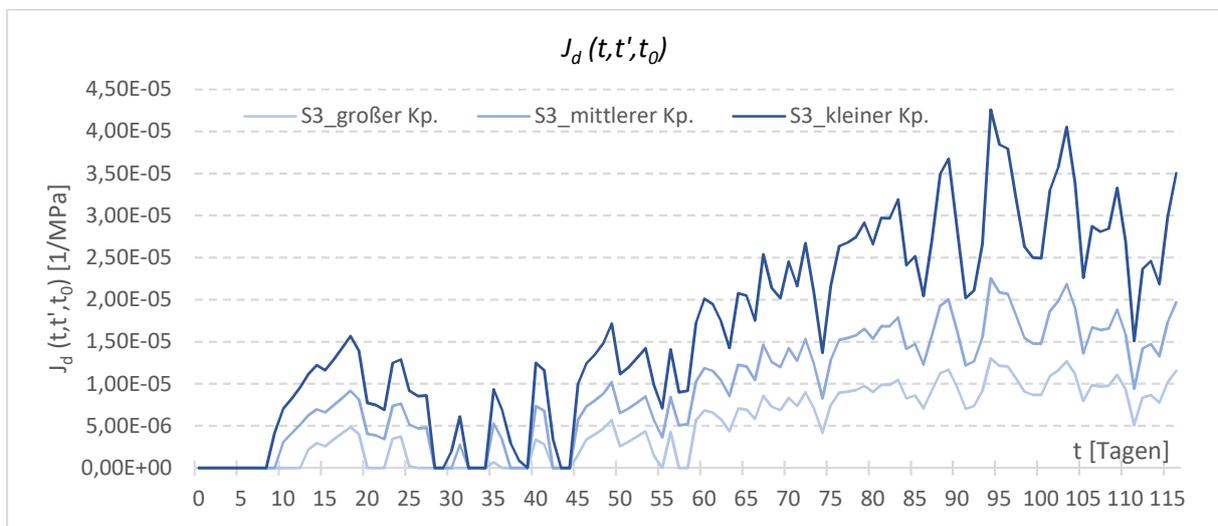


Bild 4.4.36: $J(t, t', t_0)$ Werte mit Tagesmittelwerten der relativen Luftfeuchtigkeit; Serie S3

5. Vergleich der Modelle nach EN 1992-1-1, MC 2010 und RILEM Modell B4 miteinander und mit den Ergebnissen des Experiments

Die Ergebnisse von Eurocode EN 1992-1-1 (Kapitel 4.2), Model Code 2010 (Kapitel 4.3) und RILEM Modell B4 (Kapitel 4.4) wurden miteinander und mit den Messwerten verglichen. Die vergleichenden Kurven der Modelle hatten die gleichen Annahmen (sie waren mit der Farbe Rot mit durchgehenden Linien in Kapitel 4 und in Anhang C-E gezeichnet).

- Das temperaturangepasste Betonalter (die horizontale Skalierung der Kriech- bzw. Schwindkurven) wurde mit Tagesmittelwerten berücksichtigt.
- MC 2010 Modell und RILEM Modell B4 schlagen auch andere Methoden vor (vertikalen Skalierung der Kriech- bzw. Schwindkurven, mit Skalierung ausgewählter Terme), um den Einfluss der Temperatur auf Kriechen -und Model Code 2010 auch auf Schwinden- zu berücksichtigen. Diese Beiwerte
 - nach Gleichung (4.3.33) - (4.3.40) und Gleichung (4.3.41) - (4.3.45) bei Model Code 2010;
 - und nach Gleichung (4.4.48) bei RILEM Modell B4wurden nach Tabelle 3.3 berücksichtigt (mit einem Mittelwert der Temperatur für die ganze Messperiode).

a) Ergebnisse für Schwinden (Bild 5.1- Bild 5.6):

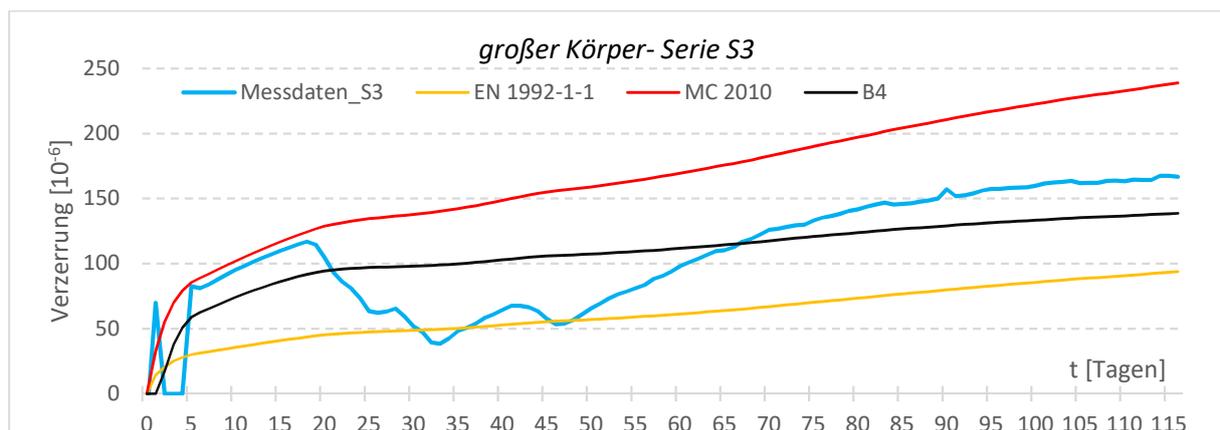


Bild 5.1: Schwinden: Vergleich der Modelle mit den Messergebnissen-großer Körper (mit 1000x1000 [mm] Querschnitt); Serie S3

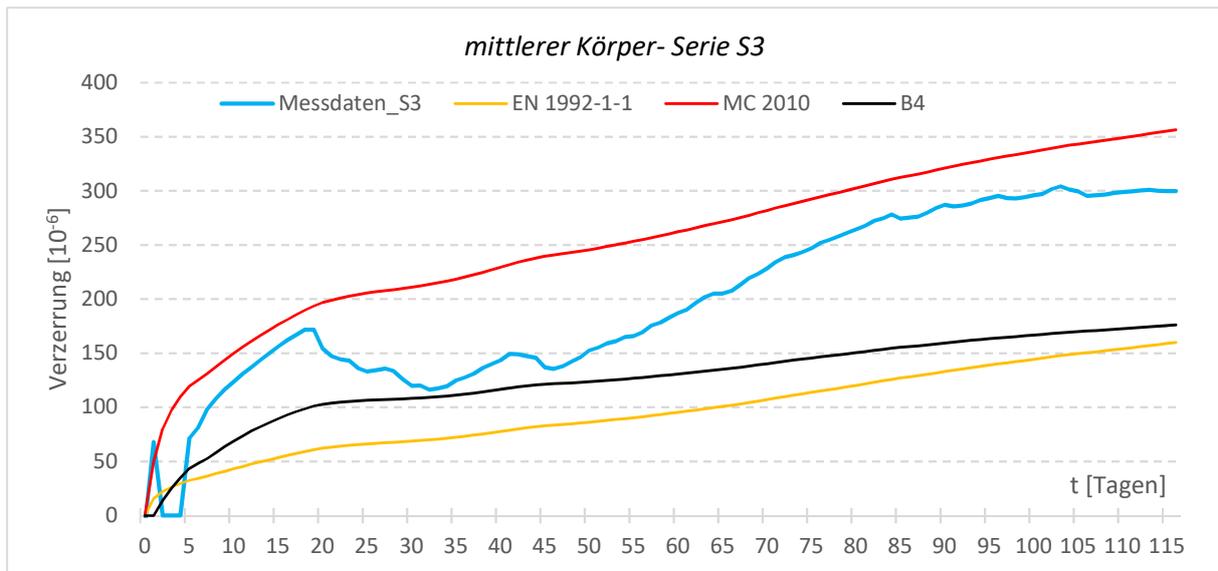


Bild 5.2: Schwinden: Vergleich der Modelle mit den Messergebnissen-
mittlerer Körper (mit 500x500 [mm] Querschnitt); Serie S3

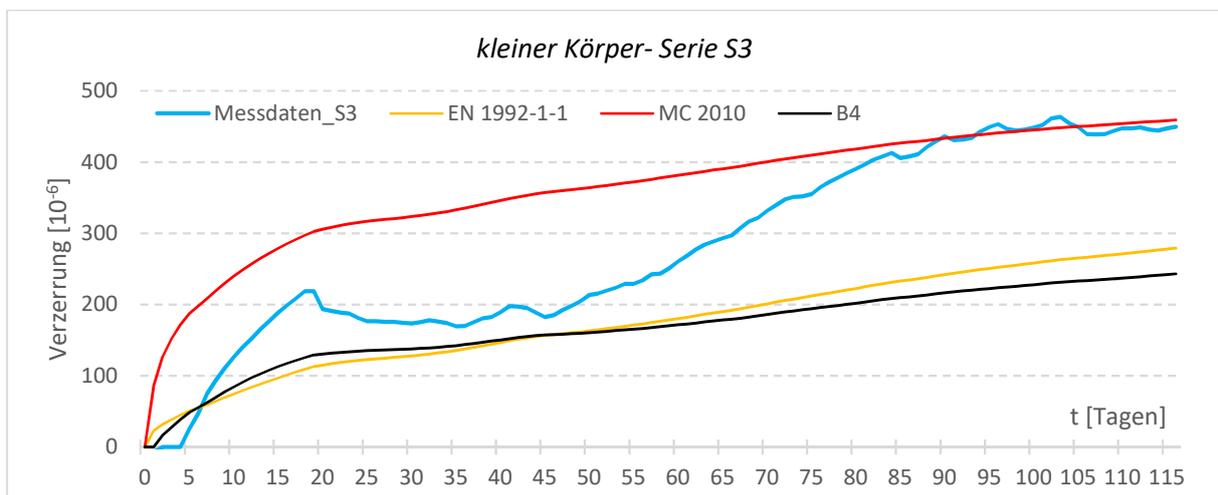


Bild 5.3: Schwinden: Vergleich der Modelle mit den Messergebnissen-
kleiner Körper (mit 250x250 [mm] Querschnitt); Serie S3

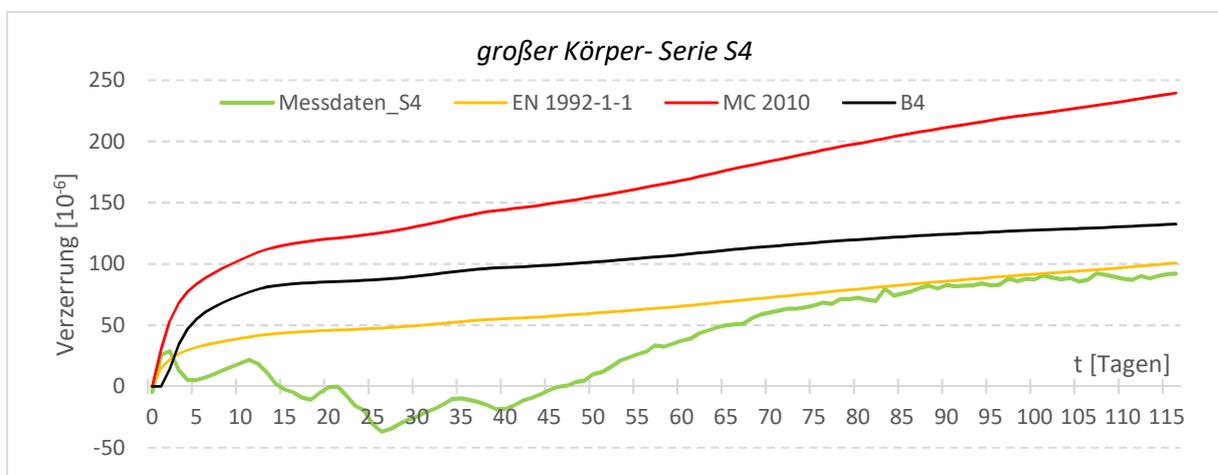
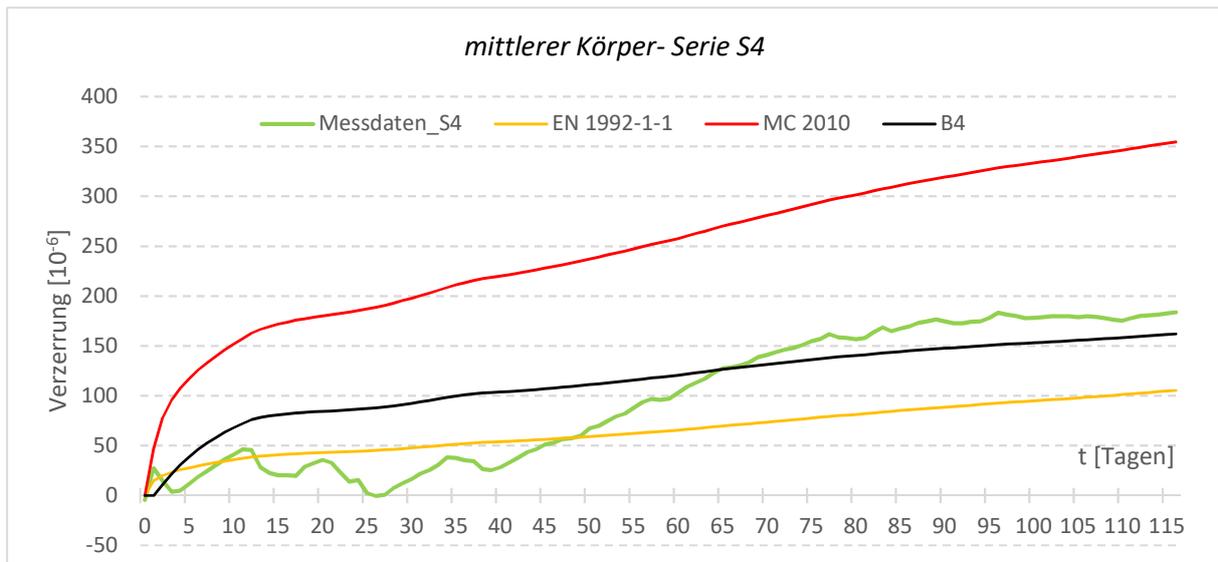
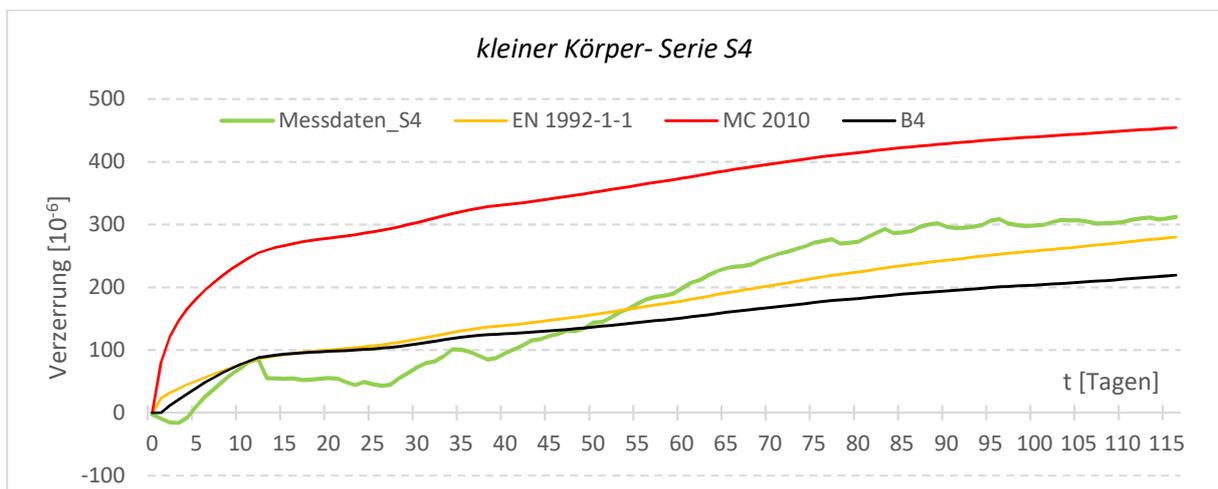


Bild 5.4: Schwinden: Vergleich der Modelle mit den Messergebnissen-
großer Körper (mit 1000x1000 [mm] Querschnitt); Serie S3



*Bild 5.5: Schwinden: Vergleich der Modelle mit den Messergebnissen-
mittlerer Körper (mit 500x500 [mm] Querschnitt); Serie S4*



*Bild 5.6: Schwinden: Vergleich der Modelle mit den Messergebnissen-
kleiner Körper (mit 250x250 [mm] Querschnitt); Serie S4*

Bild 5.1- Bild 5.6:

Die Ergebnisse nach Model Code 2010 zeigen die beste Übereinstimmung mit den Messwerten bei der Serie S3. Bei der Serie S4 zeigen aber die Ergebnisse nach Eurocode 2 und RILEM Modell B4 eine bessere Übereinstimmung mit den Messwerten als die Ergebnisse nach Model Code 2010.

b) Ergebnisse für Kriechen (Bild 5.7- Bild 5.12):

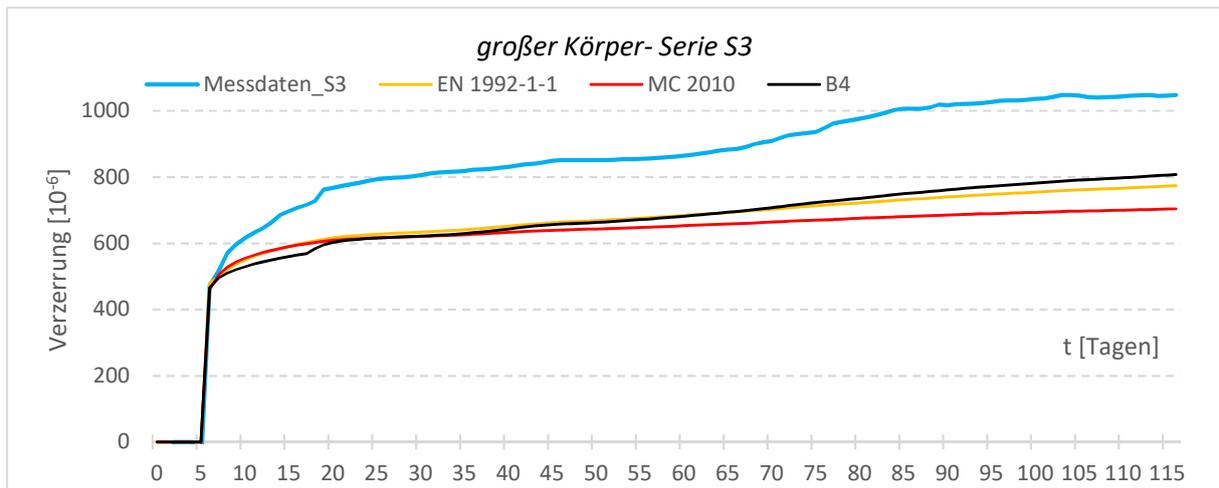


Bild 5.7: Kriechen: Vergleich der Modelle mit den Messergebnissen großer Körper (mit 1000x1000 [mm] Querschnitt); Serie S3

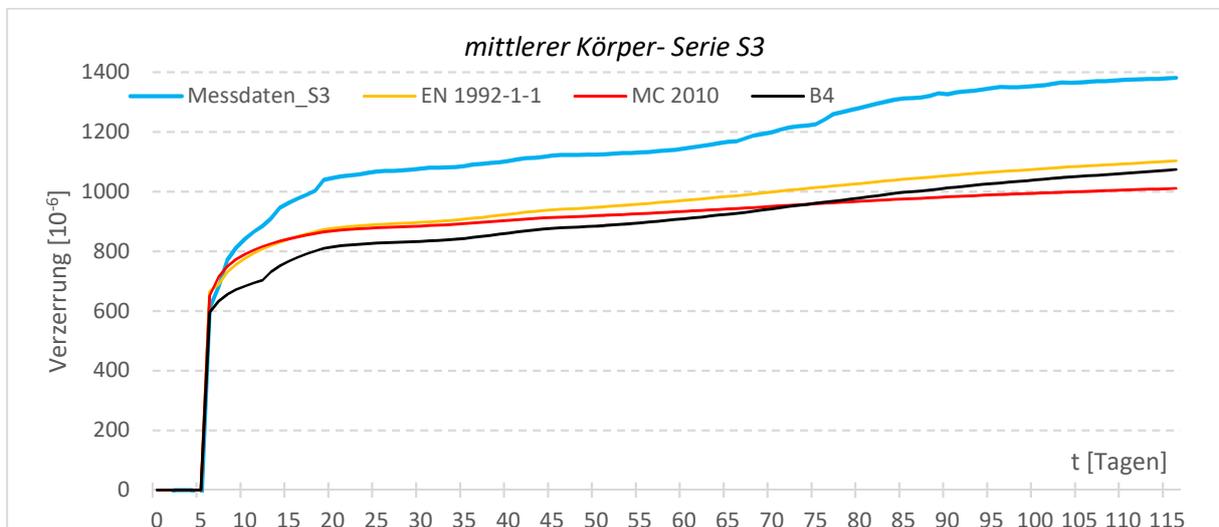


Bild 5.8: Kriechen: Vergleich der Modelle mit den Messergebnissen mittlerer Körper (mit 500x500 [mm] Querschnitt); Serie S3

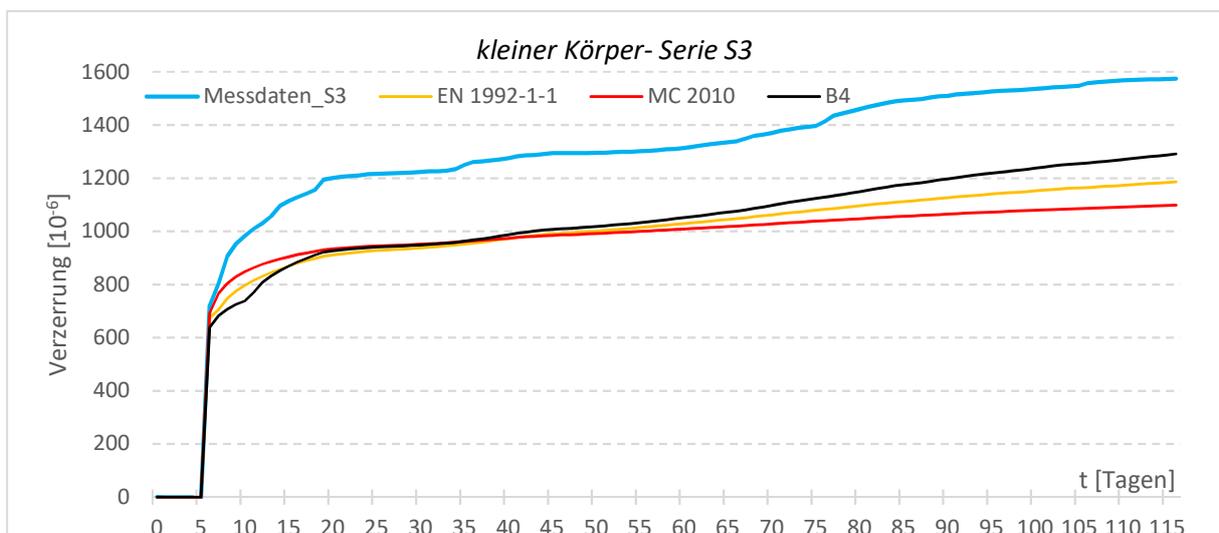


Bild 5.9: Kriechen: Vergleich der Modelle mit den Messergebnissen kleiner Körper (mit 250x250 [mm] Querschnitt); Serie S3

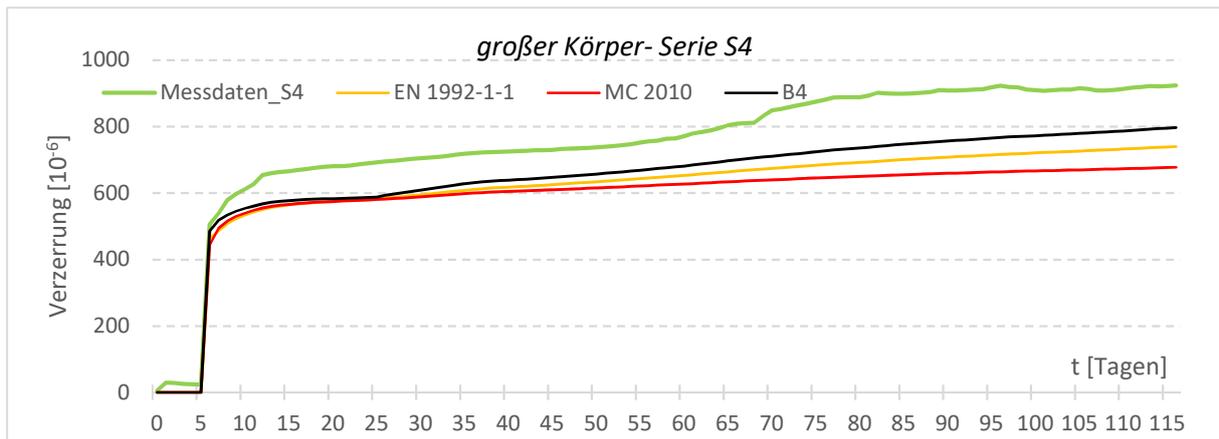


Bild 5.10: Kriechen: Vergleich der Modelle mit den Messergebnissen- großer Körper (1000x1000 [mm] Querschnitt); Serie S4

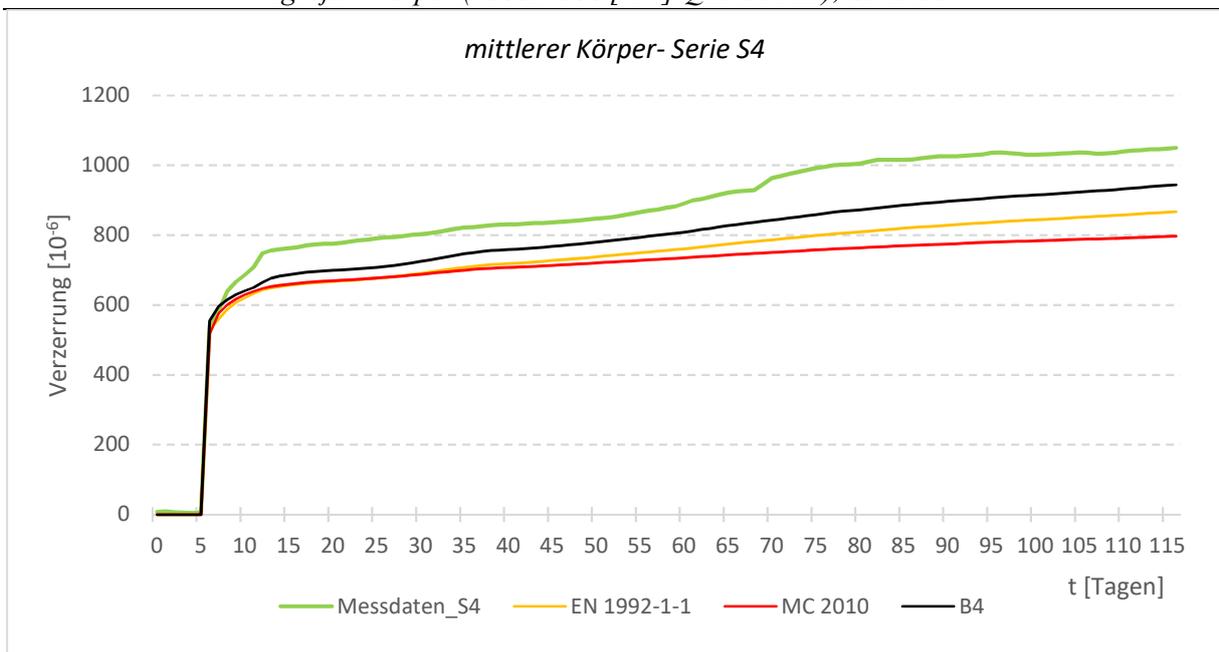


Bild 5.11: Kriechen: Vergleich der Modelle mit den Messergebnissen- mittlerer Körper (500x500 [mm] Querschnitt); Serie S4

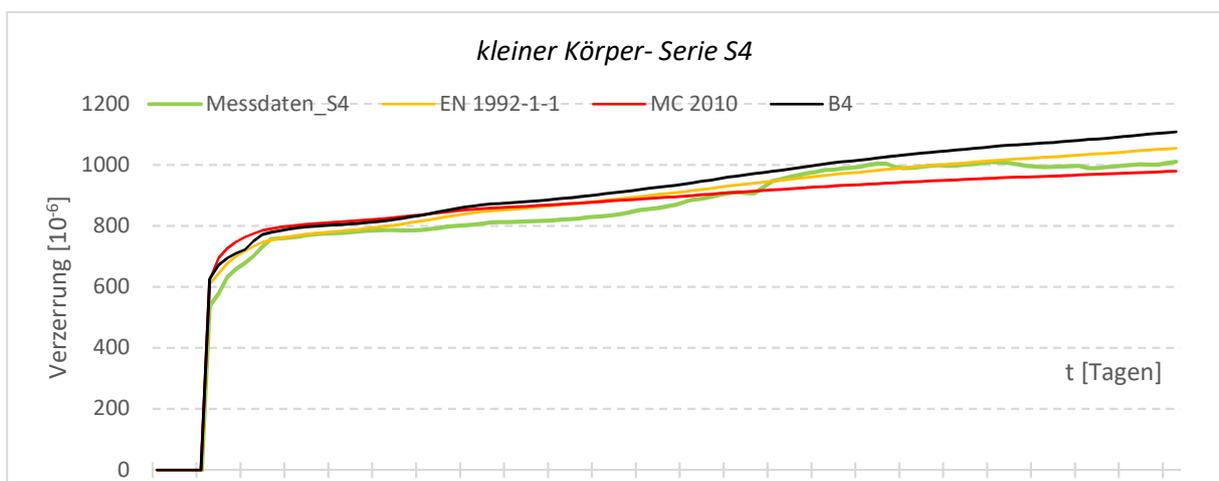


Bild 5.12: Kriechen: Vergleich der Modelle mit den Messergebnissen- kleiner Körper (250x250 [mm] Querschnitt); Serie S4

Bild 5.7 - Bild 5.12:

Die Ergebnisse nach RILEM Modell B4 zeigen die beste Übereinstimmung mit den Messwerten bei Serie S3 und auch bei Serie S4. Die Berechnungswerte von MC 2010, EN 1992-1-1 und RILEM Modell B4 waren aber in der Nähe voneinander.

6. Zusammenfassung und Ausblick

In der Diplomarbeit „Untersuchung von rheologischen Effekten an großformatigen Betonkörpern unter veränderlichen Umgebungsbedingungen“ wurden das Kriechen und Schwinden des Betons unter veränderlichen Umgebungsbedingungen betrachtet.

Im Teil Theorie wurde über die zeitabhängigen Verformungen des Betons geschrieben. Es wurde die Temperaturdehnung des Betons sowie Schwinden und Kriechen des Betons dargestellt.

In der Diplomarbeit wurden weiters die Ergebnisse eines Experiments für Kriechen und Schwinden mit Eurocode 2- EN 1992-1-1; Model Code 2010 und RILEM Modell B4 verglichen.

Das betrachtete Experiment wurde von der TU Wien und Karlsruhe Institut für Technologie durchgeführt. Die in dem Experiment verwendeten Körper waren viel größer als in den Laborexperimenten (die Querschnittfläche der benutzten großformatigen Betonkörper war fast sechzig Mal größer und die Länge war zehnfach länger als bei konventionellen Laborprobekörpern). Die relative Luftfeuchte und Temperatur änderte sich mit der Zeit, weil die Betonkörper draußen gelagert wurden. Mit der Änderung der relativen Luftfeuchtigkeit und der Temperatur konnte eine reale Konstruktion unter veränderlichen Umgebungsbedingungen simuliert werden.

Das betrachtete Experiment wurde detailliert in der Diplomarbeit dargestellt.

Nach Beschreibung des Experimentes wurden die drei betrachteten Modelle (EN 1992-1-1; Model Code 2010; RILEM Modell B4) mit vielen Diagrammen dargestellt. Nach Beschreibung der betrachteten Modelle wurden die Ergebnisse des Experiments mit den Messwerten und auch miteinander verglichen. Die in der Diplomarbeit betrachteten Modelle (EN 1992-1-1; Model Code 2010; RILEM Modell B4) stimmten mit den Messwerten des Experimentes ganz gut überein.

Bei der Analyse des Schwindens der Serie S3 zeigten die Ergebnisse nach Model Code 2010 die beste Übereinstimmung mit den Messwerten, aber bei der Serie S4 zeigten die Ergebnisse nach Eurocode 2 und RILEM Modell B4 eine bessere Übereinstimmung mit den Messwerten als die Ergebnisse nach Model Code 2010.

Für Kriechen zeigten die Ergebnisse nach RILEM Modell B4 die beste Übereinstimmung mit den Messwerten. Bei der Analyse des Kriechens waren die Berechnungswerte von MC 2010, EN 1992-1-1 und RILEM Modell B4 näher aneinander als bei der Analyse des Schwindens.

RILEM Modell B4 zeigte die beste Übereinstimmung mit den Messergebnissen, aber Modell B4 braucht auch betontechnologische Eigenschaften, wie zum Beispiel Wasserzementwert, die dem Planer oft nicht bekannt ist. Model Code 2010 und Eurocode 2 -EN 1992-1-1- berücksichtigen aber nur solche Parameter die normalerweise dem Planer bekannt sind.

Die betrachteten Modelle beschreiben das Kriechen und Schwinden gut, aber die Berücksichtigung der Temperatur und der relativen Luftfeuchtigkeit mit Tagesmittelwerten sollte keine Abnahme in den Kriechverzerrungen -unter konstanter Spannung- oder in den Schwindverzerrungen nach den Berechnungen resultieren.

Es ist also eine Herausforderung der Wissenschaft die Berücksichtigung der Temperatur und der relativen Luftfeuchtigkeit mit Tagesmittelwerten bei Schwinden und Kriechen des Betons (z. B. zur Beschreibung der Langzeitformänderungen) verlässlich beschreiben zu können. Das Durchführen und Analysieren von mehreren, wie in dieser Diplomarbeit betrachteten quasi-laboratorischen Experimenten könnten viel dazu beitragen, um diese offenen Fragen zu beantworten.

7. Literaturverzeichnis

- [1] Bergmeister, K. ; Fingerloos, F.; Wörner, J. D.: Beton Kalender, Beton im Hochbau Silos und Behälter (2016); ISBN: 978-3-433-03074-5; ISSN: 0170-4958
- [2] Eurocode 0: DIN EN 1990: 2010-12- Grundlagen der Tragwerksplanung; ICS 91.010.30
- [3] Zhutovsky, S.: Revised view on chemical shrinkage; conference paper- 2008, october; www.researchgate.net
- [4] <https://www.mts.ch/produkte-messtechnik-schaffhausen-gmbh/kraftsensoren/kraftsensoren.html/60>
- [5] International Federation for Structural Concrete (fib): fib Model Code for Concrete Structures 2010; ISBN: 978-3-433-03061-5
- [6] Eurocode 2: DIN EN 1992-1-1: 2011-01- Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton und Spannbetontragwerken- Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau; ICS 91.010.30; 91.080.40
- [7] <https://www.wien.gv.at/statistik/lebensraum/tabellen/heitertrueb.html>
- [8] TU Wien/ 202.068 Baustatik / WS 2016-2017/
[VO_06_Effektive_Stabverkuerzung_zufolge_Durchbiegung.pdf](#)
- [9] Anders, I.: Stoffgesetz zur Beschreibung des Kriech- und Relaxationsverhaltens junger normal- und hochfester Betone;
ISBN: 978-3- 7315-0043-8; ISSN: 1869- 912X
- [10] Gutsch, A. W. : Stoffeigenschaften jungen Betons- Versuche und Modelle;
ISBN: 3-89288-119-7; ISSN: 0178-5796
- [11] Bunte, D.: Zum karbonatisierungsbedingten Verlust der Dauerhaftigkeit von Aussenbauteilen aus Stahlbeton, Dissertation, Technische Universität Braunschweig, 1994
- [12] <https://www.betontechnische-daten.de/de/9-6-1-schwinden-und-quellen>
- [13] Keitel, H. : Bewertungsmethoden für die Prognosequalität von Kriechmodellen des Betons; ISBN: 978-3-86068-466-5
- [14] Zilch, K.; Zehetmaier, G.: Bemessung im konstruktiven Betonbau Nach DIN 1045-1 und DIN EN 1992-1-1; ISBN-10 3-540-20650-7; ISBN-13 978-3-540-20650-7
- [15] Nechvatal, D. ; Stöckl, P. ; Kupfer, H.: Kriechen, Rückkriechen und Dauerstandfestigkeit von Beton bei unterschiedlichem Feuchtegehalt und Verwendung von Portlandzement bzw. Portlandkalksteinzement. In: Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Heft 442. Beuth-Verlag, Berlin, 1994 10
- [16] Šmerda, Z. ; Kristek, V.: Creep and Shrinkage of Concrete Elements and Structures. Elsevier, 1988 13
- [17] Bergmeister, K. ; Fingerloos, F.; Wörner, J. D.: Beton Kalender, Lebensdauer und Instandsetzung, Brandschutz (2013); ISBN: 978-3-433-03000-4; ISSN: 0170-4958

-
- [18] Hegger, J: Massivbau II Skriptum- Bauelemente; RWTH Aachen; 2015
- [19] Kollegger, J: Skriptum zur Vorlesung Betonbau 2 nach EC 1992-1-1; Technische Universität Wien; 2017
- [20] <https://www.austrian-standards.at/infopedia-themencenter/infopedia-artikel/eurocodes/>
- [21] Bazant, Z. P.; Baweja, S.: Creep and Shrinkage Prediction Model for Analysis and Design of Concrete Structures: Model B3
- [22] Wedner, R; Hubler, M. H.; Bazant, Z. P.: The B4 model for multi decade creep and shrinkage prediction; <https://www.researchgate.net/publication/268455820>
- [23] Bergmeister, K. ; Fingerloos, F.; Wörner, J. D.: Beton Kalender Spannbeton, Spezialbeton (2017); ISBN: 978-3-433-03123-0; ISSN: 0170-4958
- [24] Farkas, Gy; Huszár, Zs; Kovács, T; Szalai, K: Betonszerkezetek mértékezése az Eurocode alapján- közúti hidak, épületek; ISBN: 978 963 9535 46 6
- [25] Rombach, G: Spannbetonbau; ISBN: 978-3-433-02911-4
- [26] Haist, M.; Müller, H. S.: Thermische Verformung von Beton. In: Betonverformungen beherrschen- Grundlagen für schadensfreie Bauwerke. 11. Symposium Baustoffe und Bauwerkserhaltung. Müller, H. S., Nolting, U., Haist, M., Kromer, M. (Hrsg.), Karlsruher Institut für Technologie (KIT). Verlag KIT Scientific Publishing, 2015, S. 1-14.
- [27] Suza, D; Kollegger, J; Müller, H; Breiner, R: Comparison of creep and shrinkage of large concrete specimens with theoretical models
- [28] Bazant, Z. P.; Jirásek, M.: Creep and hygrothermal effects in concrete structures; ISBN: 978-94-024-1136-2; ISSN: 0925-0042
- [29] <https://www.spektrum.de/lexikon/physik/allgemeine-gaskonstante/382>
- [30] <http://www.chemie.de/lexikon/Arrhenius-Gleichung.html>

8. Anhang

8.1. Anhang A: Aufbau des Experiments



Foto 1: Schalung des Körpers 2, Kriechversuch, Serie S4



Foto 2: Schwingsaitensensor, Abstandhalter und Hüllrohr, Serie S4



Foto 3: Betonierung



Foto 4: Betonierung



Foto 5: Vibration der Testkörper



Foto 6: Ausschalung der Körper 1, Kriechversuch, Serie S4



Foto 7: fertige Betonkörper nach der Ausschalung



Foto 8: Nachspannen der Betonkörper

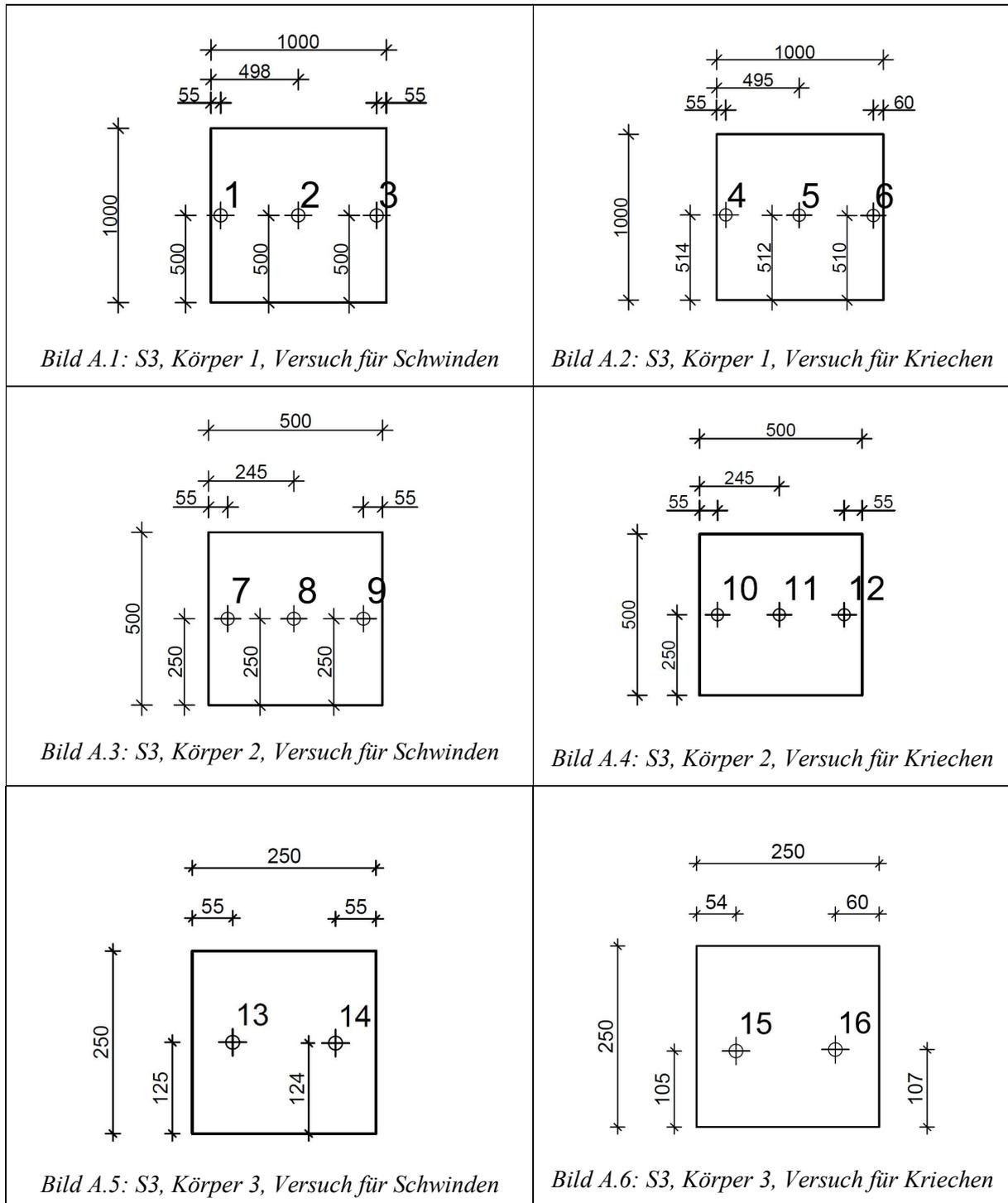
In Anhang:

Körper 1 ist der Körper mit 1000x1000 [mm] Querschnitt

Körper 2 ist der Körper mit 500x500 [mm] Querschnitt

Körper 3 ist der Körper mit 250x250 [mm] Querschnitt

Bild A.1- A.12: Die Nummer und Anordnung der Schwingsaitensensoren



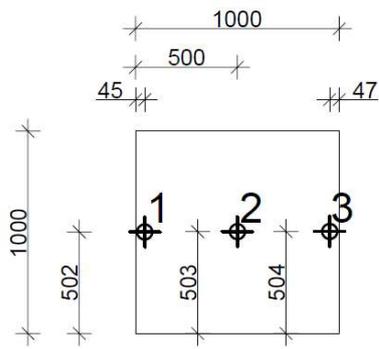


Bild A.7: S4, Körper 1, Versuch für Schwinden

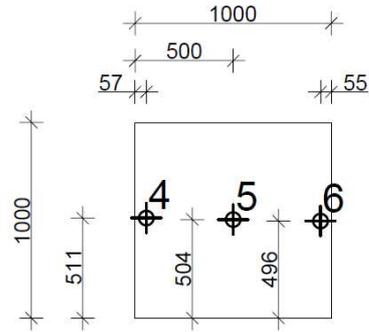


Bild A.8: S4, Körper 1, Versuch für Kriechen

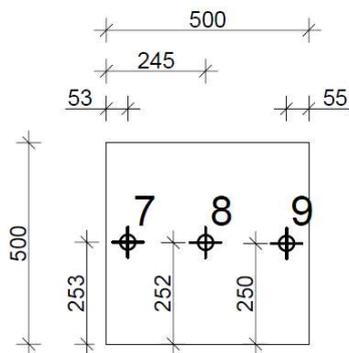


Bild A.9: S4, Körper 2, Versuch für Schwinden

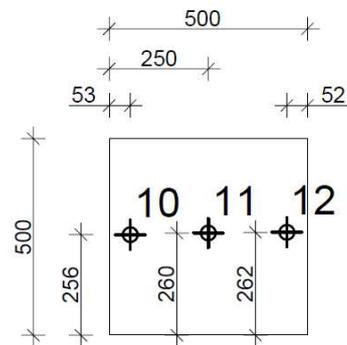


Bild A.10: S3, Körper 2, Versuch für Kriechen

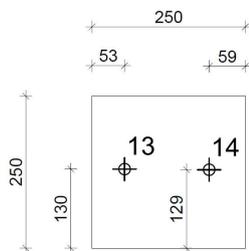


Bild A.11: S4, Körper 3, Versuch für Schwinden

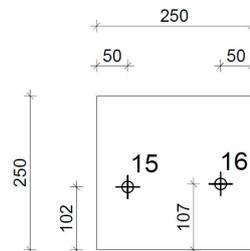


Bild A.12: S3, Körper 3, Versuch für Kriechen

8.2. Anhang B: Messergebnisse

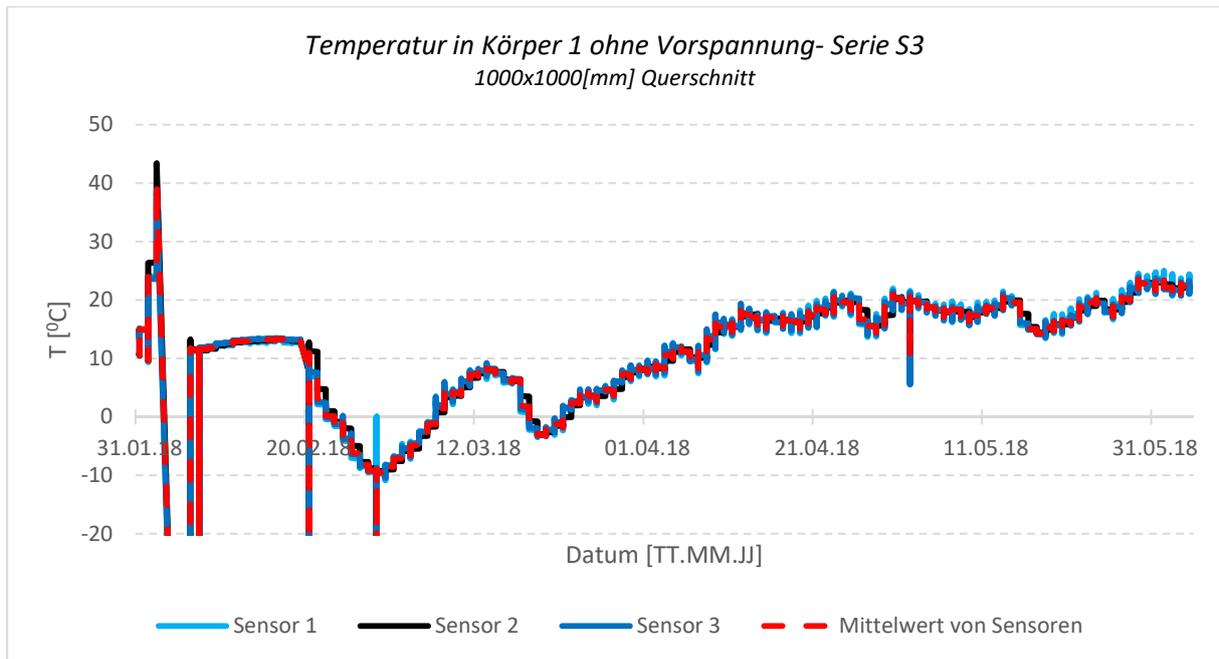


Bild B.1: Messwerte der Temperatur in Körper 1 ohne Vorspannung; Serie S3

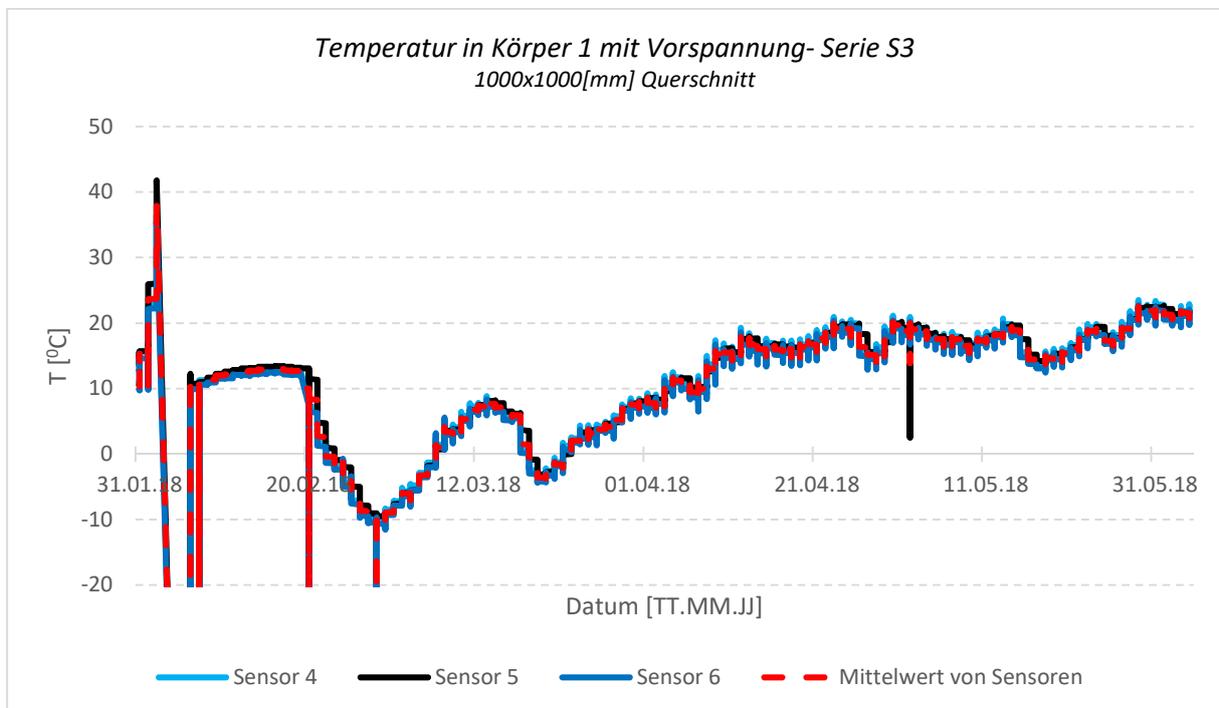


Bild B.2: Messwerte der Temperatur in Körper 1 mit Vorspannung; Serie S3

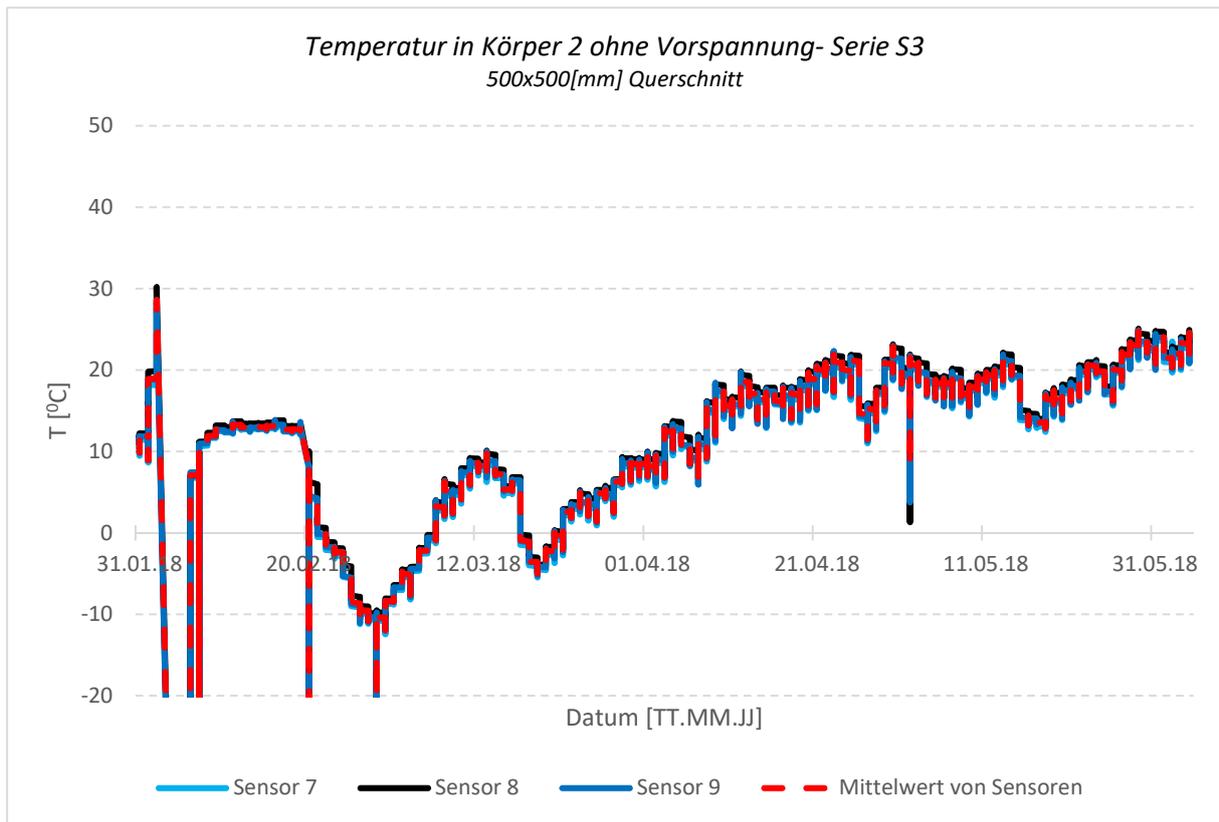


Bild B.3: Messwerte der Temperatur in Körper 2 ohne Vorspannung; Serie S3

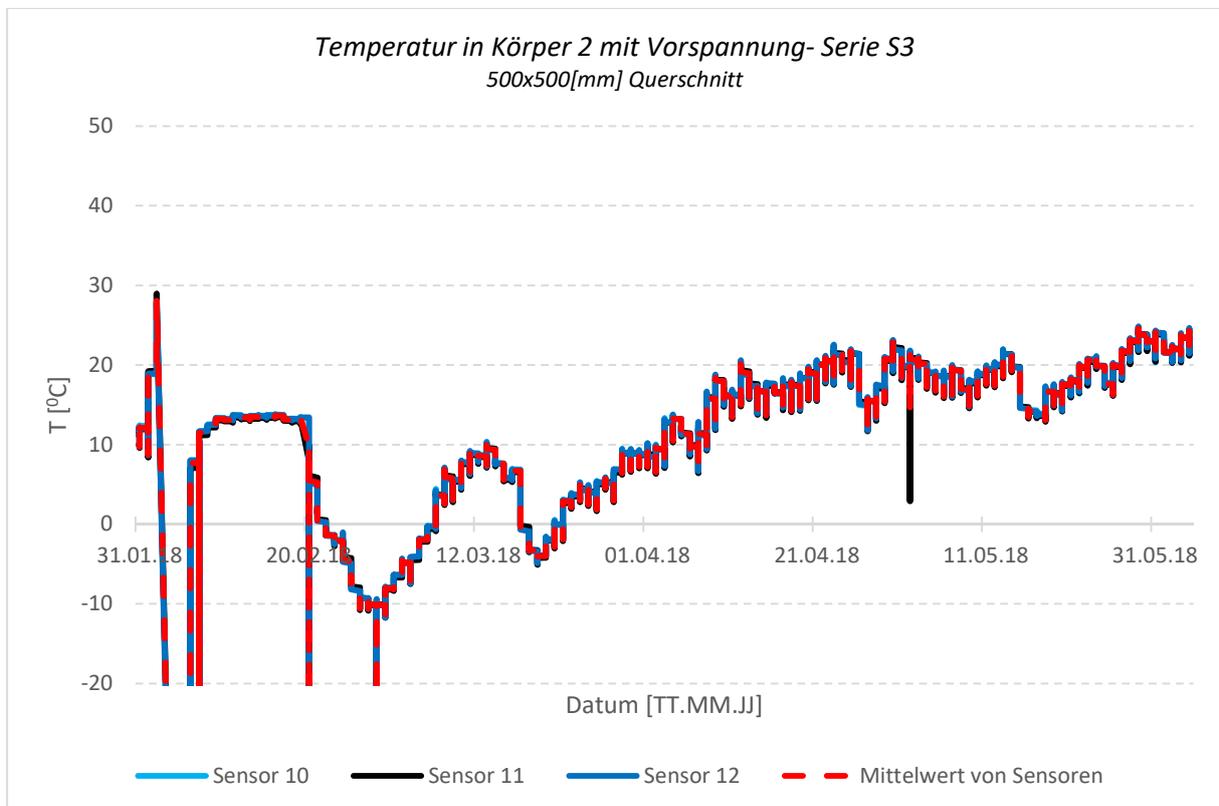


Bild B.4: Messwerte der Temperatur in Körper 2 mit Vorspannung; Serie S3

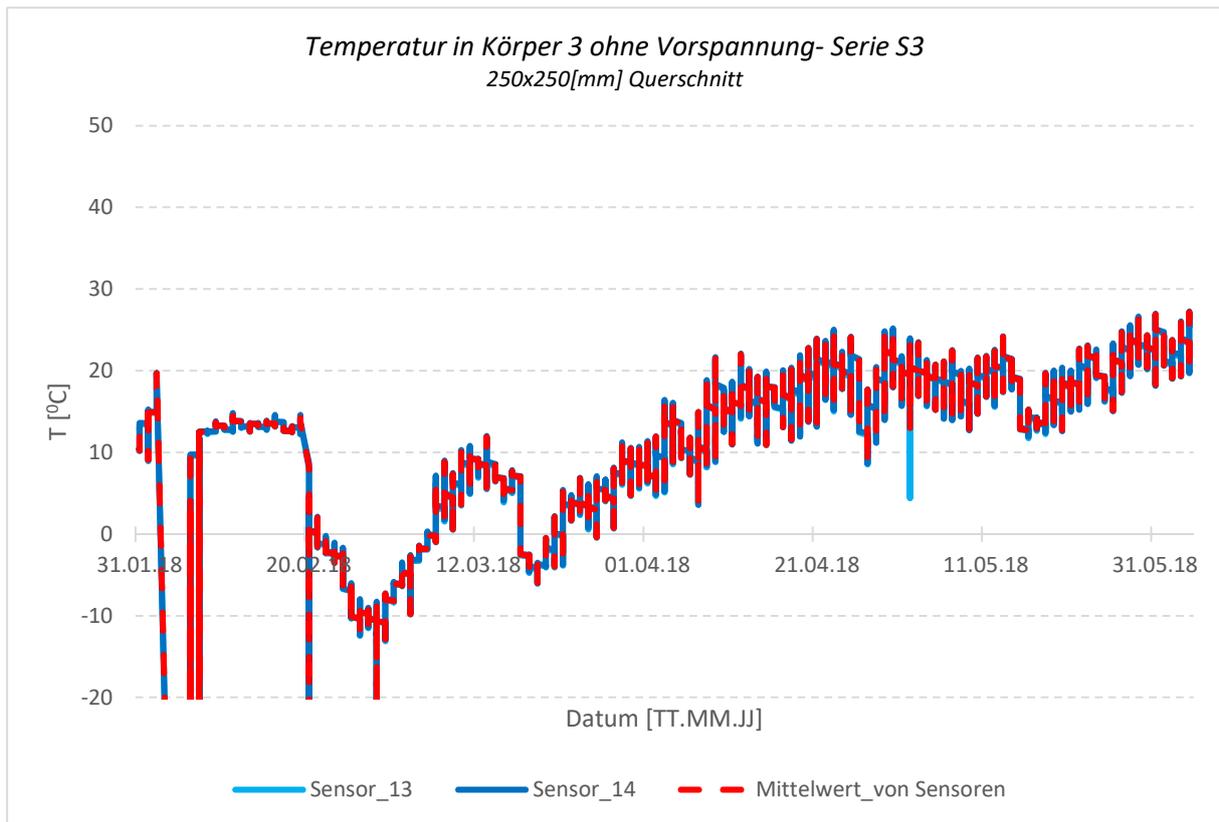


Bild B.5: Messwerte der Temperatur in Körper 3 ohne Vorspannung; Serie S3

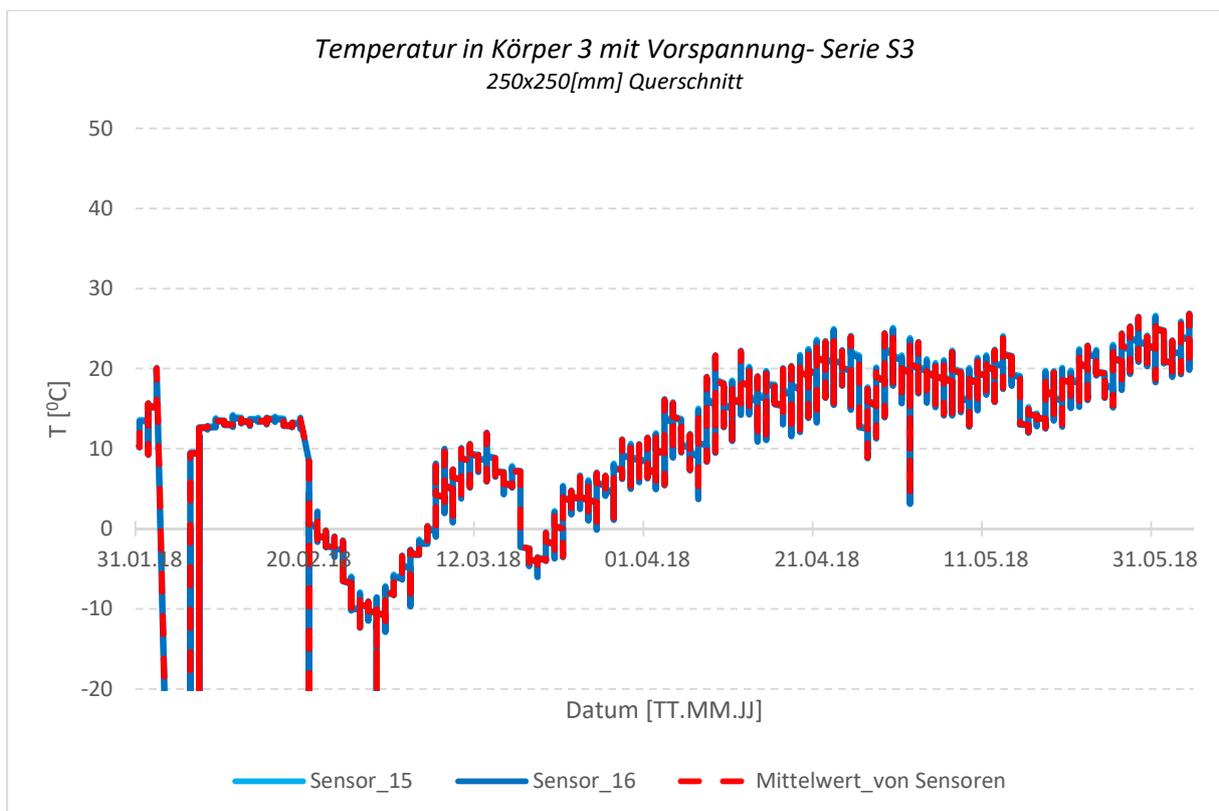


Bild B.6: Messwerte der Temperatur in Körper 3 mit Vorspannung; Serie S3

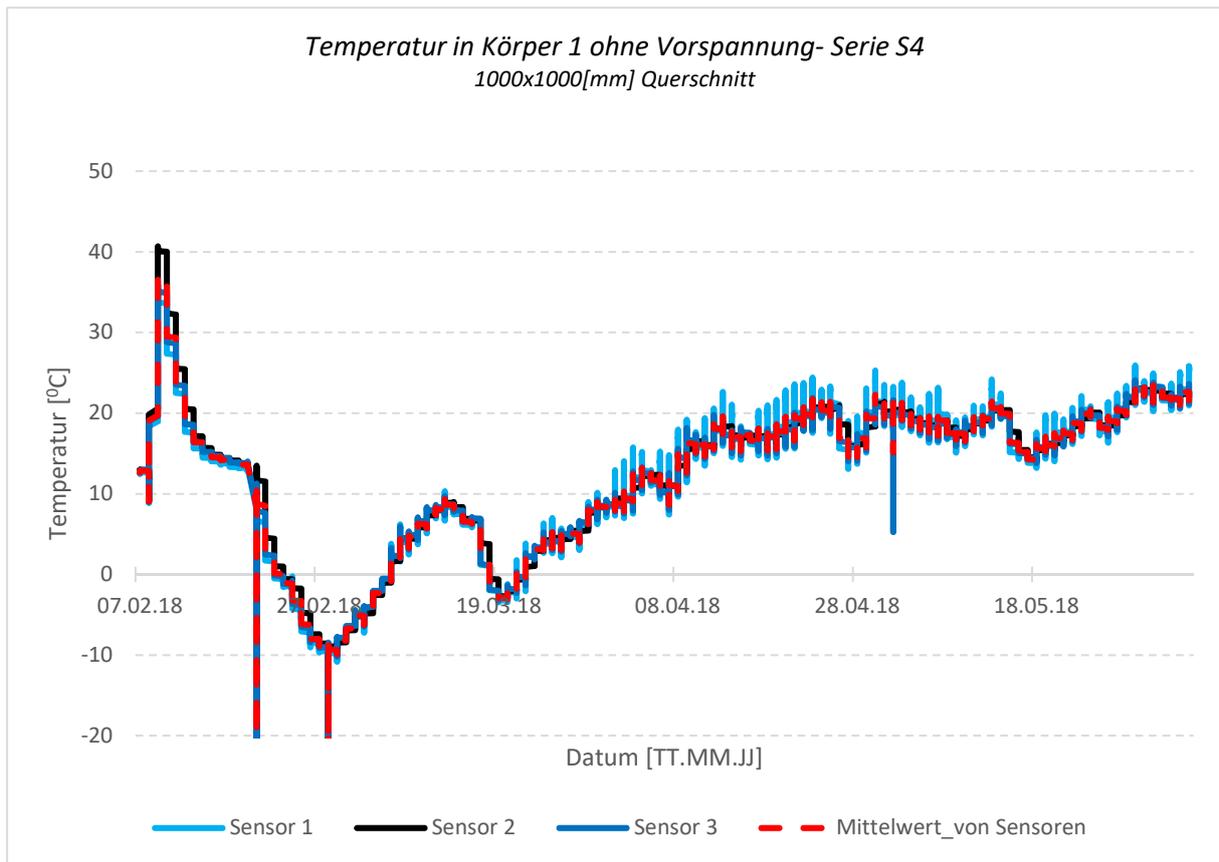


Bild B.7: Messwerte der Temperatur in Körper 1 ohne Vorspannung; Serie S4

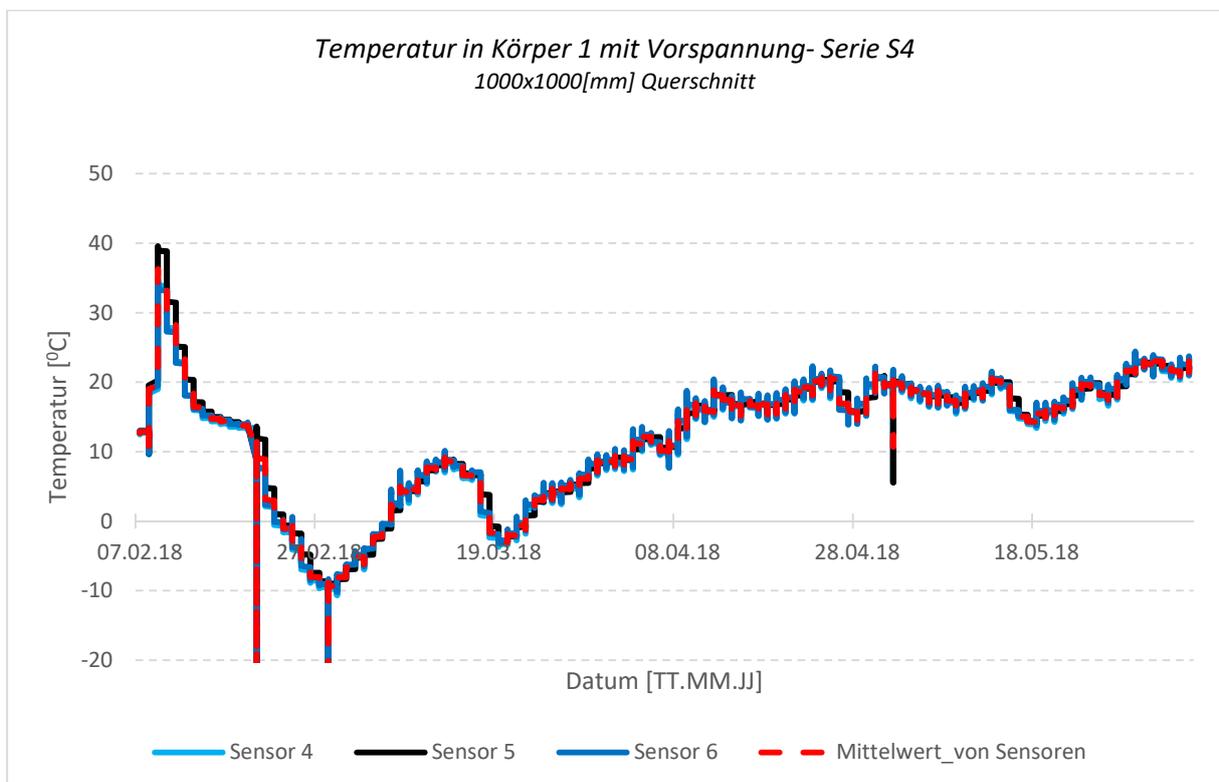


Bild B.8: Messwerte der Temperatur in Körper 1 mit Vorspannung; Serie S4

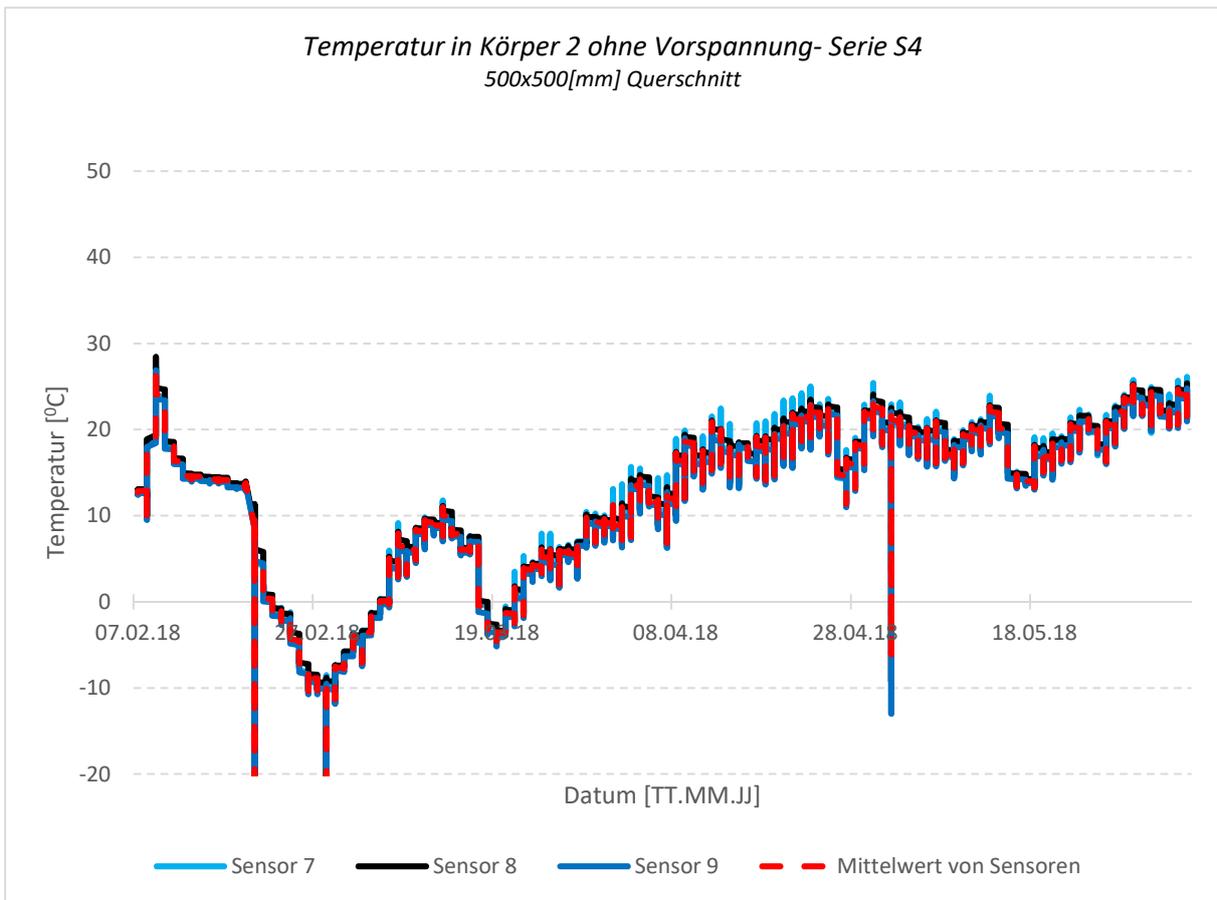


Bild B.9: Messwerte der Temperatur in Körper 2 ohne Vorspannung von Serie S4

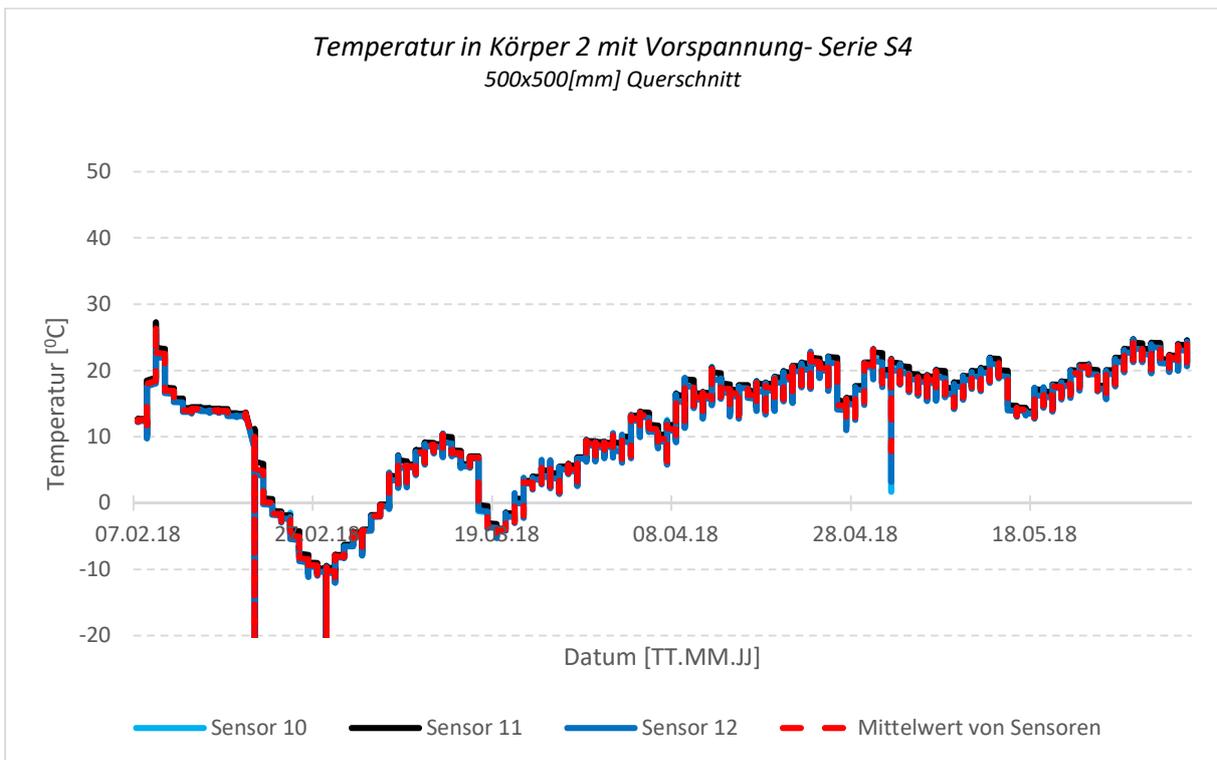


Bild B.10: Messwerte der Temperatur in Körper 2 mit Vorspannung von Serie S4

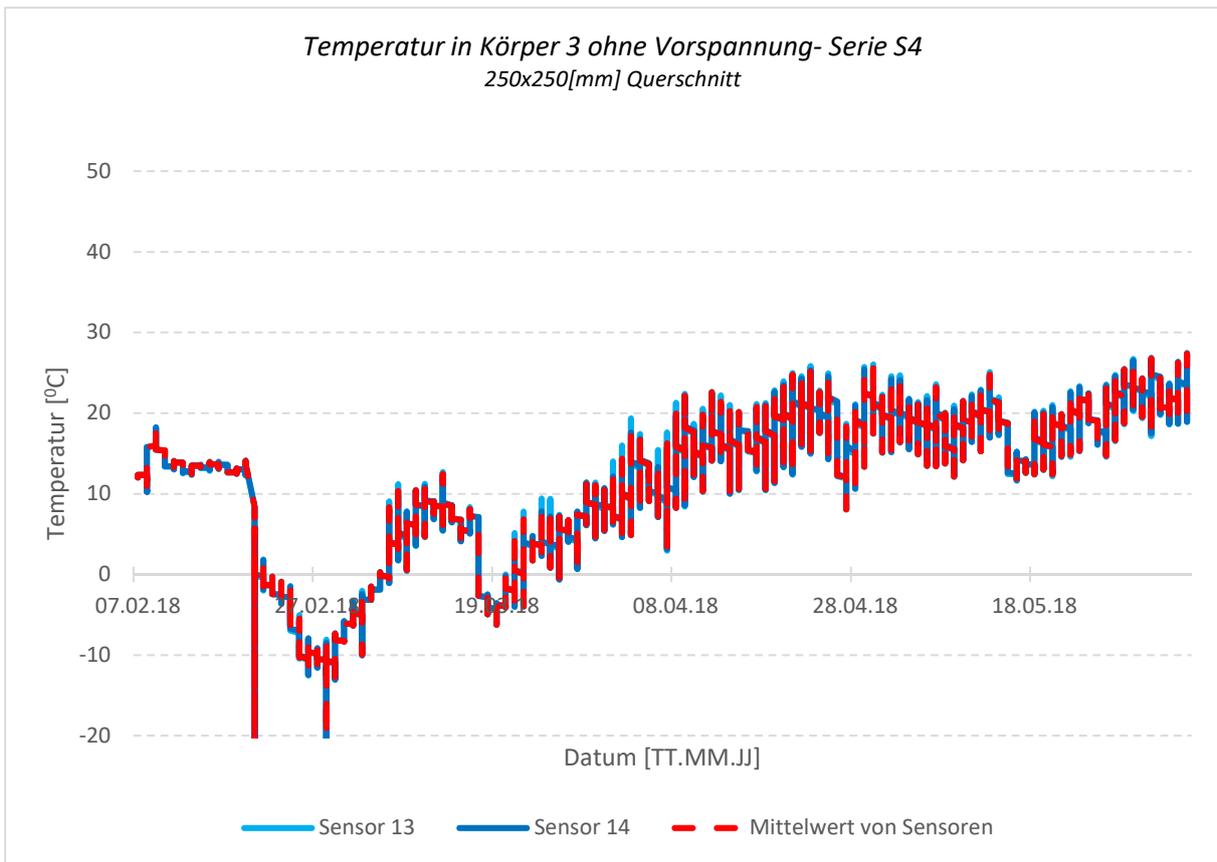


Bild B.11: Messwerte der Temperatur in Körper 3 ohne Vorspannung von Serie S4

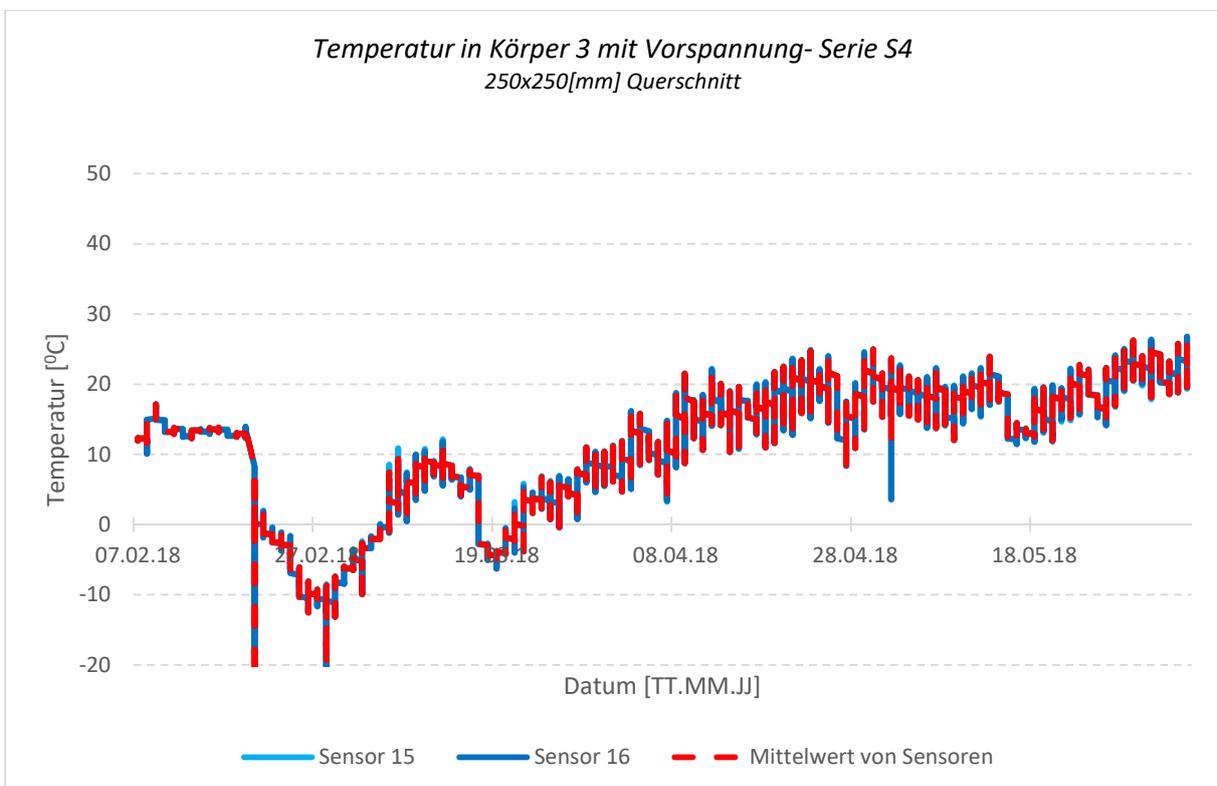


Bild B.12: Messwerte der Temperatur in Körper 3 mit Vorspannung von Serie S4

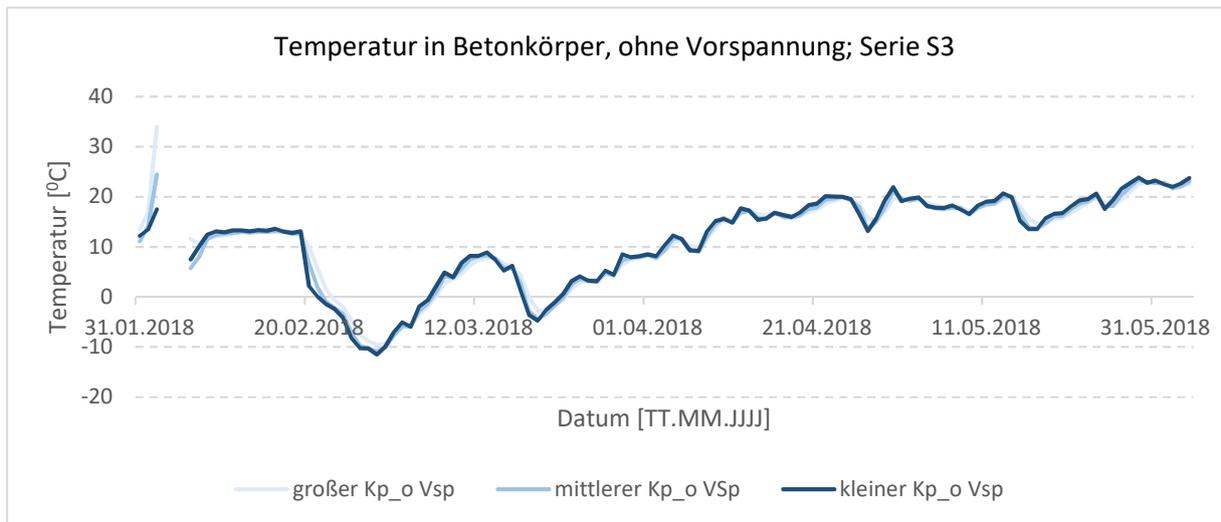


Bild B.13: Messwerte der Temperatur -Tagesmittelwerten- innerhalb der Betonkörper ohne Vorspannung; Serie S3

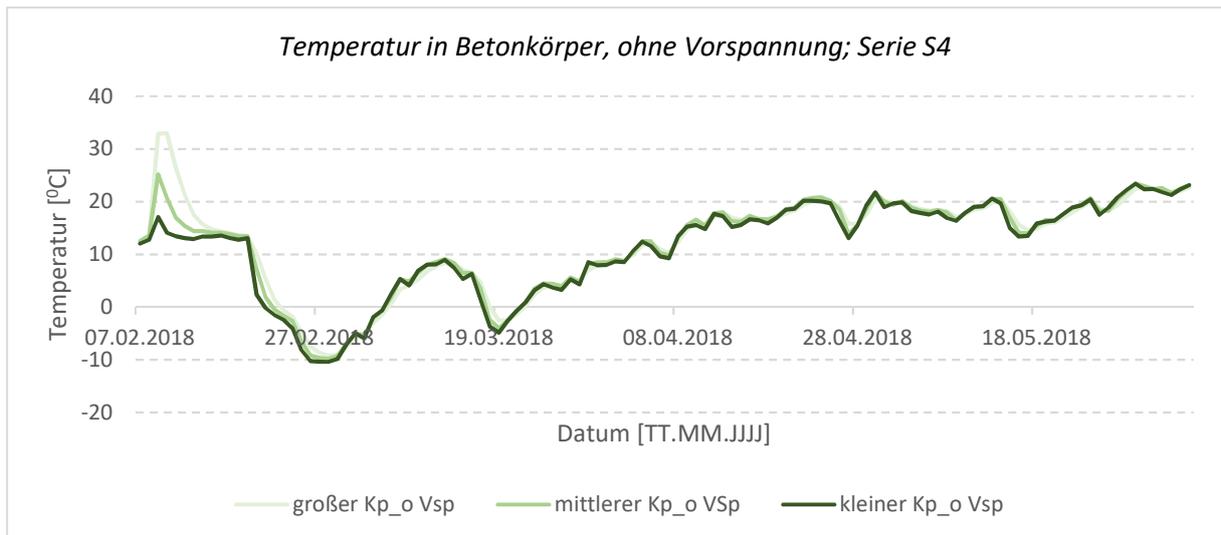


Bild B.14: Messwerte der Temperatur -Tagesmittelwerten- innerhalb der Betonkörper ohne Vorspannung; Serie S4

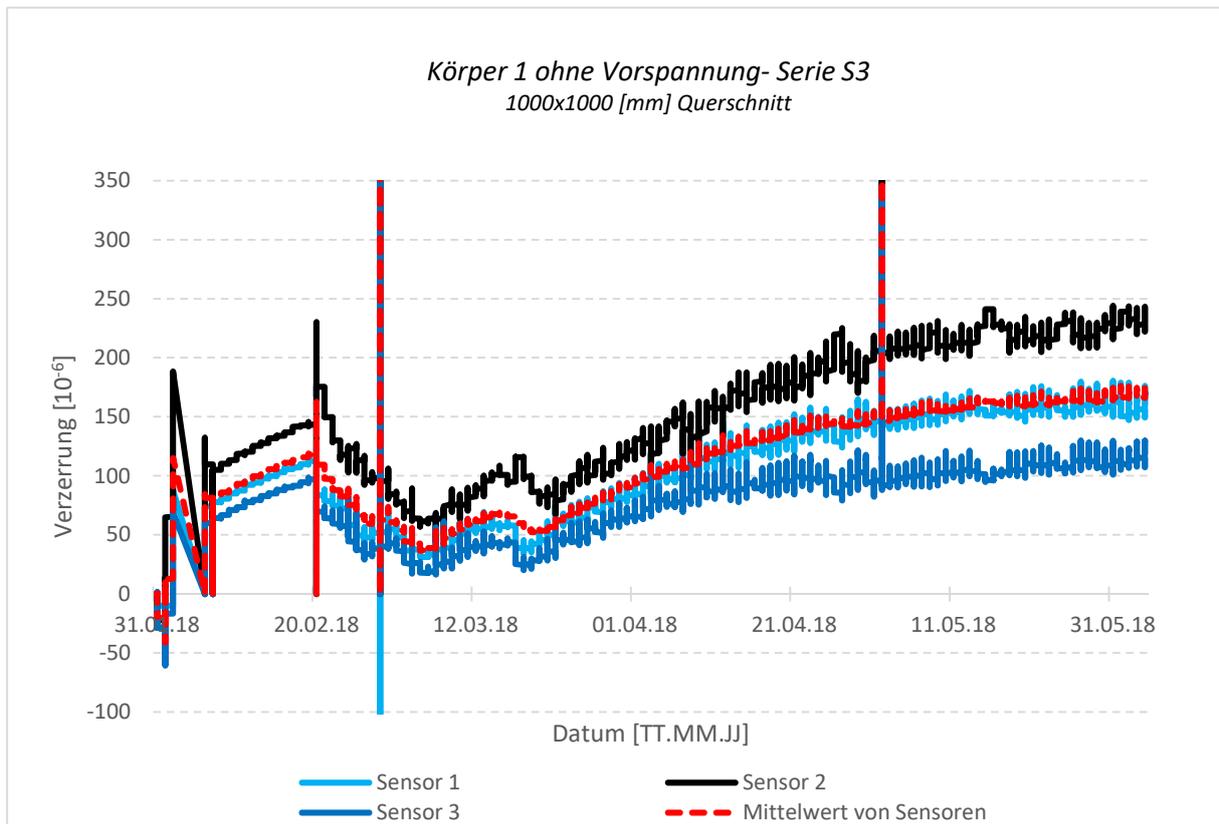


Bild B.15: Messwerte der Verzerrungen in Körper 1 ohne Vorspannung von Serie S3

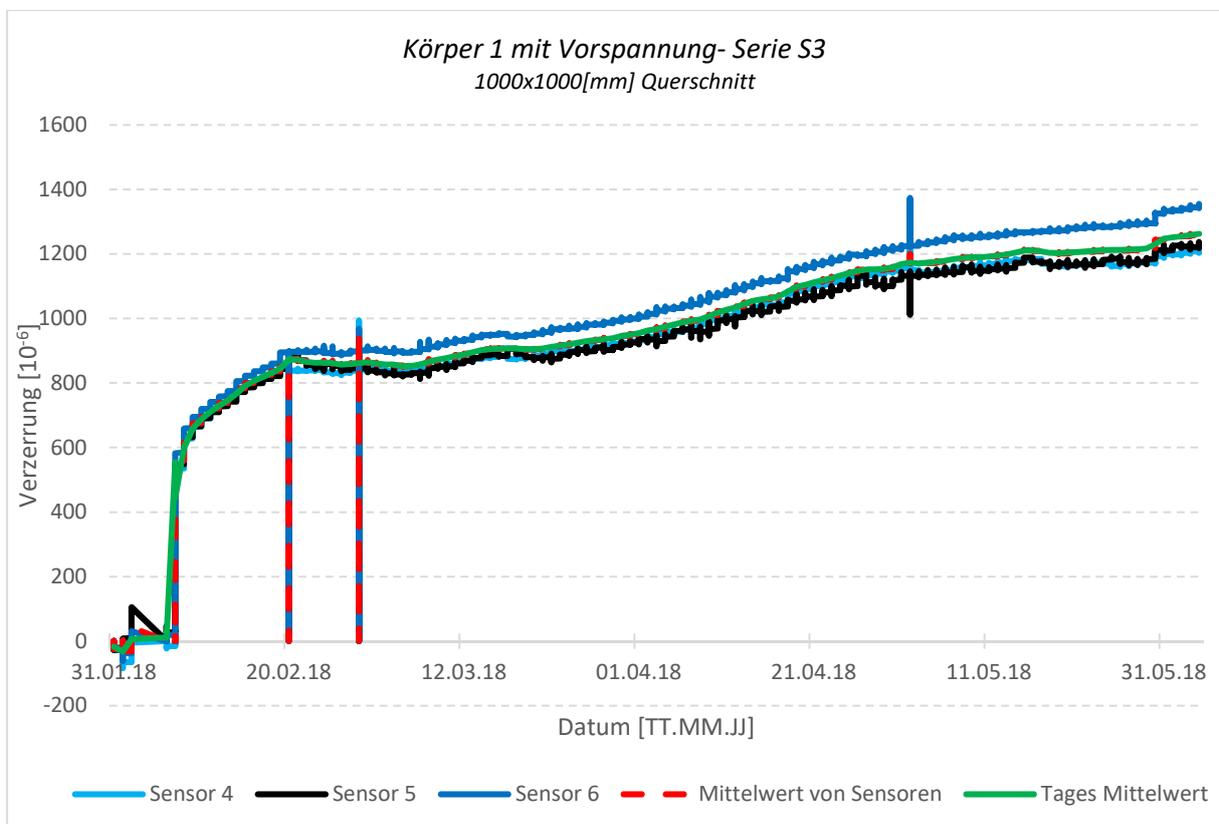


Bild B.16: Messwerte der Verzerrungen in Körper 1 mit Vorspannung von Serie S3

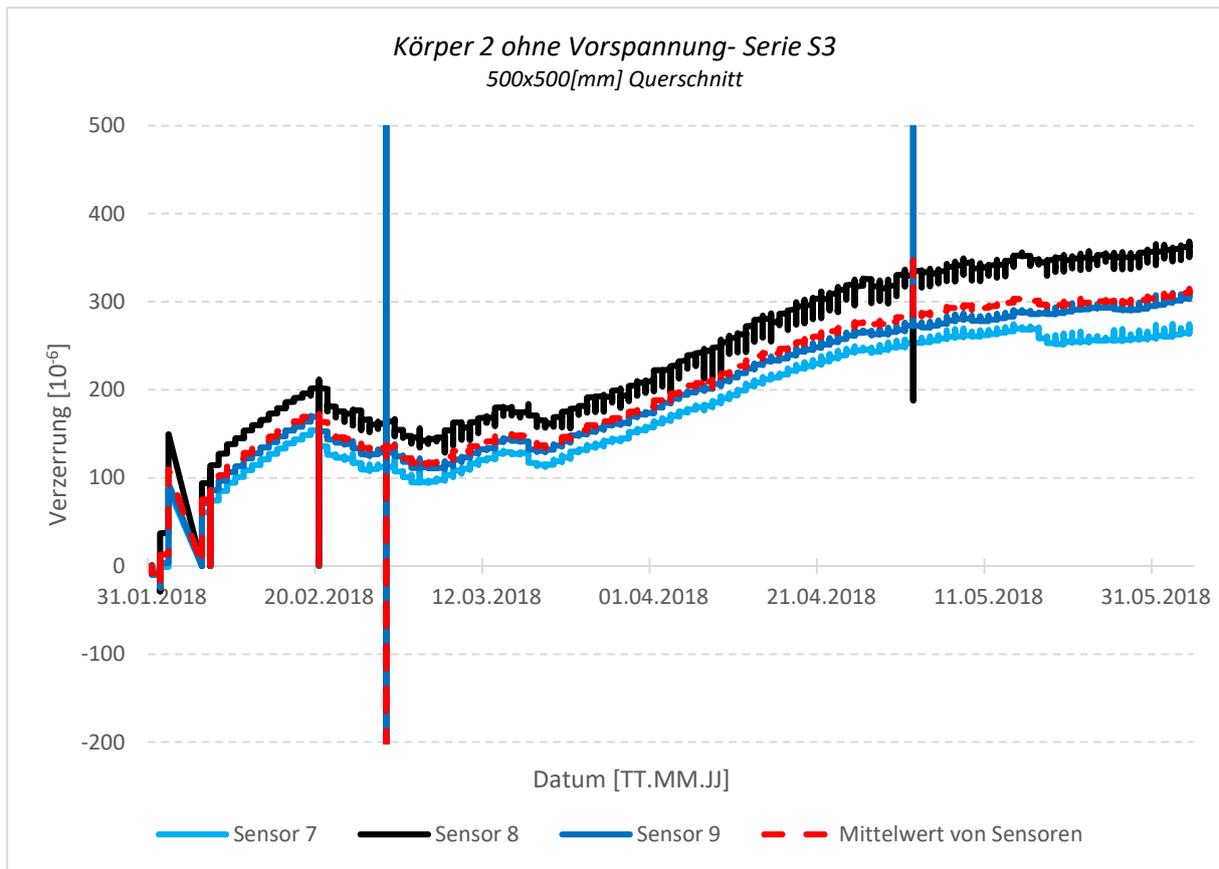


Bild B.17: Messwerte der Verzerrungen in Körper 2 ohne Vorspannung von Serie S3

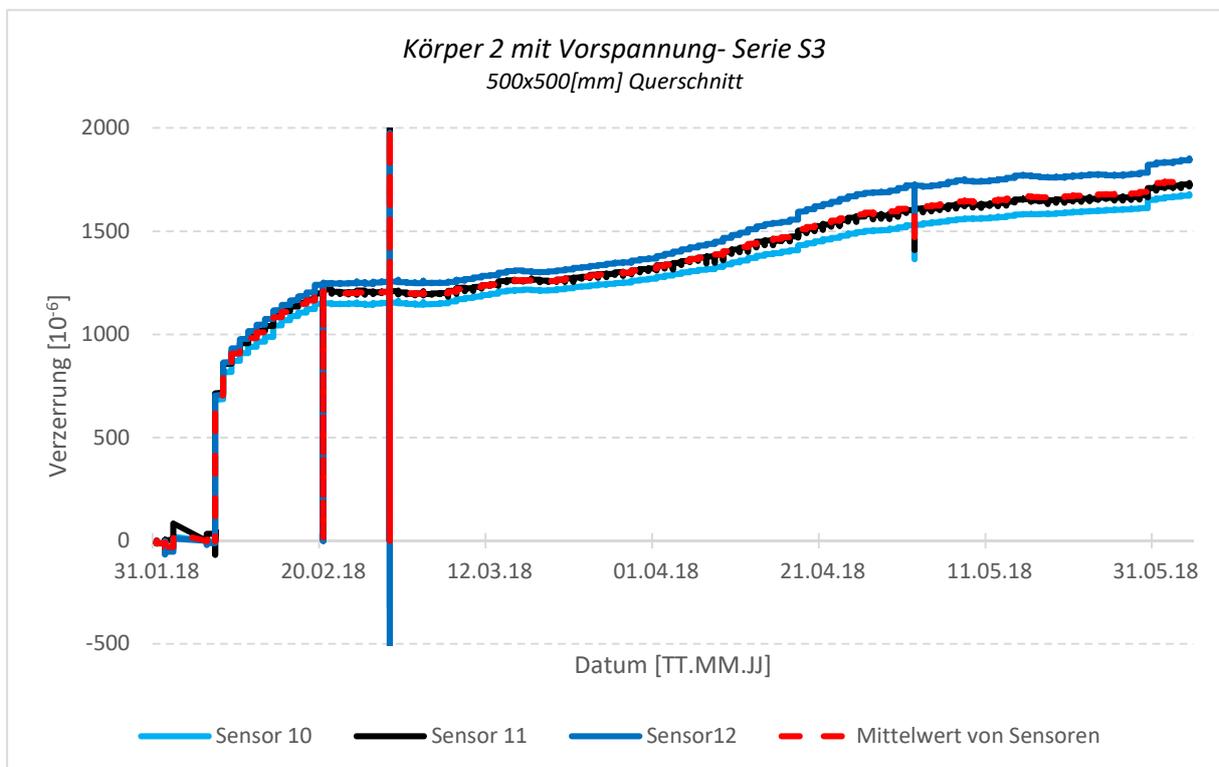


Bild B.18: Messwerte der Verzerrungen in Körper 2 mit Vorspannung von Serie S3

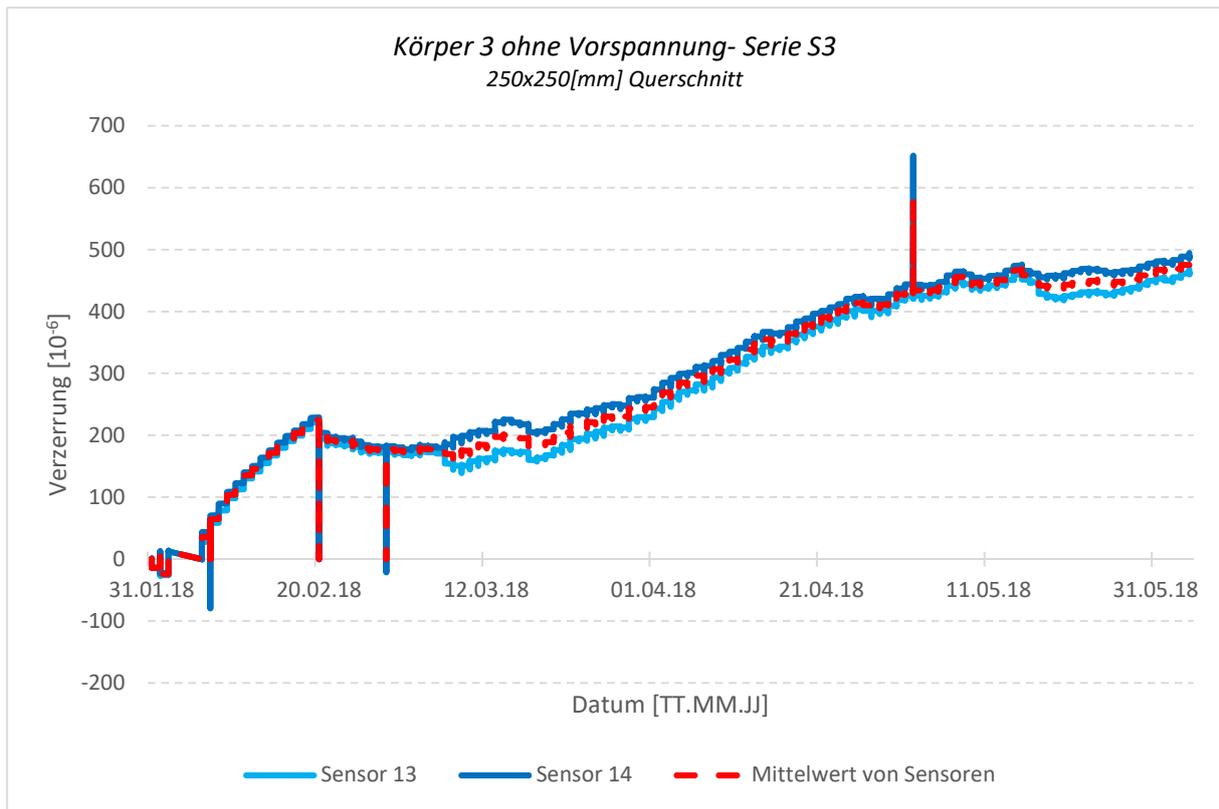


Bild B.19: Messwerte der Verzerrungen in Körper 3 ohne Vorspannung von Serie S3

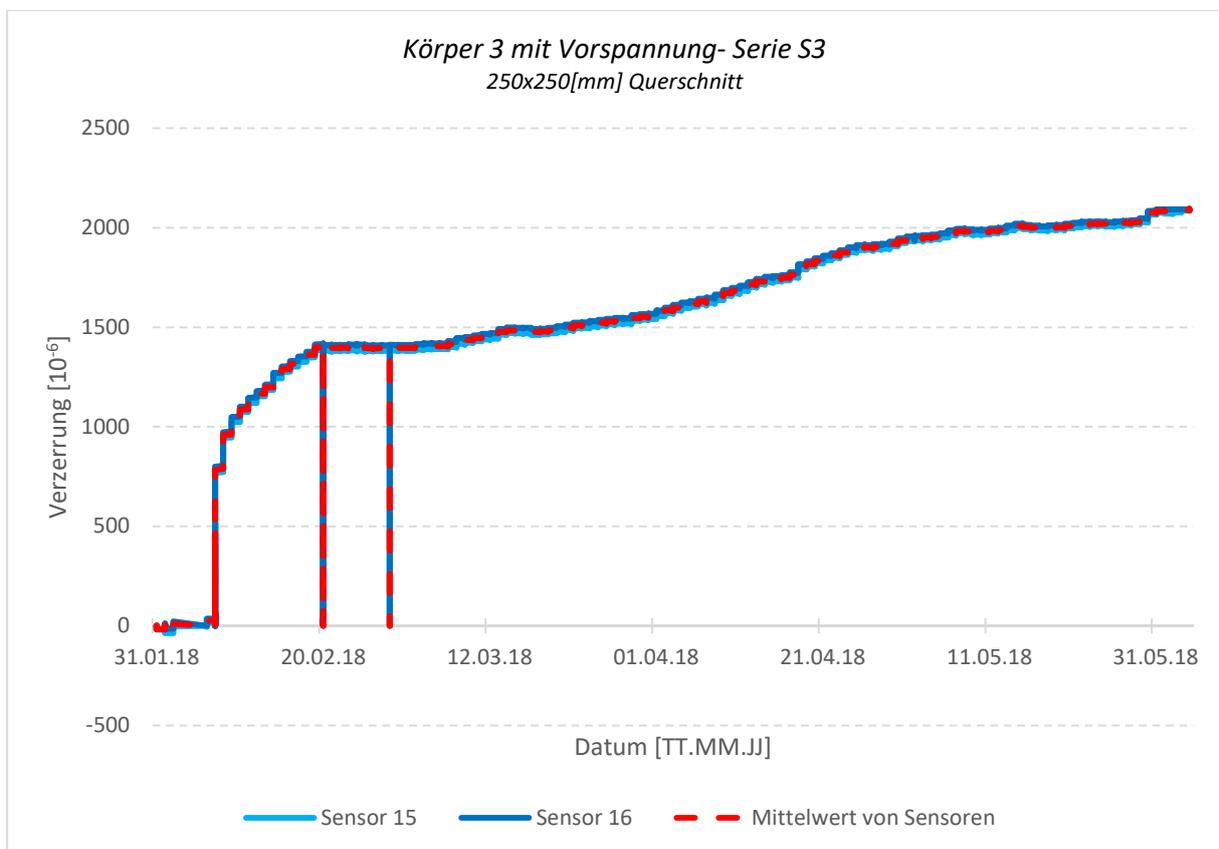


Bild B.20: Messwerte der Verzerrungen in Körper 3 mit Vorspannung von Serie S3

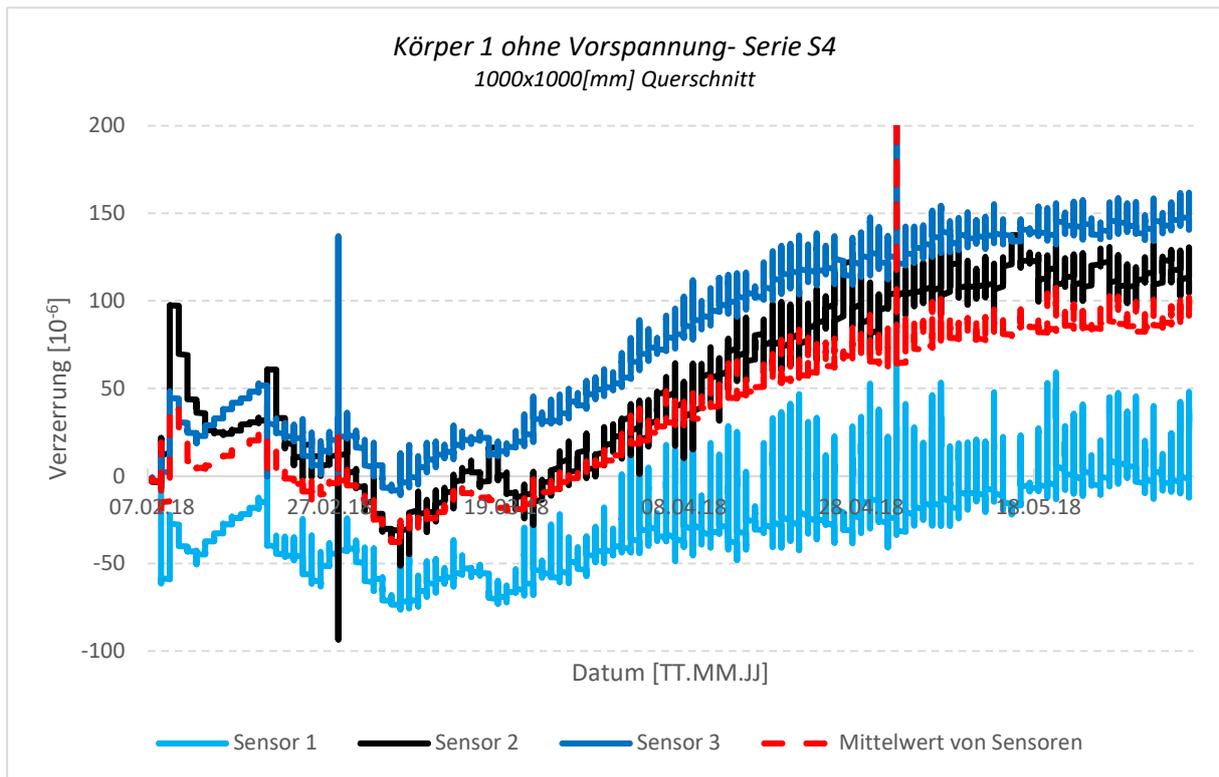


Bild B.21: Messwerte der Verzerrungen in Körper 1 ohne Vorspannung von Serie S4

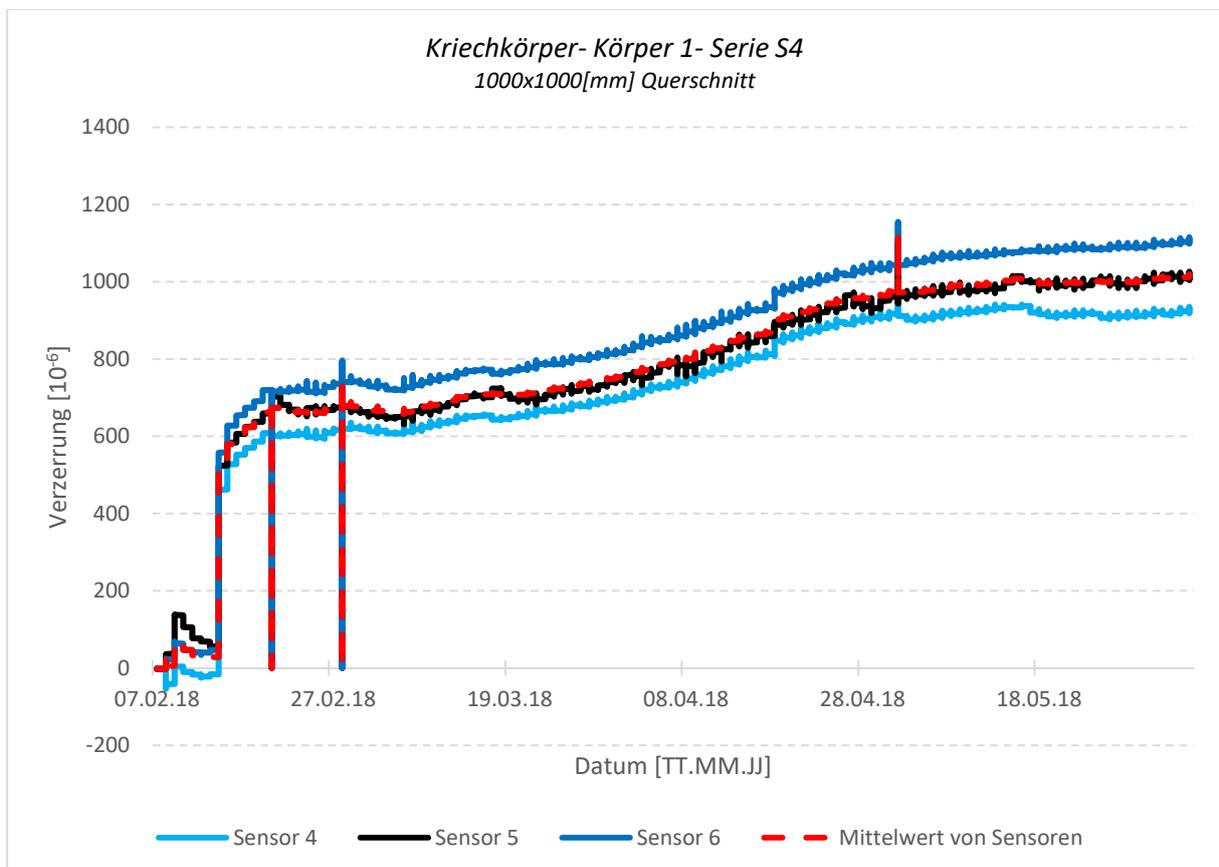


Bild B.22: Messwerte der Verzerrungen in Körper 1 mit Vorspannung von Serie S4

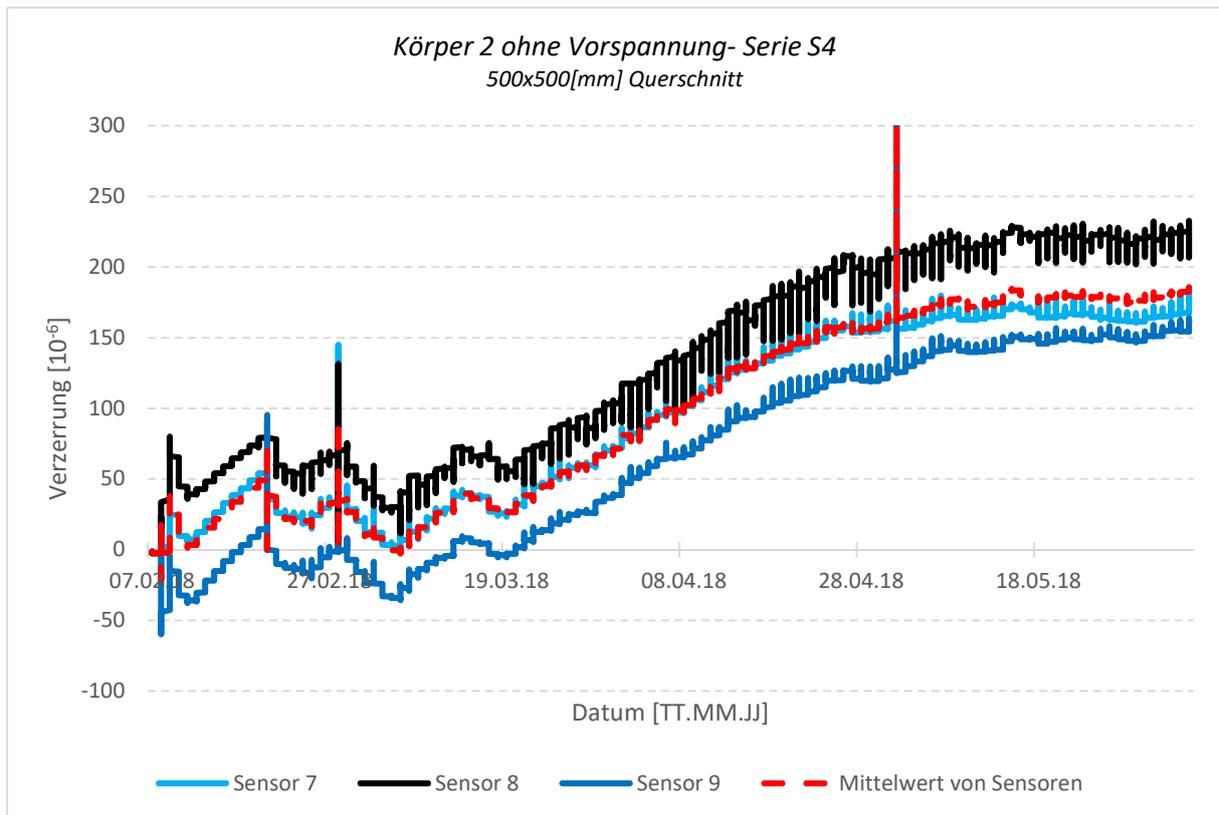


Bild B.23: Messwerte der Verzerrungen in Körper 2 ohne Vorspannung von Serie S4

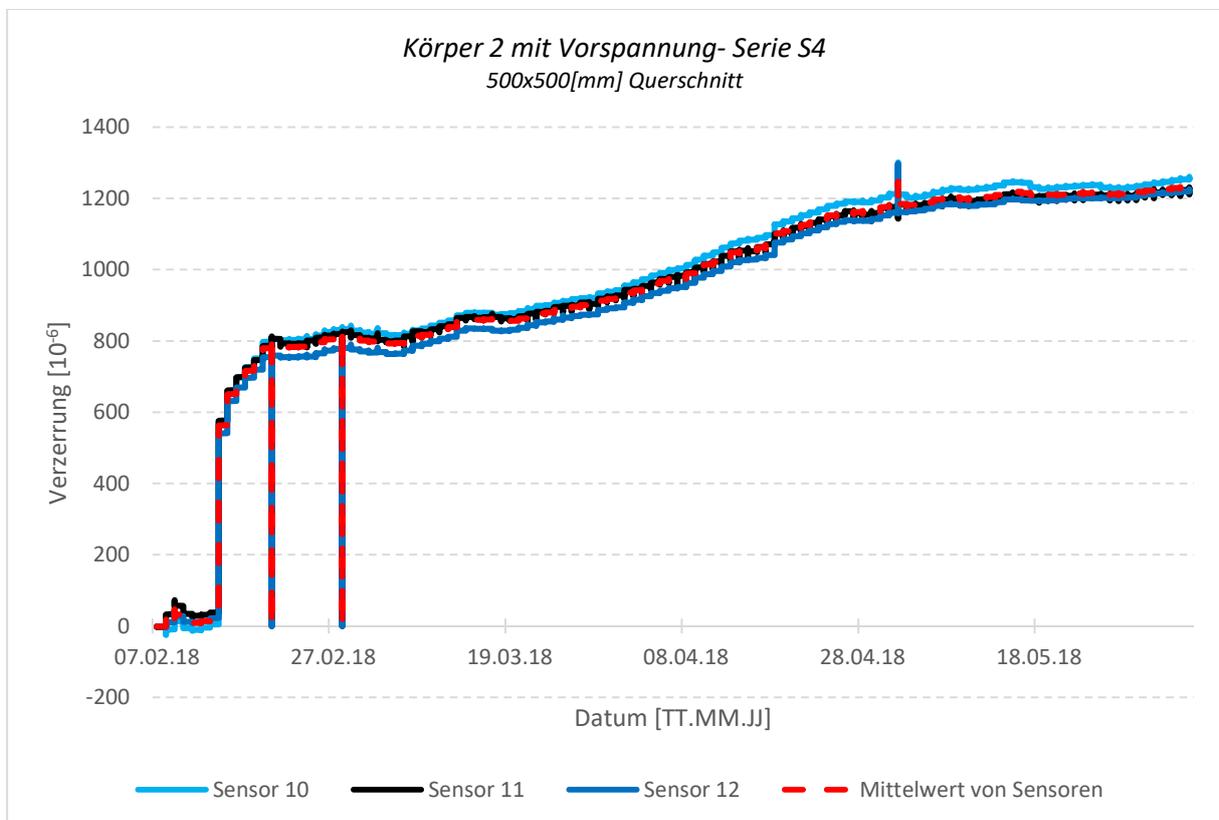


Bild B.24: Messwerte der Verzerrungen in Körper 2 mit Vorspannung von Serie S4

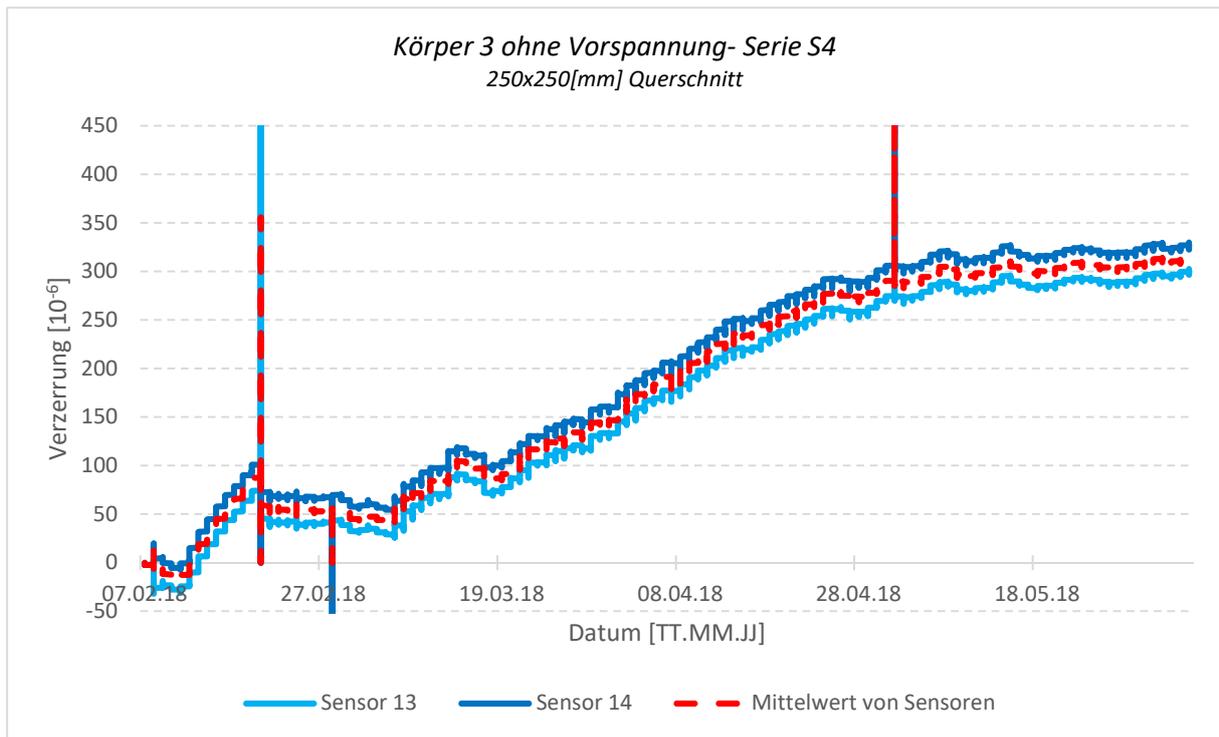


Bild B.25: Messwerte der Verzerrungen in Körper 3 ohne Vorspannung von Serie S4

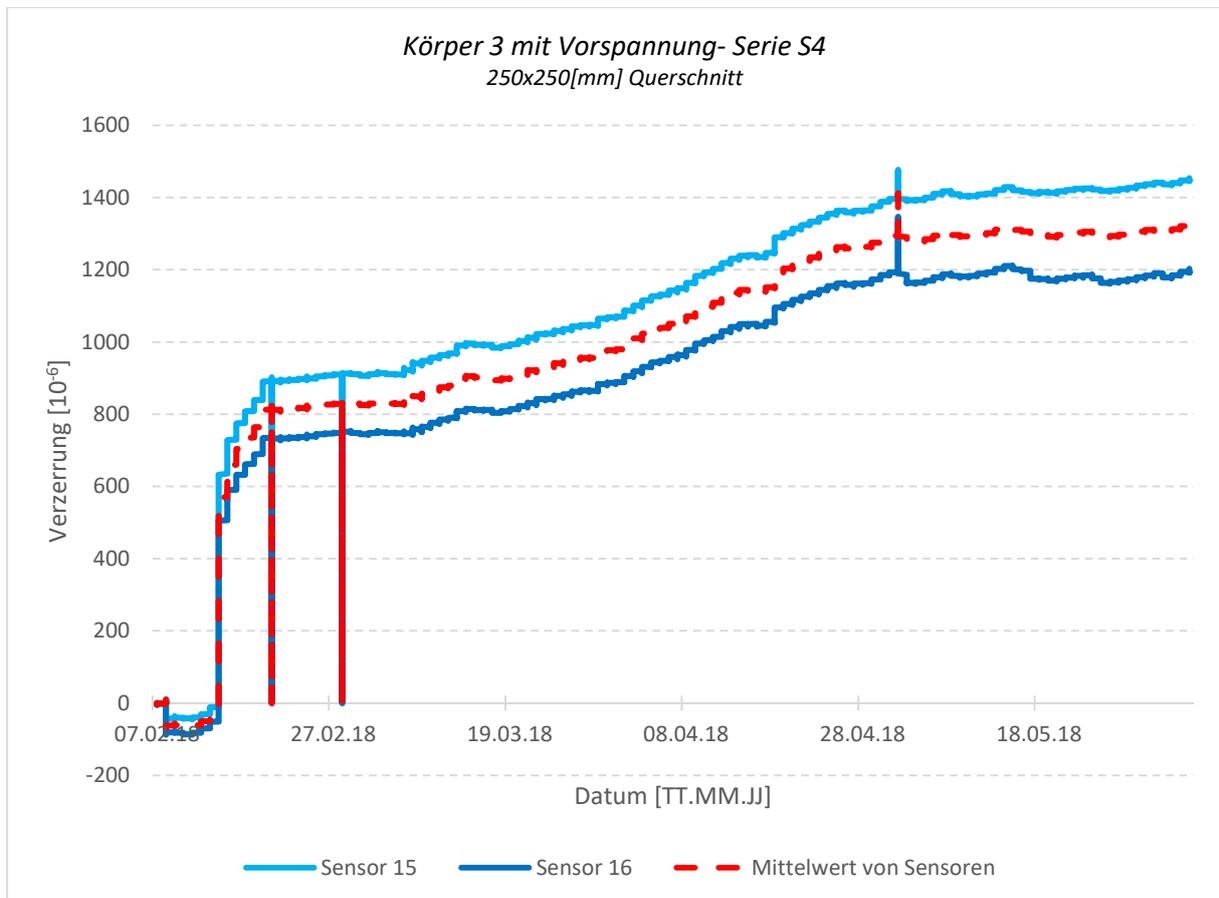


Bild B.26: Messwerte der Verzerrungen in Körper 3 mit Vorspannung von Serie S4

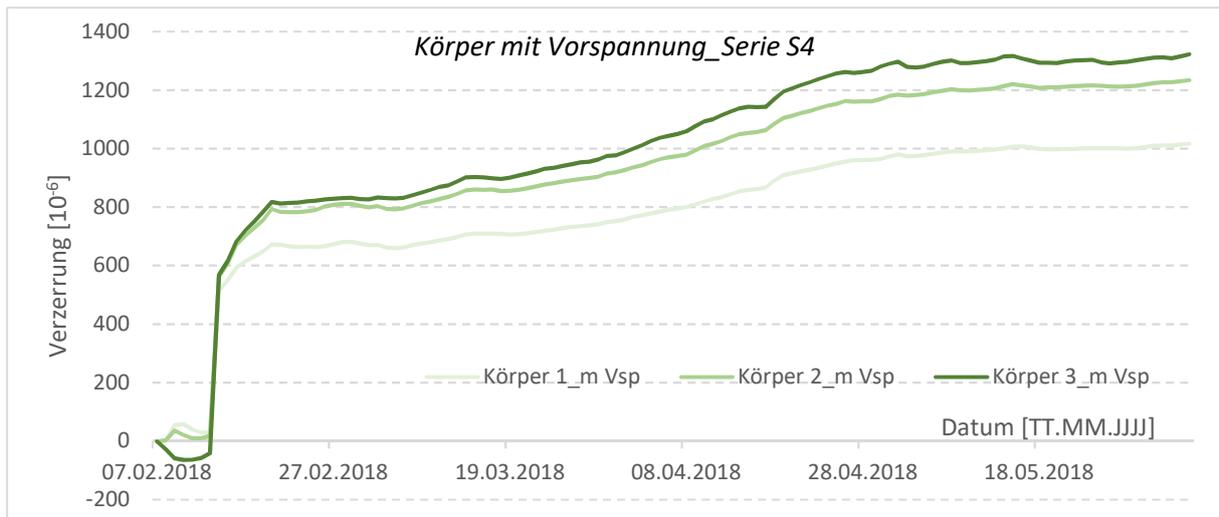


Bild B.27: Verzerrungen in Körper mit Vorspannung; Serie S4

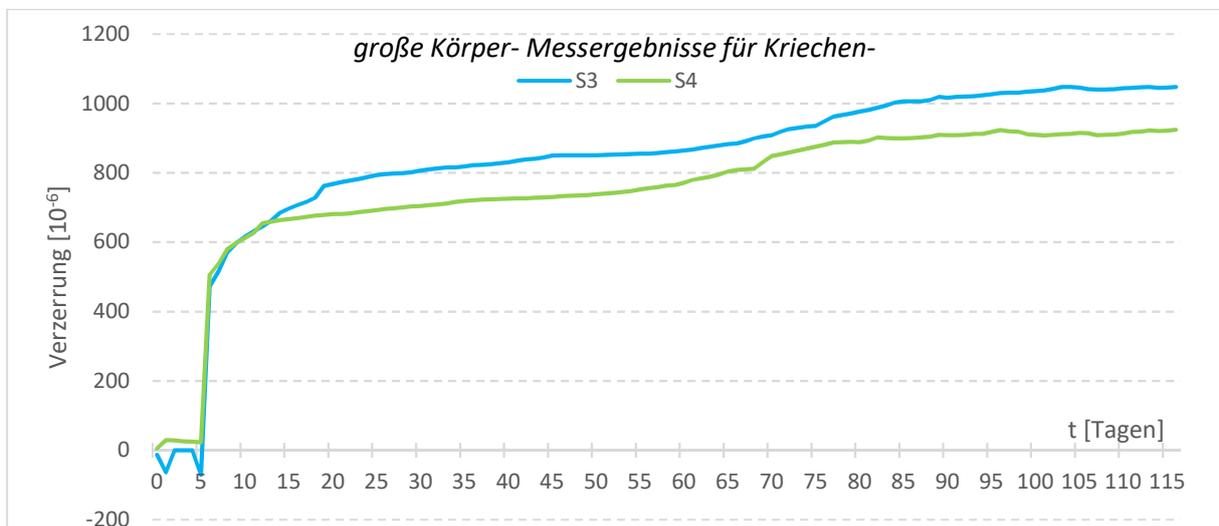


Bild B.29: Vergleich der Verzerrungen in großen Körper (mit 1000x1000 [mm] Querschnitt) von Serie S3 und S4

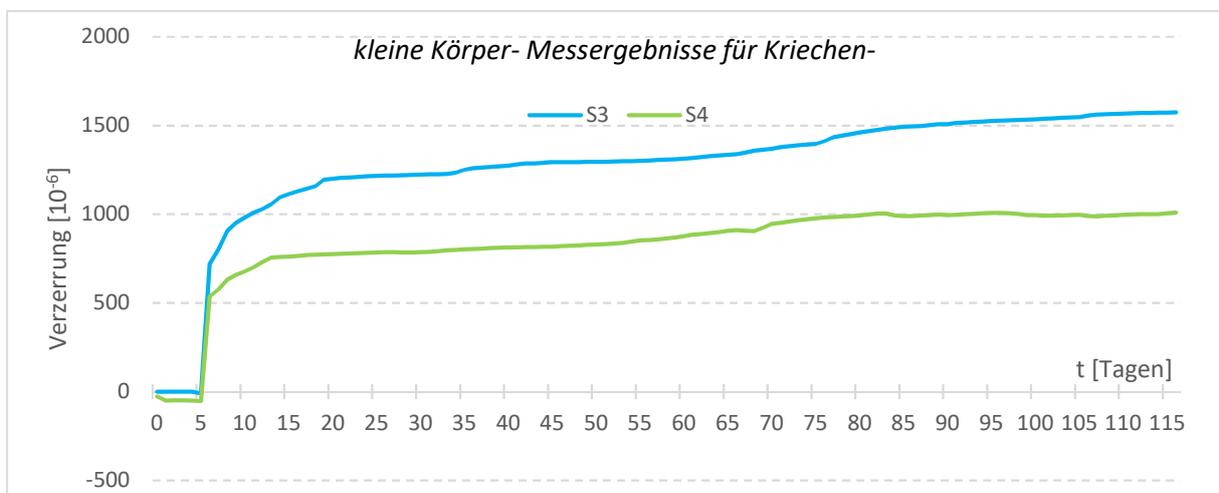


Bild B.30: Vergleich der Verzerrungen in kleinen Körper (mit 250x250 [mm] Querschnitt) von Serie S3 und S4

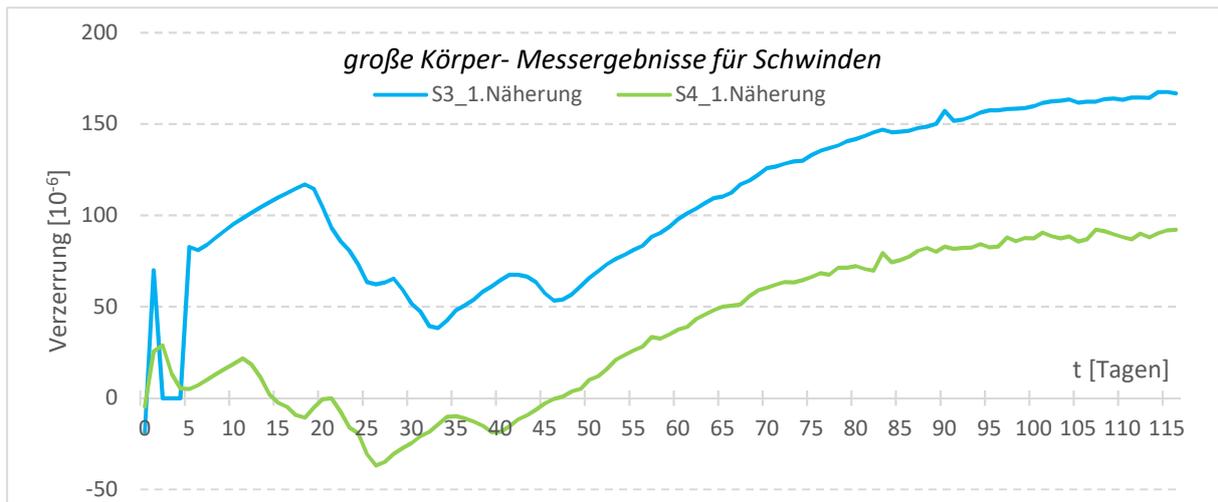


Bild B.31: Vergleich der Verzerrungen in Körper 1 (1000x1000 [mm] Querschnitt) von Serie S3 und S4

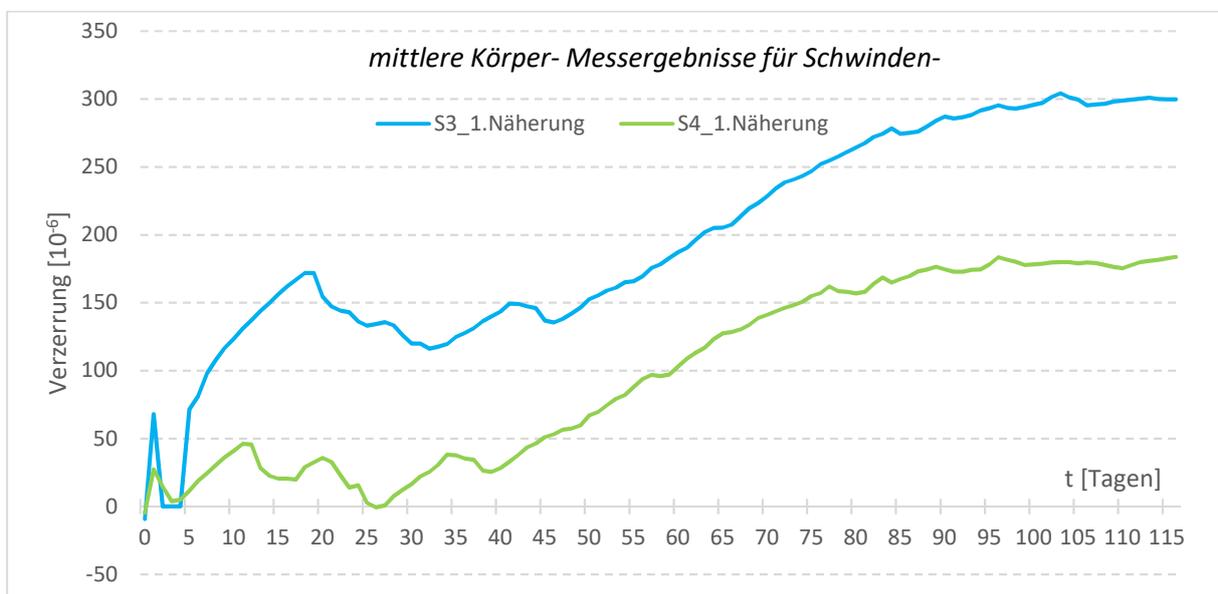


Bild B.32: Vergleich der Verzerrungen in Körper 2 (500x500 [mm] Querschnitt) von Serie S3 und S4

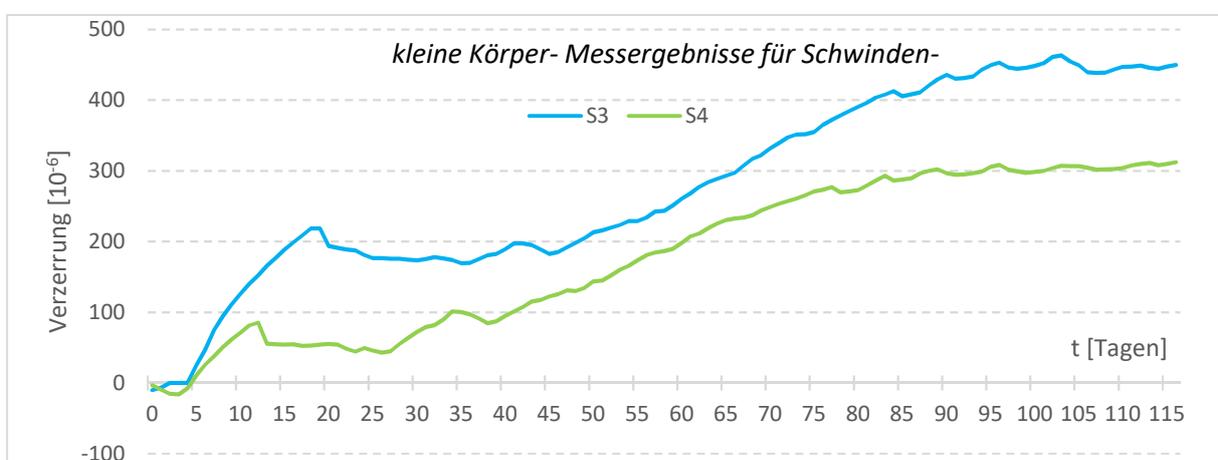


Bild B.33: Vergleich der Verzerrungen in Körper 3 (250x250 [mm] Querschnitt) von Serie S3 und S4

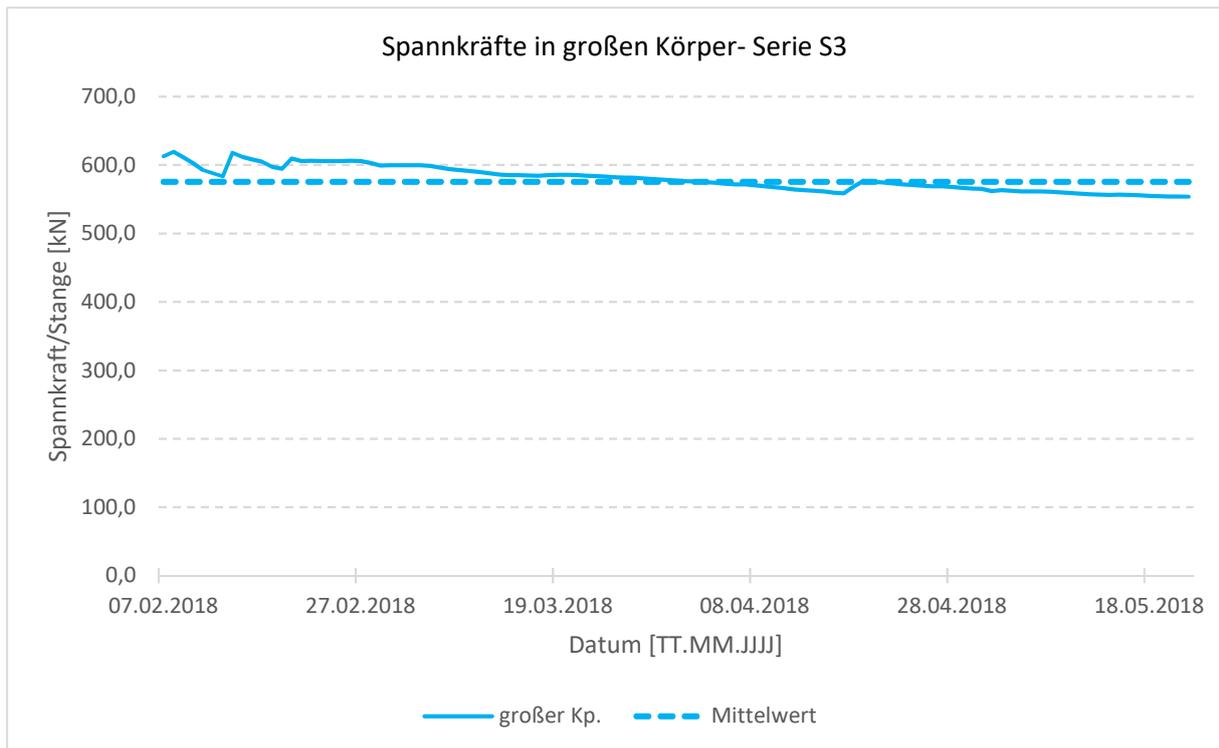


Bild B.34: Messwerte der Spannkraften, und die Mittelwerte davon in großen Körper (mit 1000x1000[mm] Querschnitt) - Serie S3

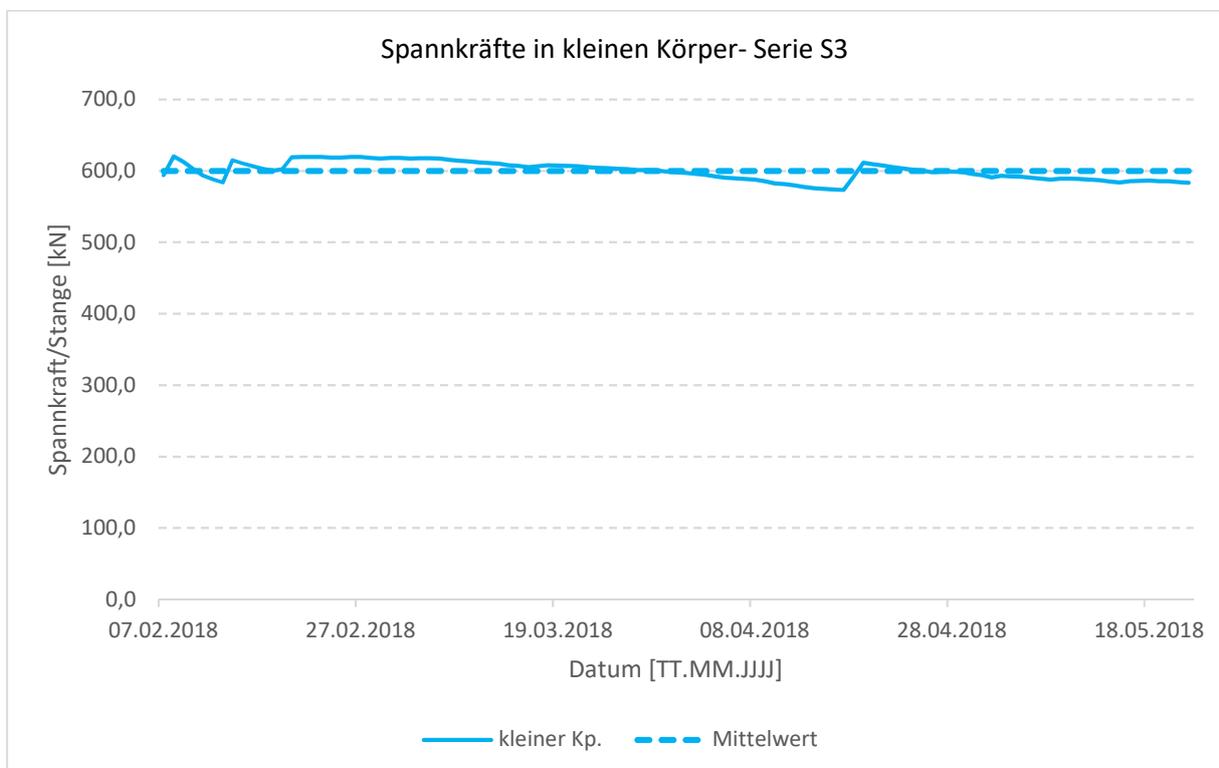


Bild B.35: Messwerte der Spannkraften, und die Mittelwerte davon in kleinen Körper (mit 250x250[mm] Querschnitt) - Serie S3

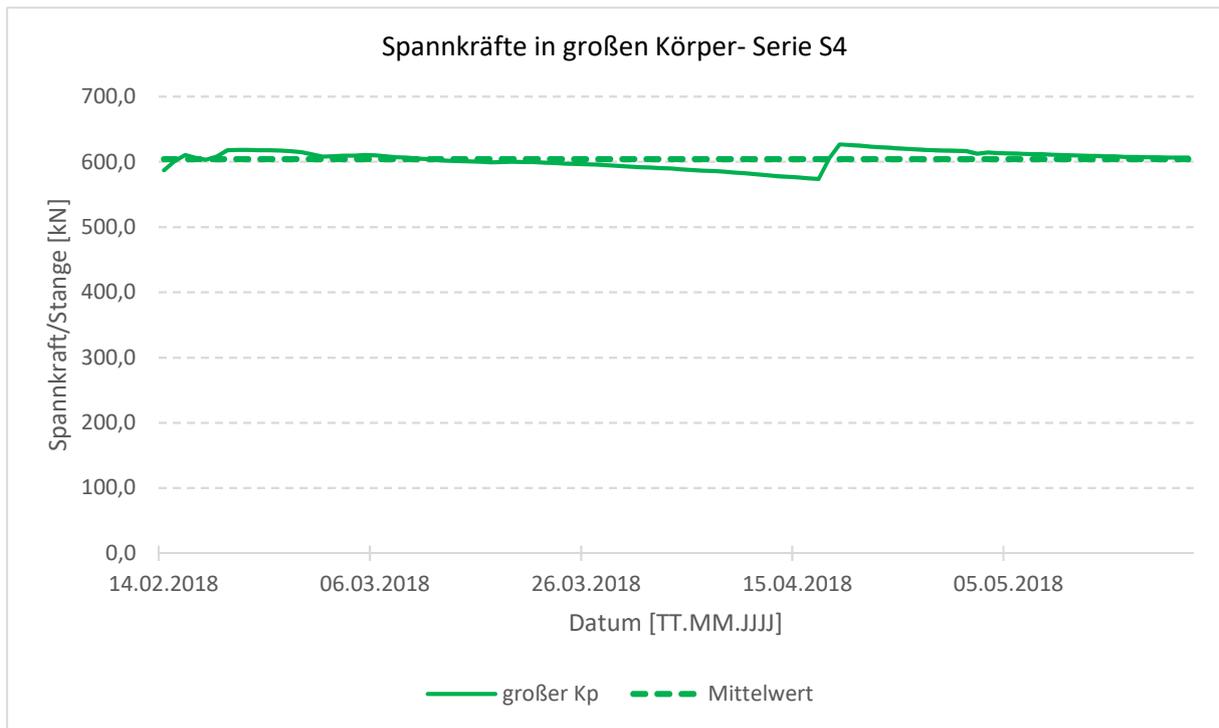


Bild B.36: Messwerte der Spannkraften, und die Mittelwerte davon in großen Körper (mit 1000x1000[mm] Querschnitt) - Serie S4

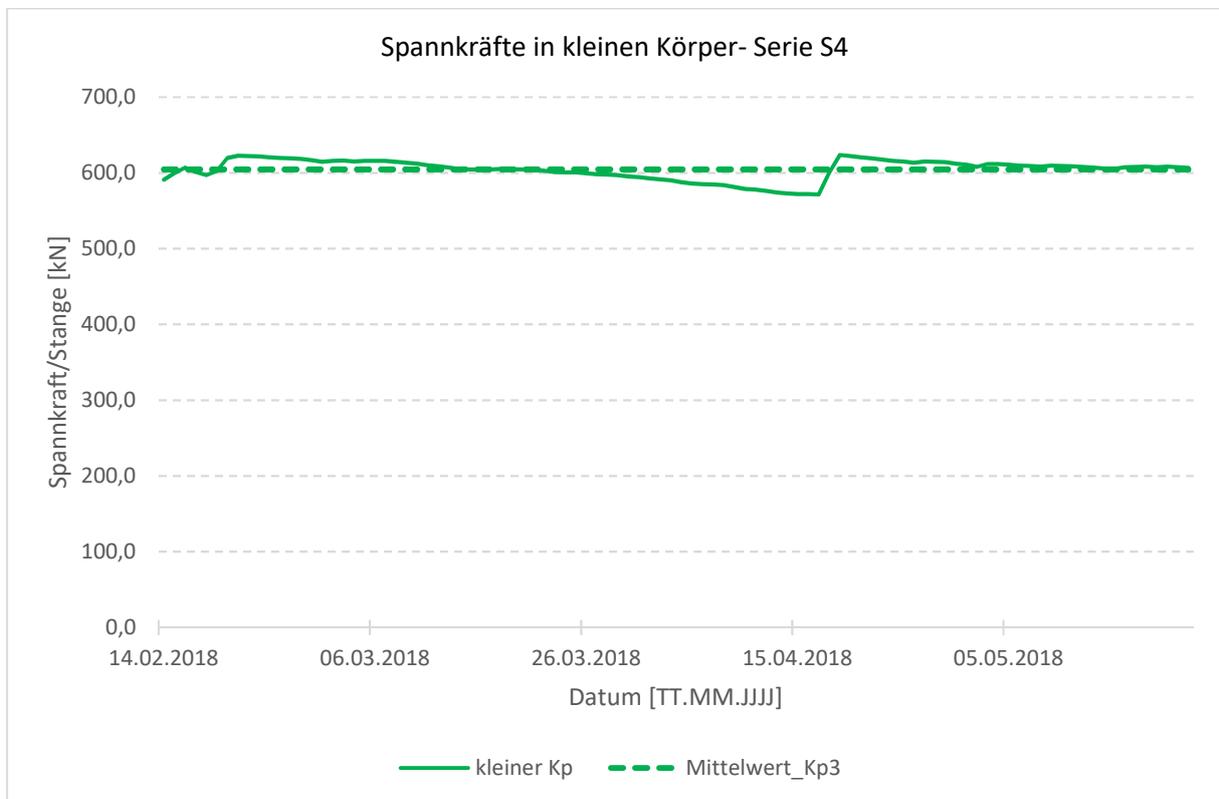


Bild B.37: Messwerte der Spannkraften, und die Mittelwerte davon in kleinen Körper (mit 250x250[mm] Querschnitt) - Serie S4

8.3. Anhang C: Ergebnisse nach EN 1992-1-1 (Eurocode 2)

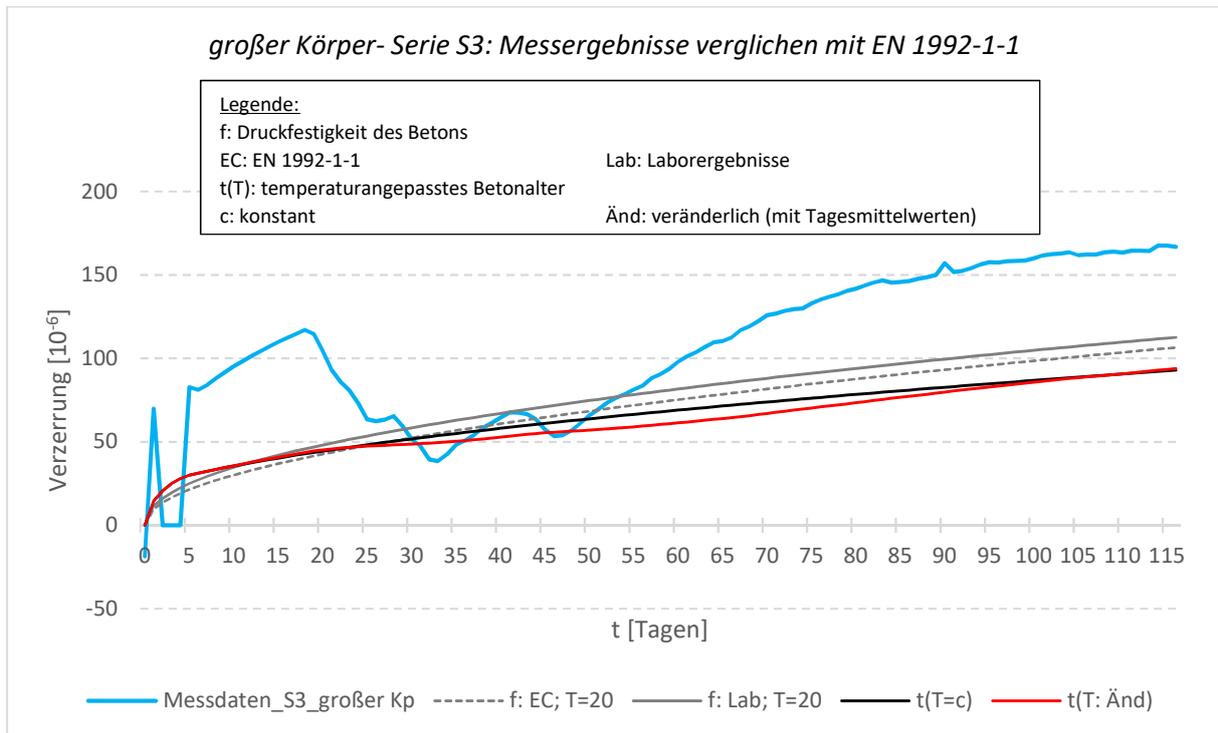


Bild C.1: Schwinden nach EN 1992-1-1, verglichen mit den Messwerten des Experiments; großer Körper (mit 1000x1000 [mm] Querschnitt); Serie S3

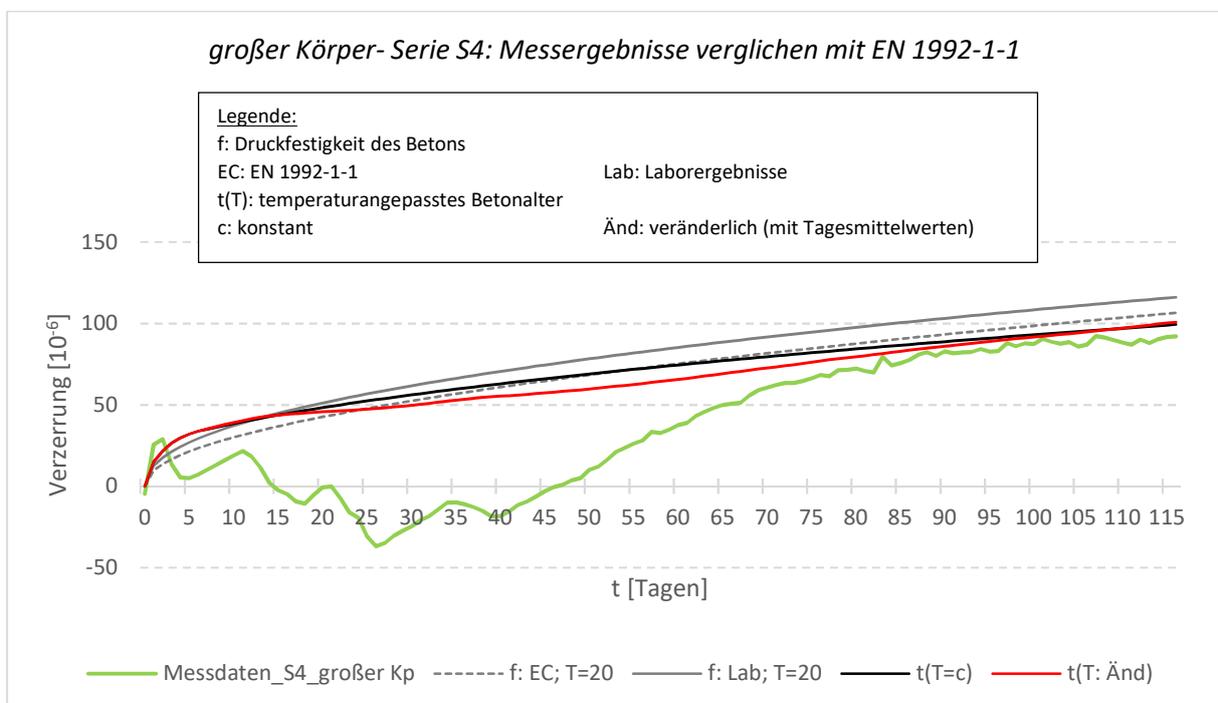


Bild C.2: Schwinden nach EN 1992-1-1, verglichen mit den Messwerten des Experiments; großer Körper (mit 1000x1000 [mm] Querschnitt); Serie S4

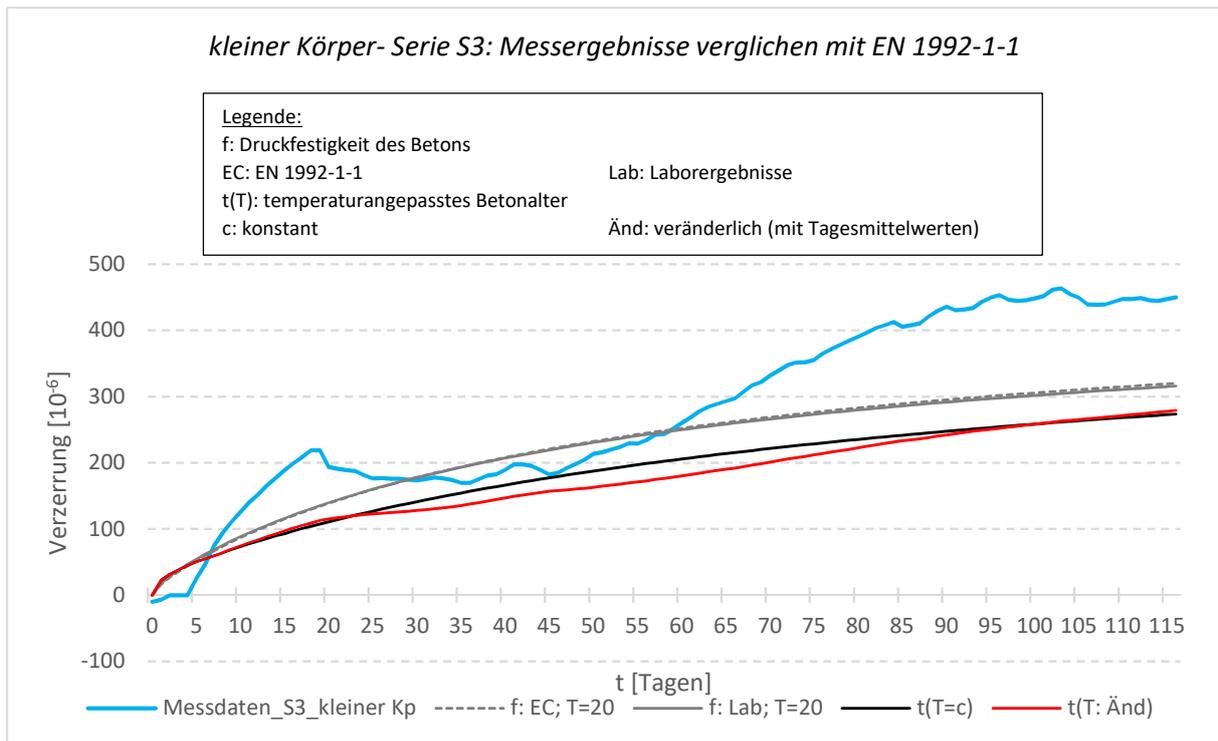


Bild C.3: Schwinden nach EN 1992-1-1, verglichen mit den Messwerten des Experiments; kleiner Körper (mit 250x250 [mm] Querschnitt); Serie S3

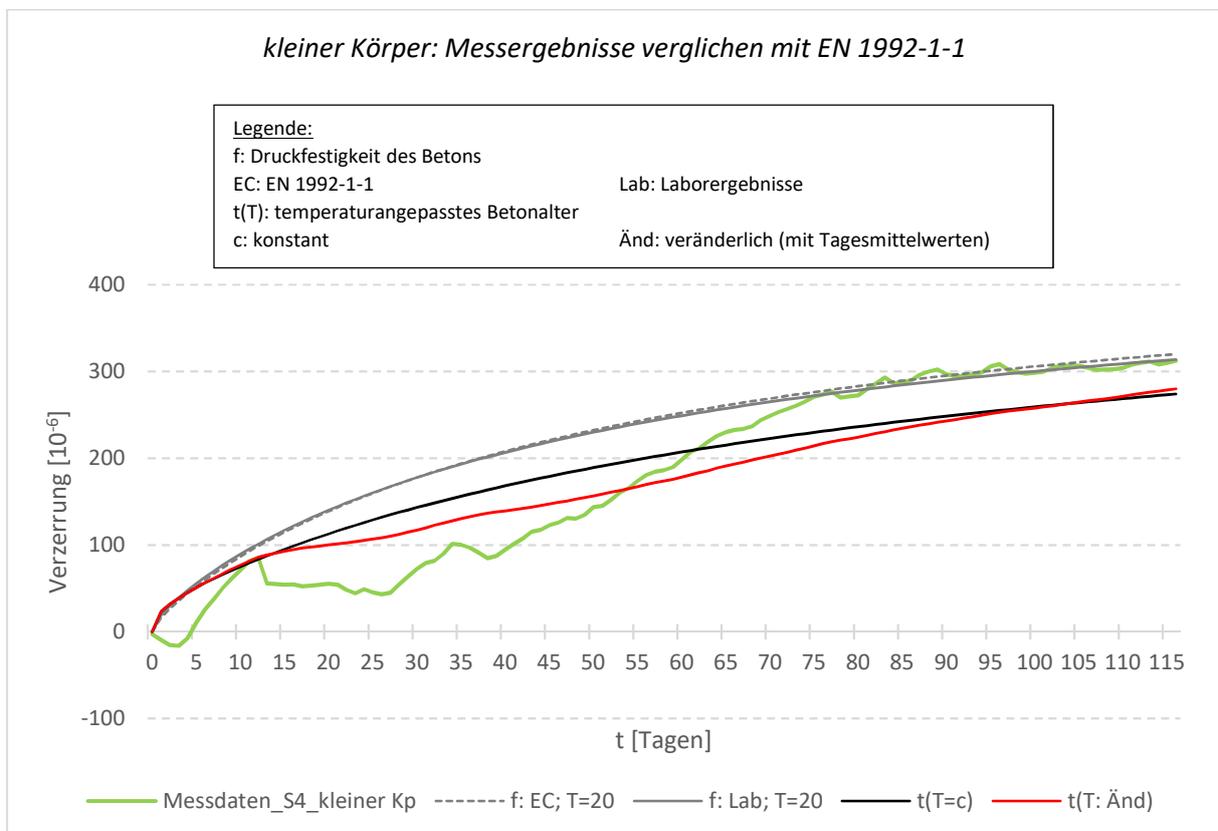


Bild C.4: Schwinden nach EN 1992-1-1, verglichen mit den Messwerten des Experiments; kleiner Körper (mit 250x250 [mm] Querschnitt); Serie S4

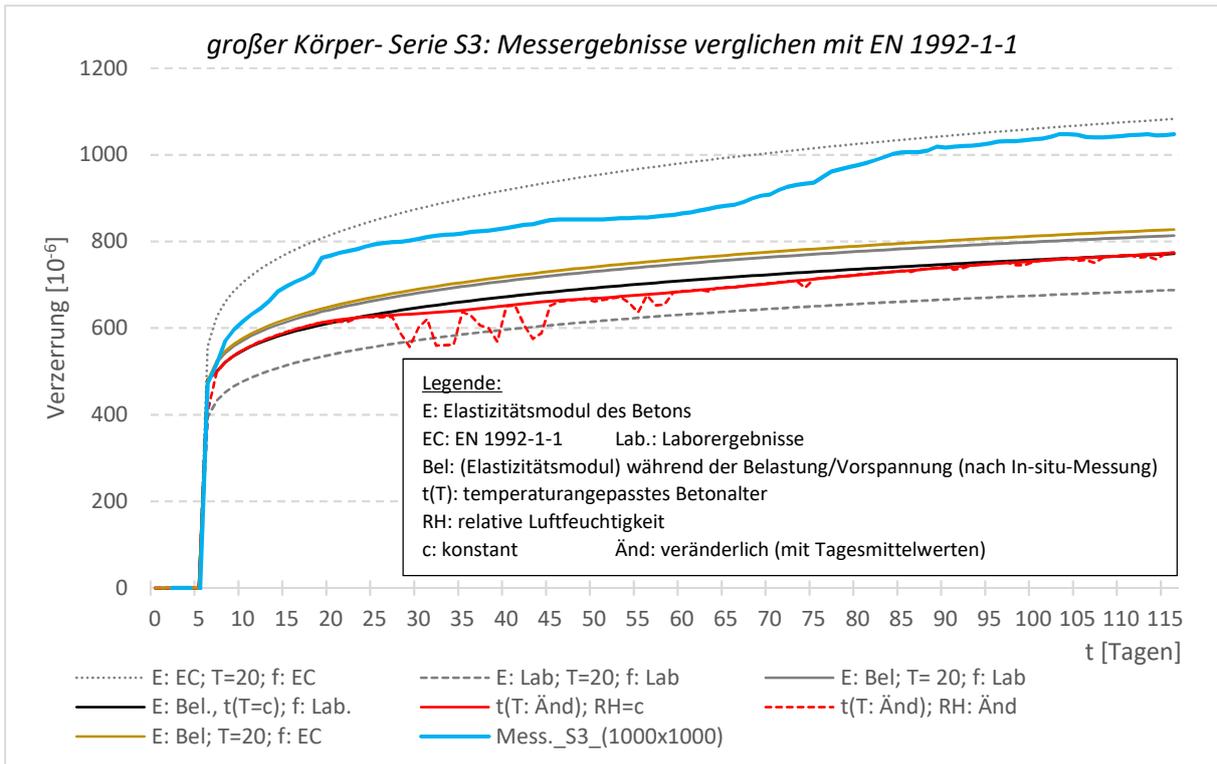


Bild C.5: Kriechen nach EN 1992-1-1, verglichen mit den Messwerten des Experiments; großer Körper (mit 1000x1000 [mm] Querschnitt); Serie S3

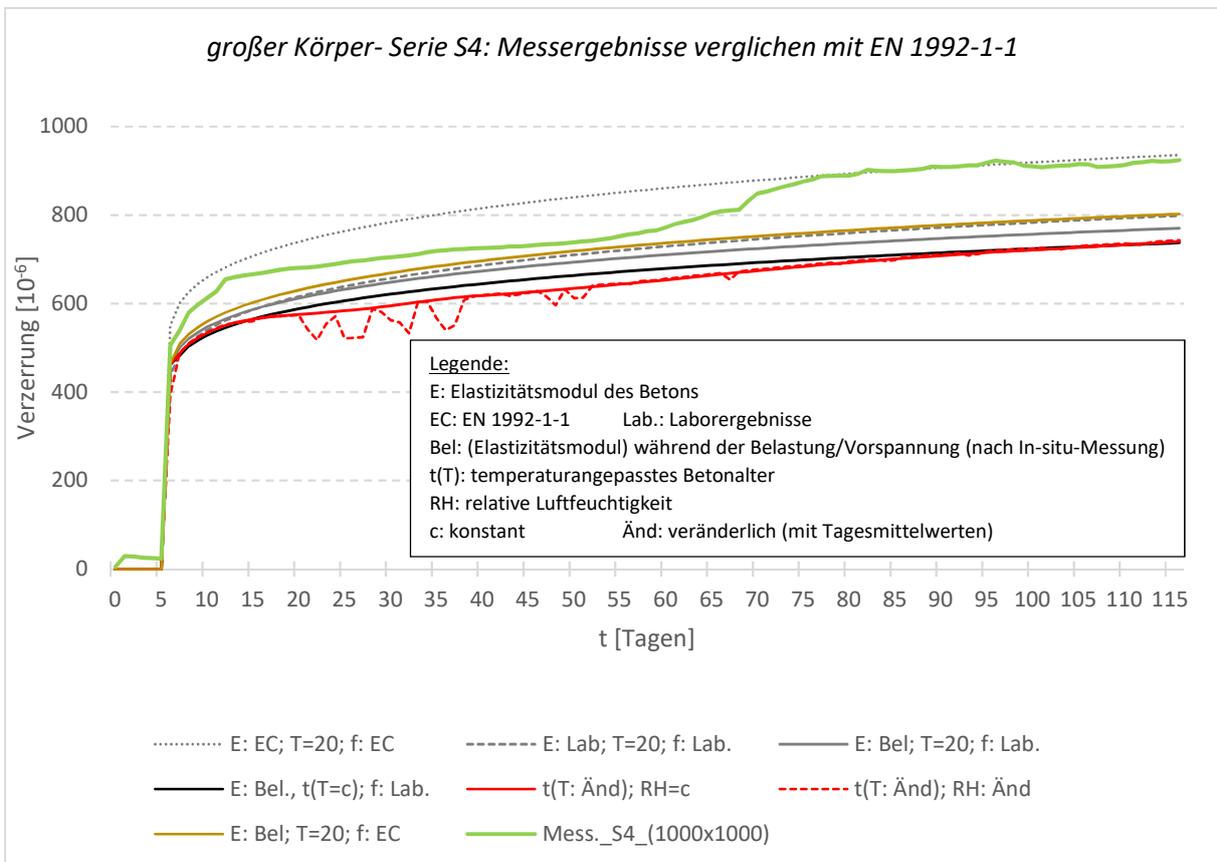


Bild C.6: Kriechen nach EN 1992-1-1, verglichen mit den Messwerten des Experiments; großer Körper (mit 1000x1000 [mm] Querschnitt); Serie S4

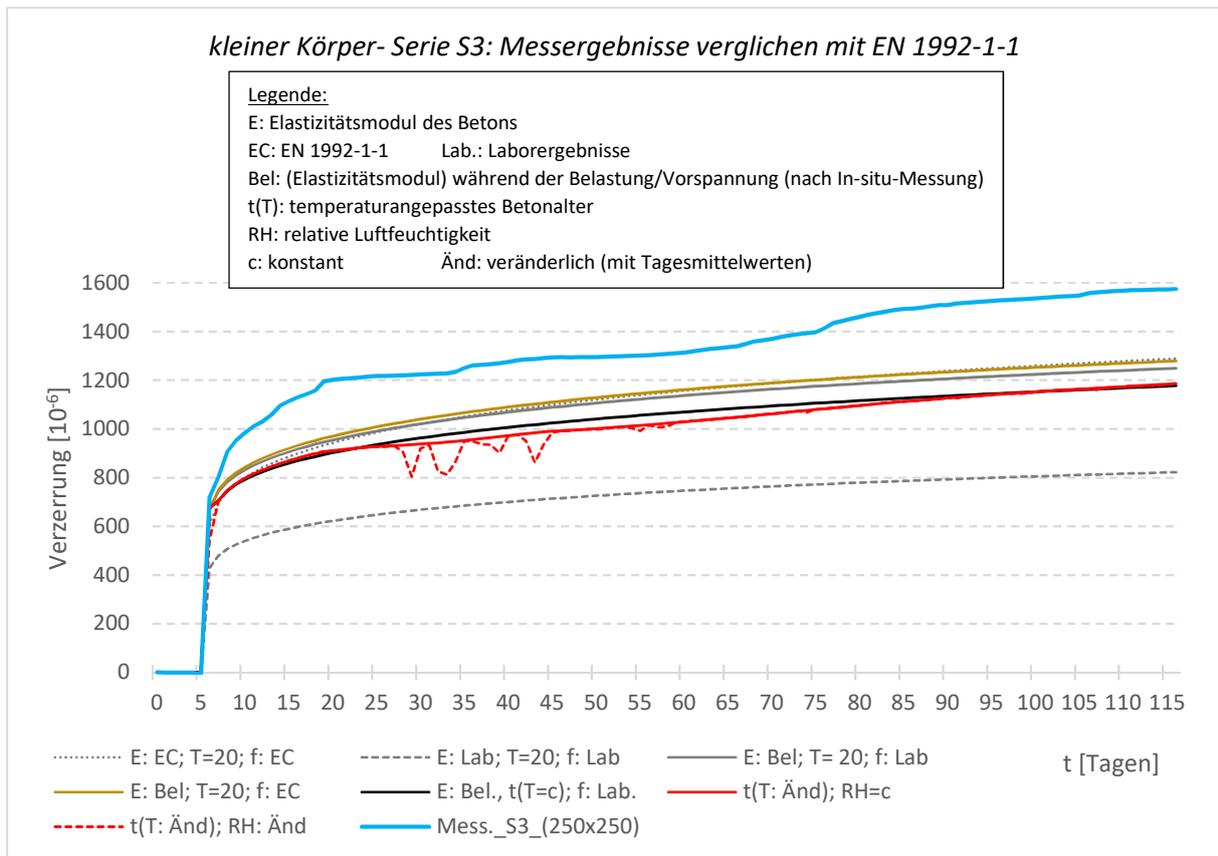


Bild C.7: Kriechen nach EN 1992-1-1, verglichen mit den Messwerten des Experiments; kleiner Körper (mit 250x250 [mm] Querschnitt); Serie S3

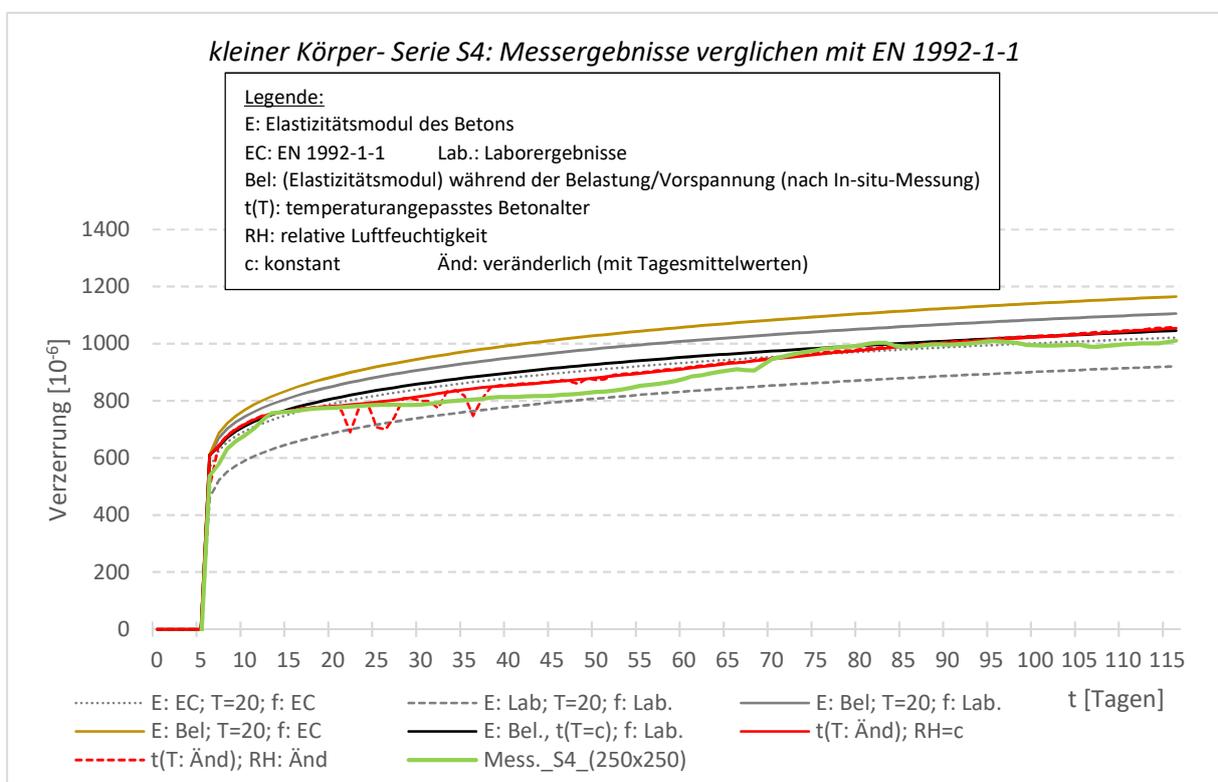


Bild C.8: Kriechen nach EN 1992-1-1, verglichen mit den Messwerten des Experiments; kleiner Körper (mit 250x250 [mm] Querschnitt); Serie S4

8.4. Anhang D: Ergebnisse nach Model Code 2010

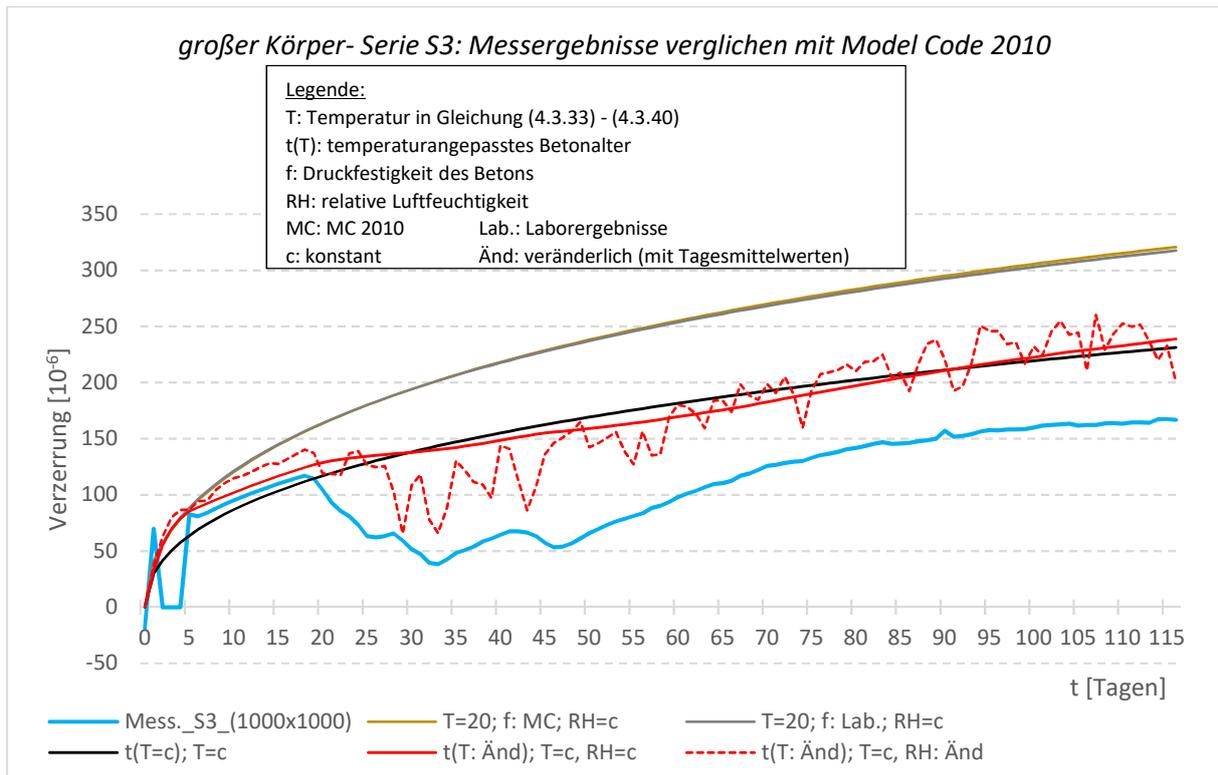


Bild D.1: Schwinden nach Model Code 2010, verglichen mit den Messwerten des Experiments; großer Körper (mit 1000x1000 [mm] Querschnitt); Serie S3

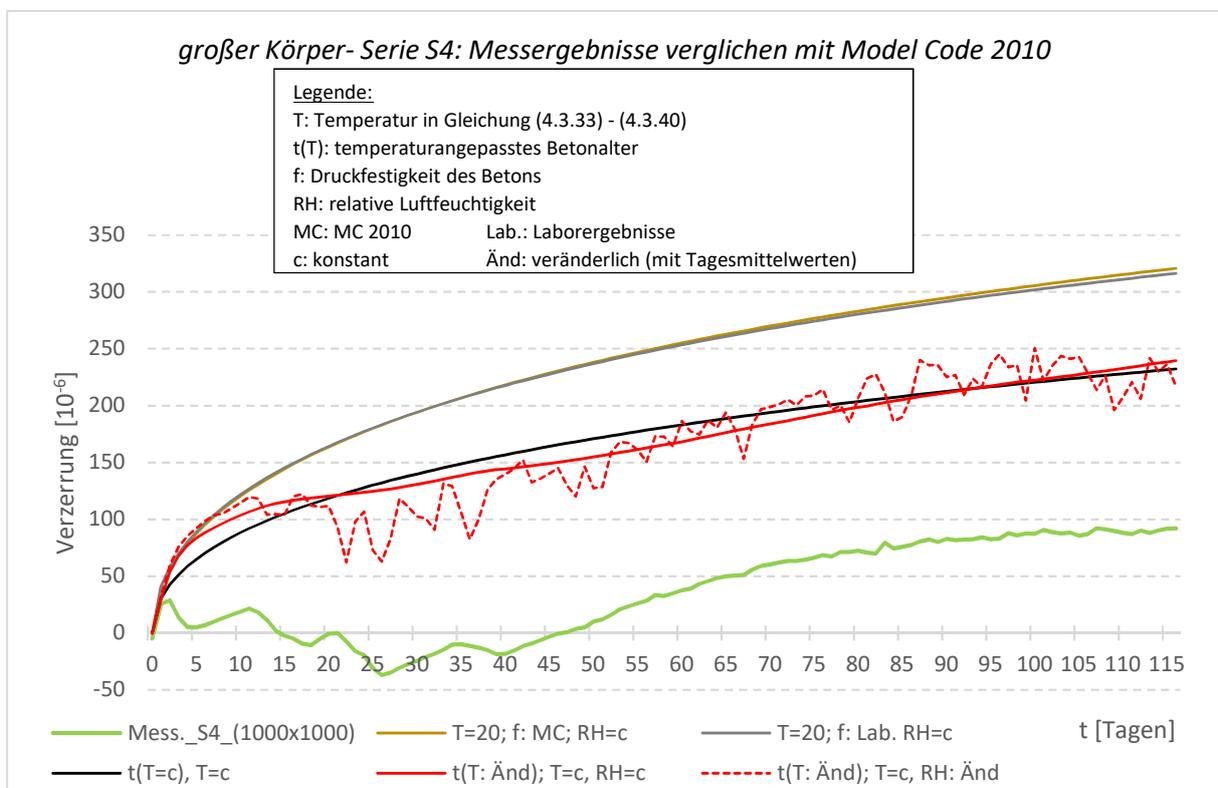


Bild D.2: Schwinden nach Model Code 2010, verglichen mit den Messwerten des Experiments; großer Körper (mit 1000x1000 [mm] Querschnitt); Serie S4

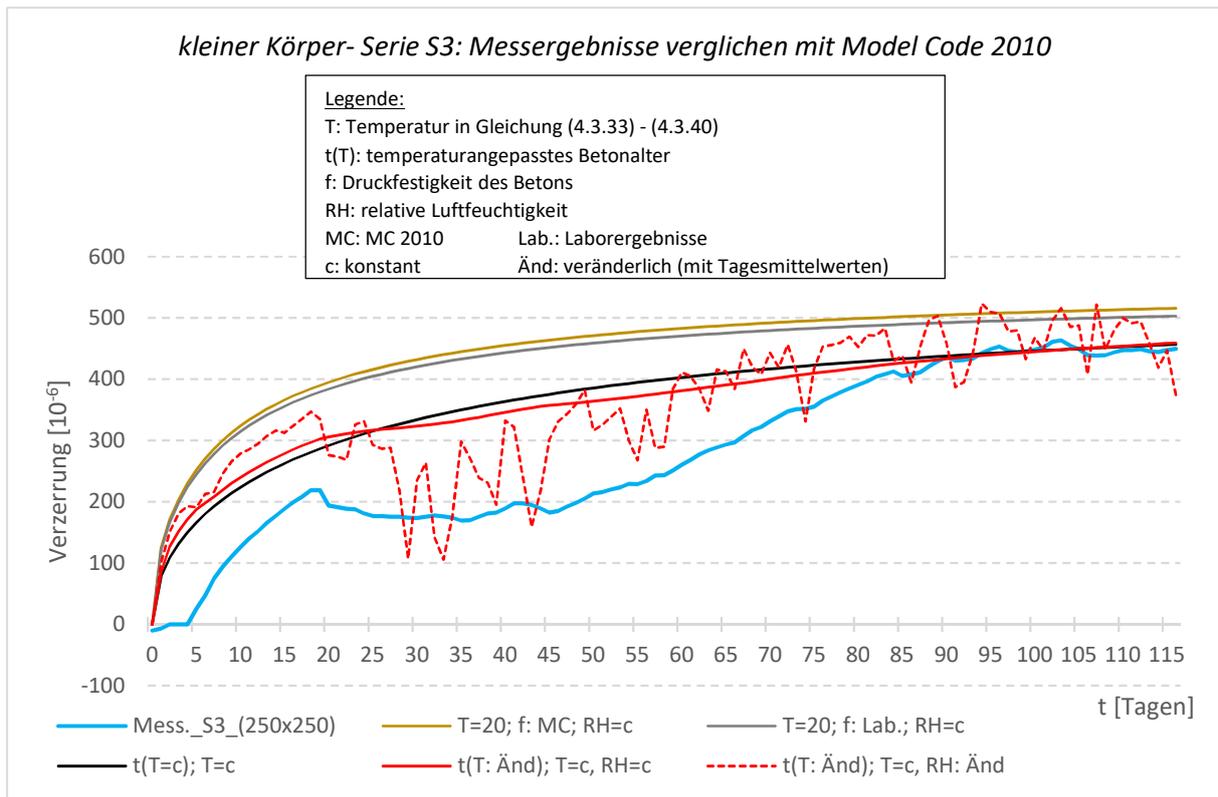


Bild D.3: Schwinden nach Model Code 2010, verglichen mit den Messwerten des Experiments; kleiner Körper (mit 250x250 [mm] Querschnitt); Serie S3

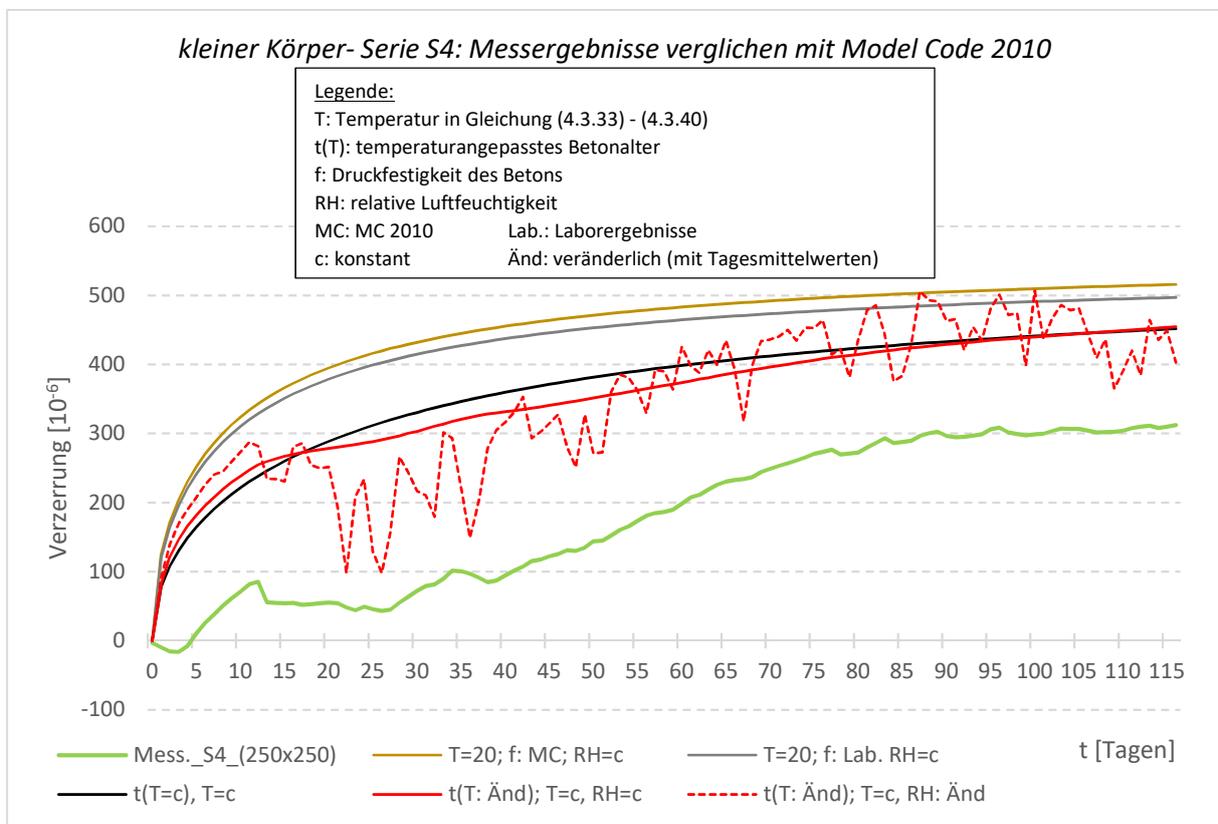


Bild D.4: Schwinden nach Model Code 2010, verglichen mit den Messwerten des Experiments; kleiner Körper (mit 250x250 [mm] Querschnitt); Serie S4

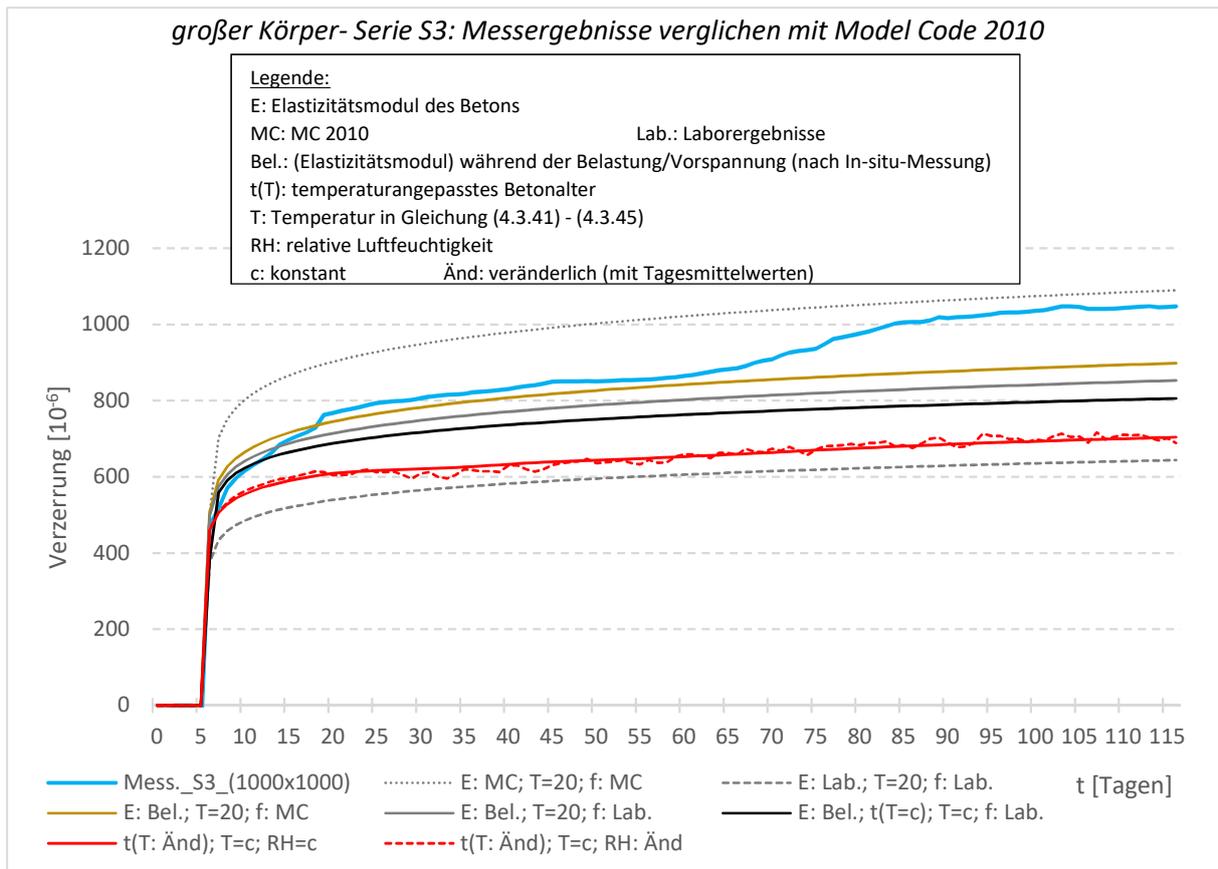


Bild D.5: Kriechen nach Model Code 2010, verglichen mit den Messwerten des Experiments; großer Körper (mit 1000x1000 [mm] Querschnitt); Serie S3

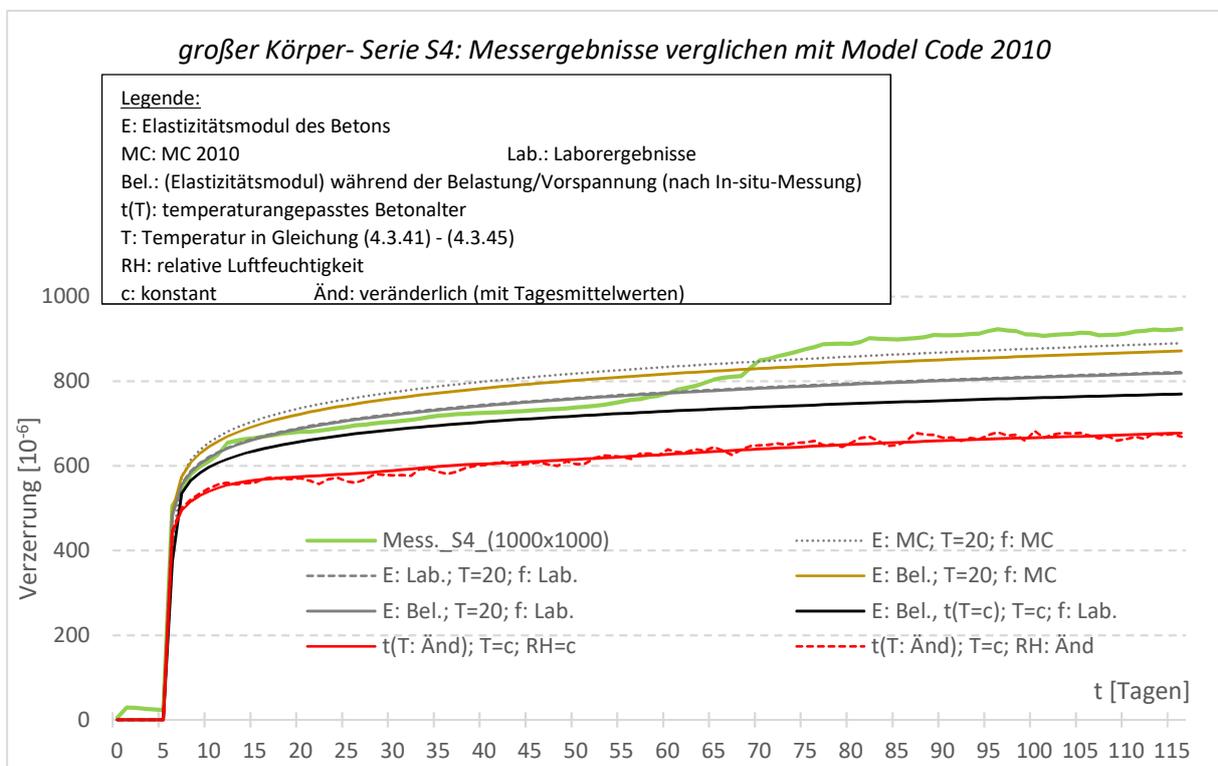


Bild D.6: Kriechen nach Model Code 2010, verglichen mit den Messwerten des Experiments; großer Körper (mit 1000x1000 [mm] Querschnitt); Serie S4

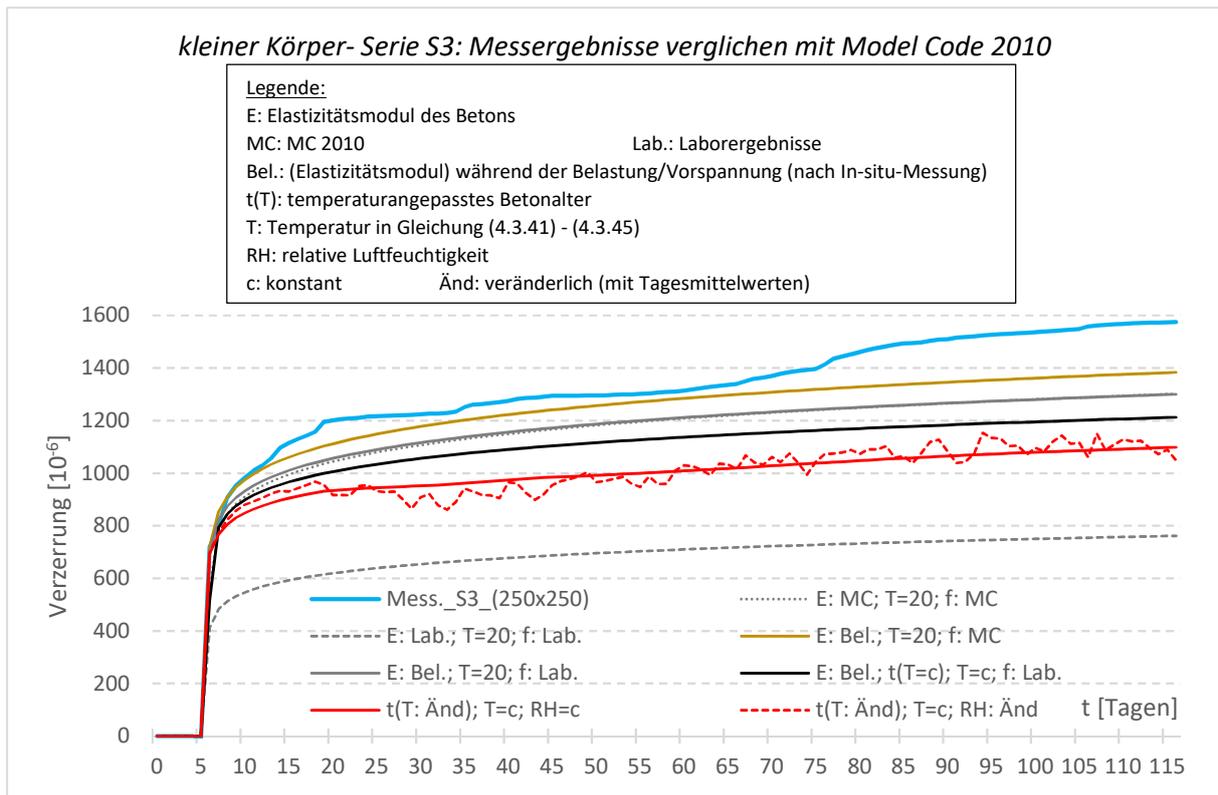


Bild D.7: Kriechen nach Model Code 2010, verglichen mit den Messwerten des Experiments; kleiner Körper (mit 250x250 [mm] Querschnitt); Serie S3

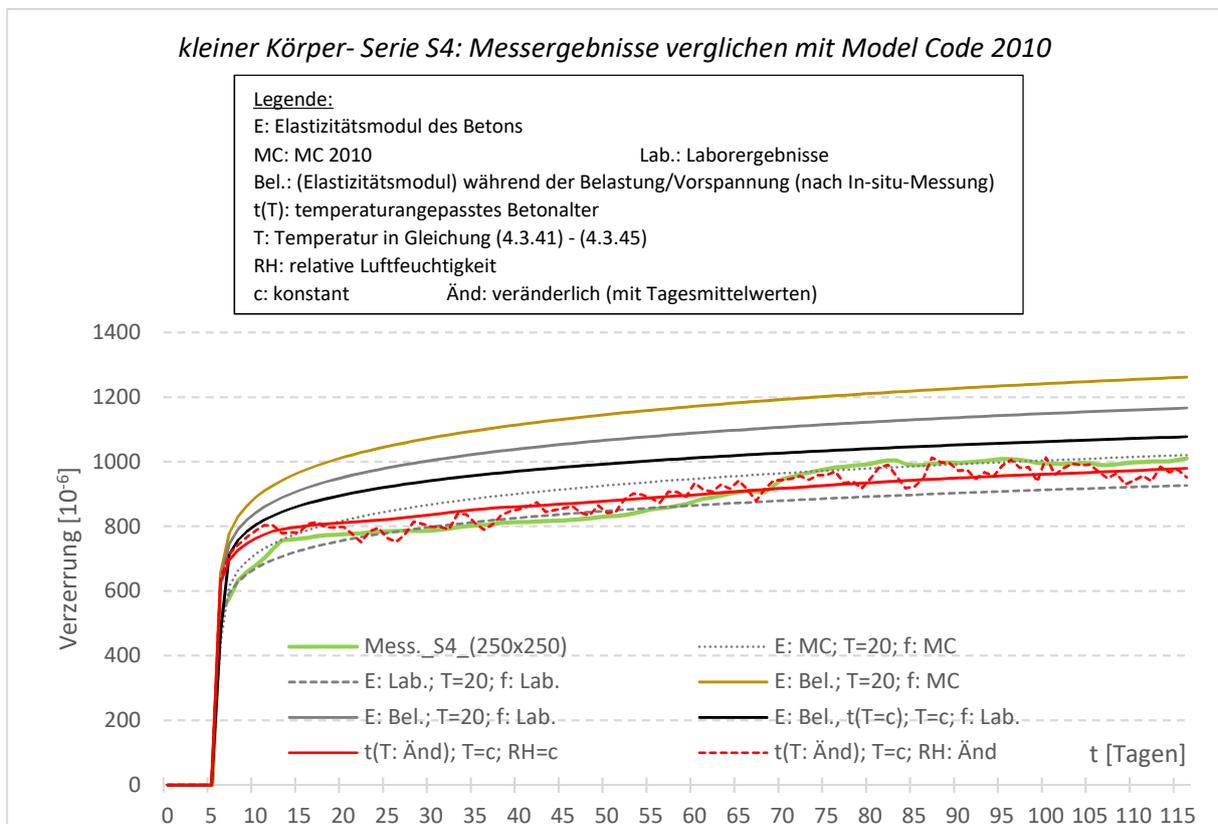


Bild D.8: Kriechen nach Model Code 2010, verglichen mit den Messwerten des Experiments; kleiner Körper (mit 250x250 [mm] Querschnitt); Serie S4

8.5. Anhang E: Ergebnisse nach RILEM Modell B4

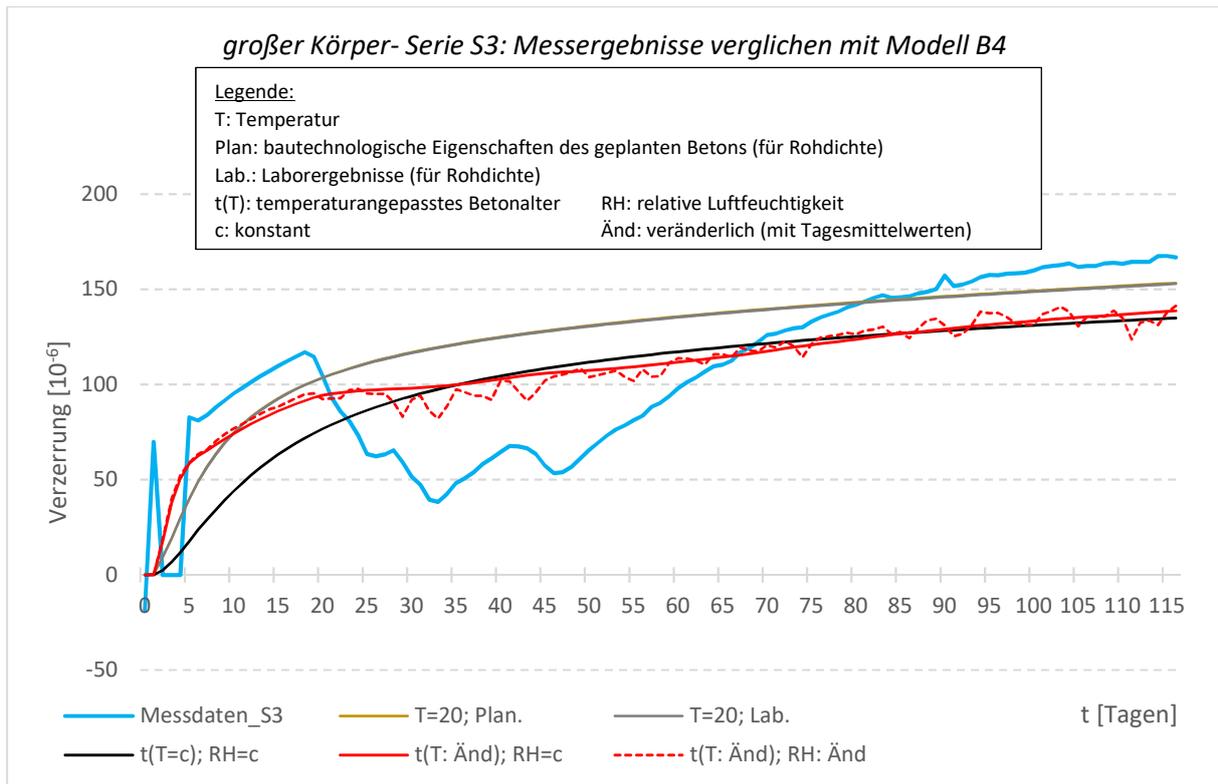


Bild E.1: Schwinden nach Modell B4, verglichen mit den Messwerten des Experiments; großer Körper (mit 1000x1000 [mm] Querschnitt); Serie S3

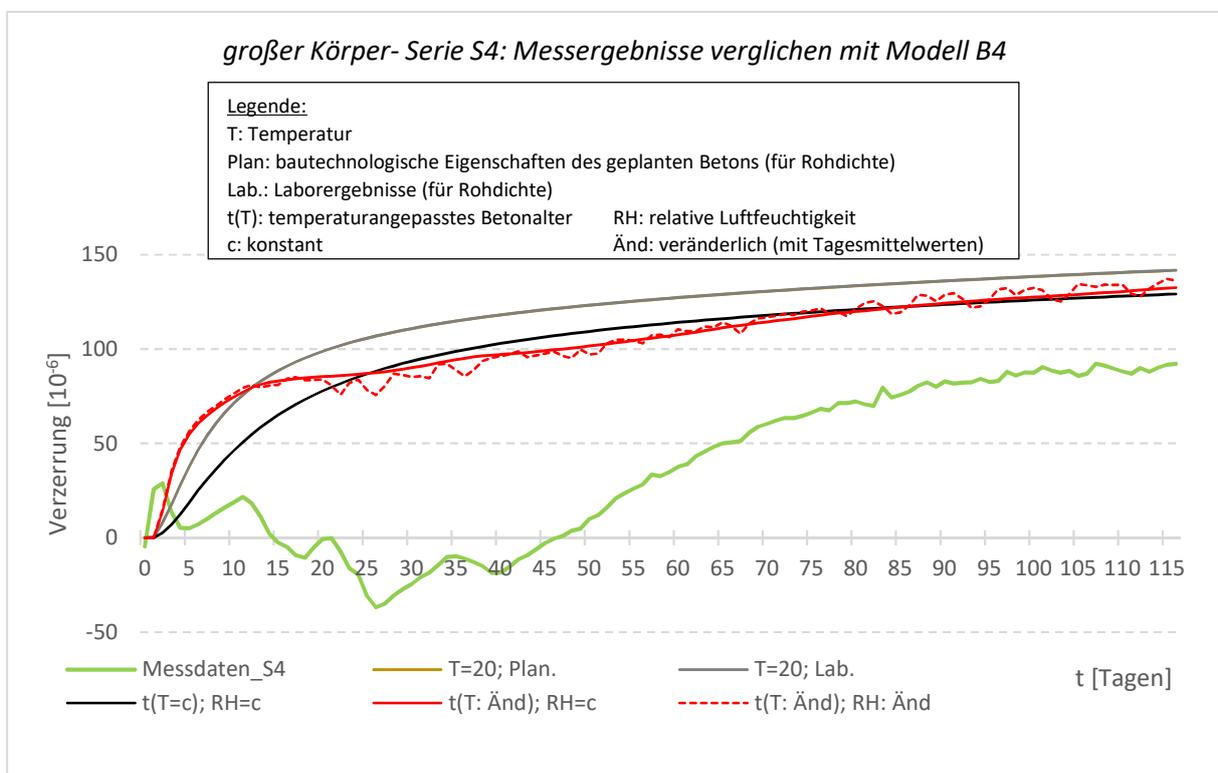


Bild E.2: Schwinden nach Modell B4, verglichen mit den Messwerten des Experiments; großer Körper (mit 1000x1000 [mm] Querschnitt); Serie S4

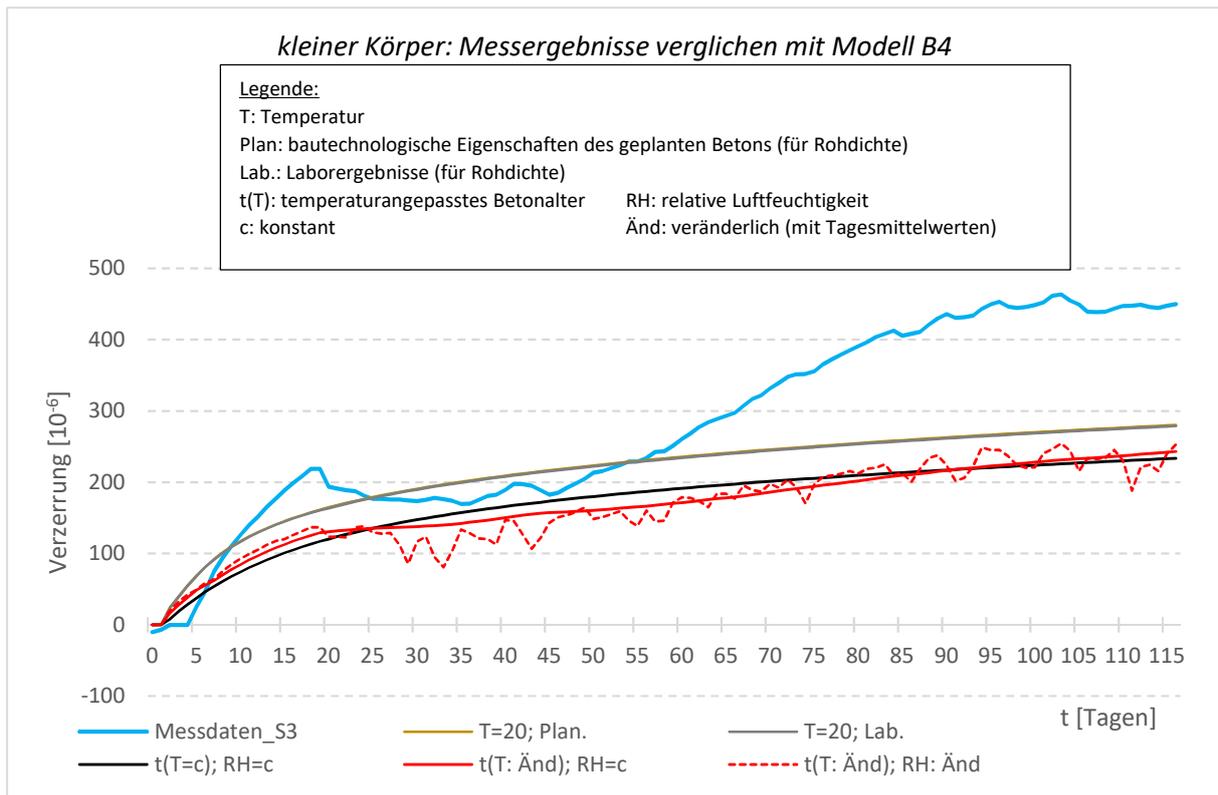


Bild E.3: Schwinden nach Modell B4, verglichen mit den Messwerten des Experiments; kleiner Körper (mit 250x250 [mm] Querschnitt); Serie S3

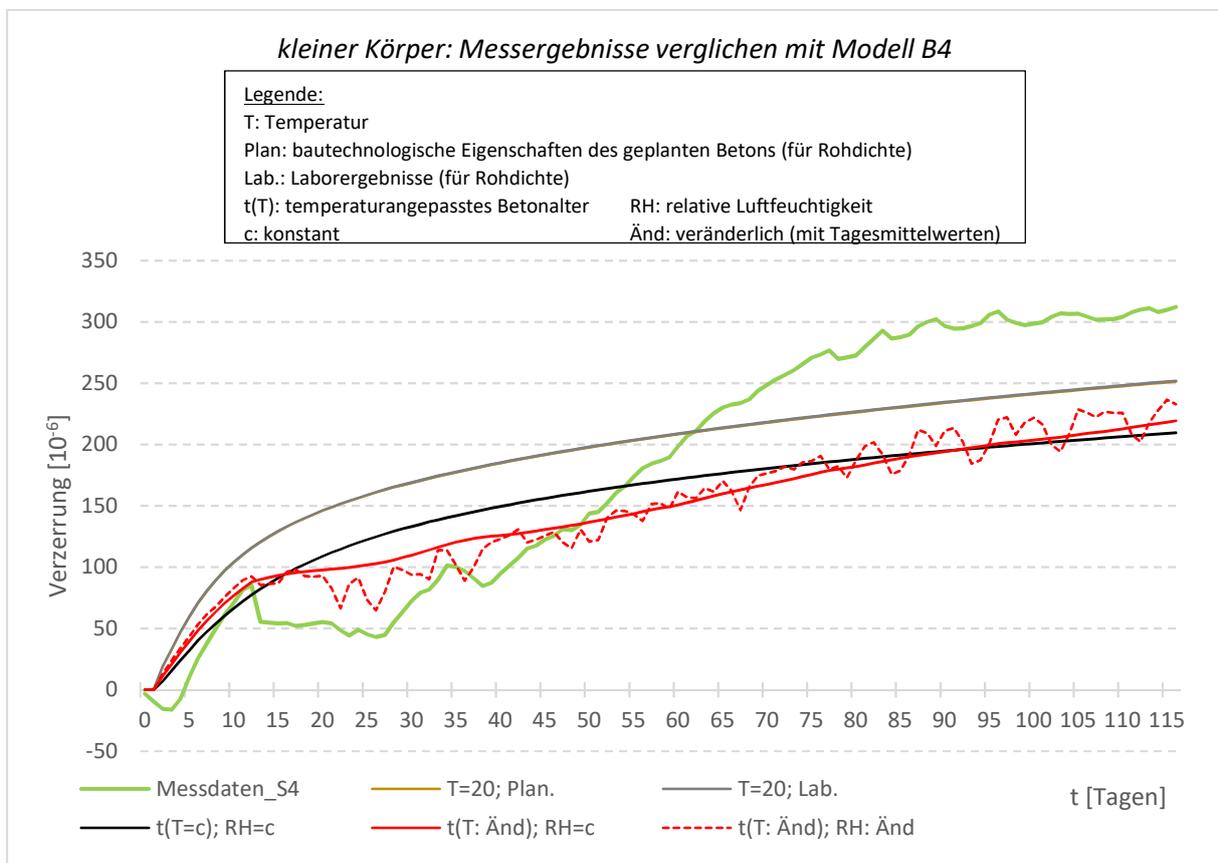


Bild E.4: Schwinden nach Modell B4, verglichen mit den Messwerten des Experiments; kleiner Körper (mit 250x250 [mm] Querschnitt); Serie S4

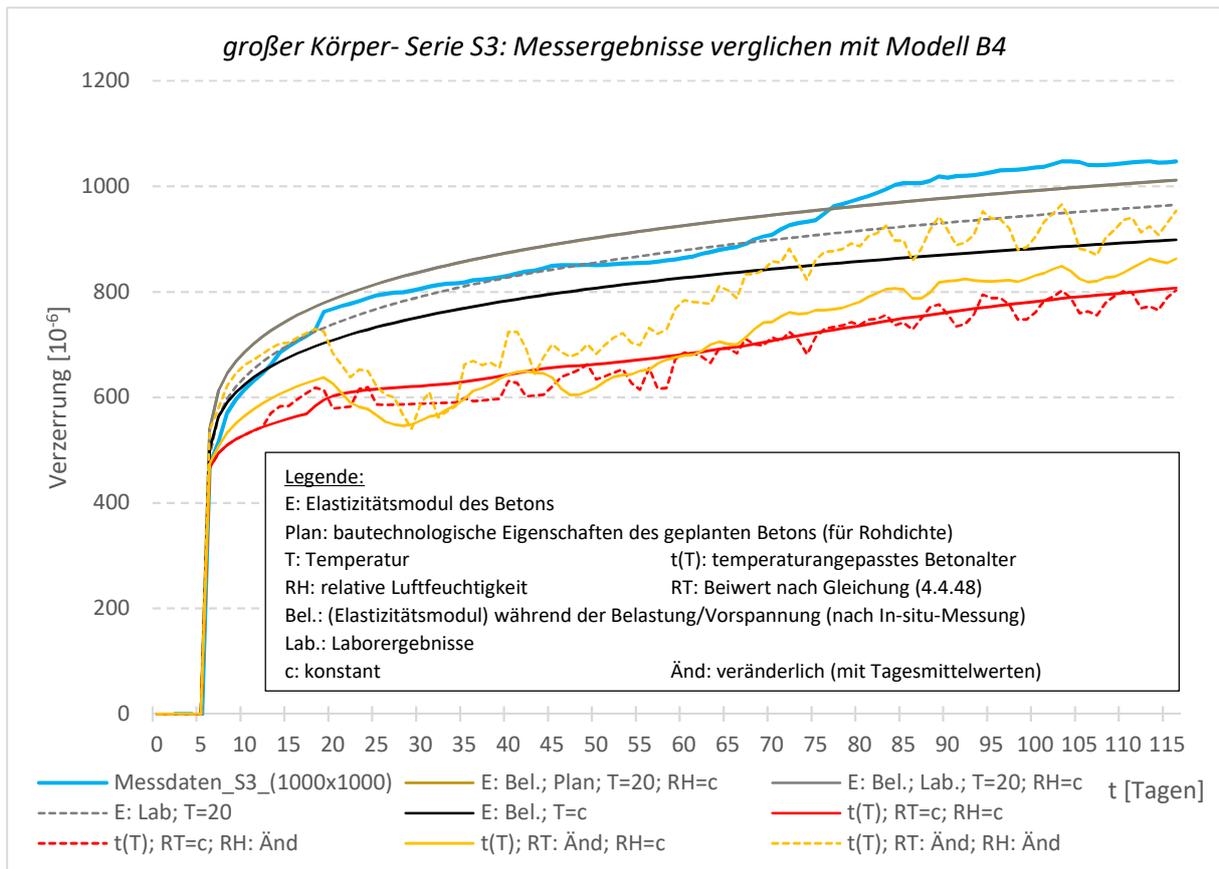


Bild E.5: Kriechen nach Modell B4, verglichen mit den Messwerten des Experiments; großer Körper (mit 1000x1000 [mm] Querschnitt); Serie S3

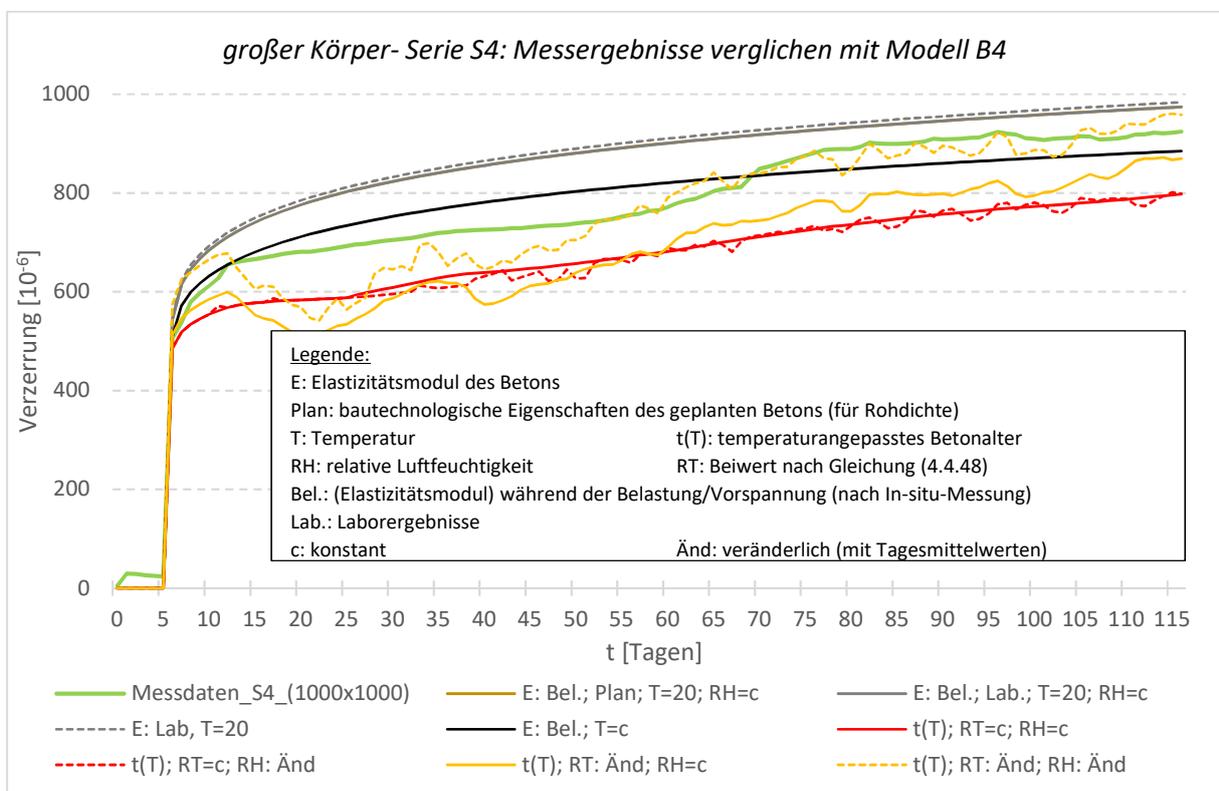


Bild E.6: Kriechen nach Modell B4, verglichen mit den Messwerten des Experiments; großer Körper (mit 1000x1000 [mm] Querschnitt); Serie S4

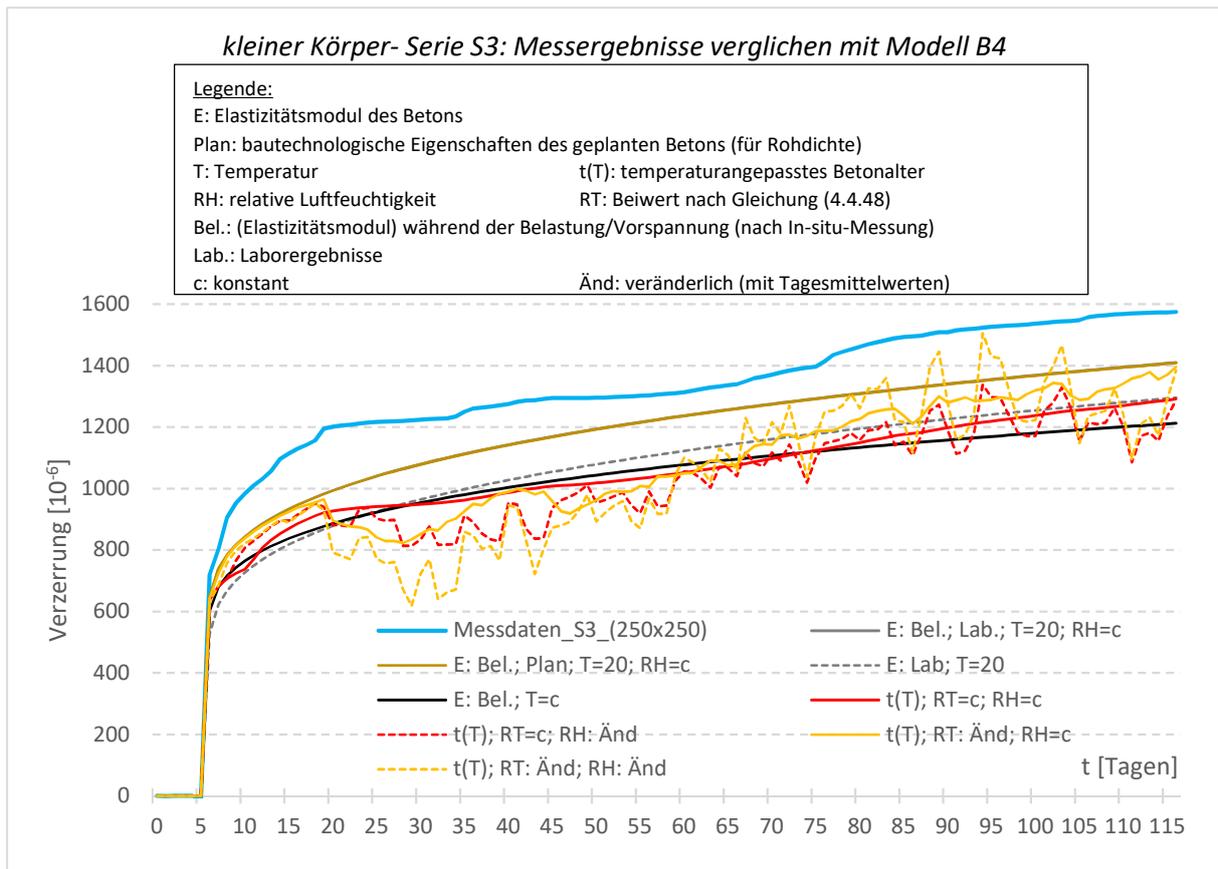


Bild E.7: Kriechen nach Modell B4, verglichen mit den Messwerten des Experiments;
kleiner Körper (mit 250x250 [mm] Querschnitt); Serie S3

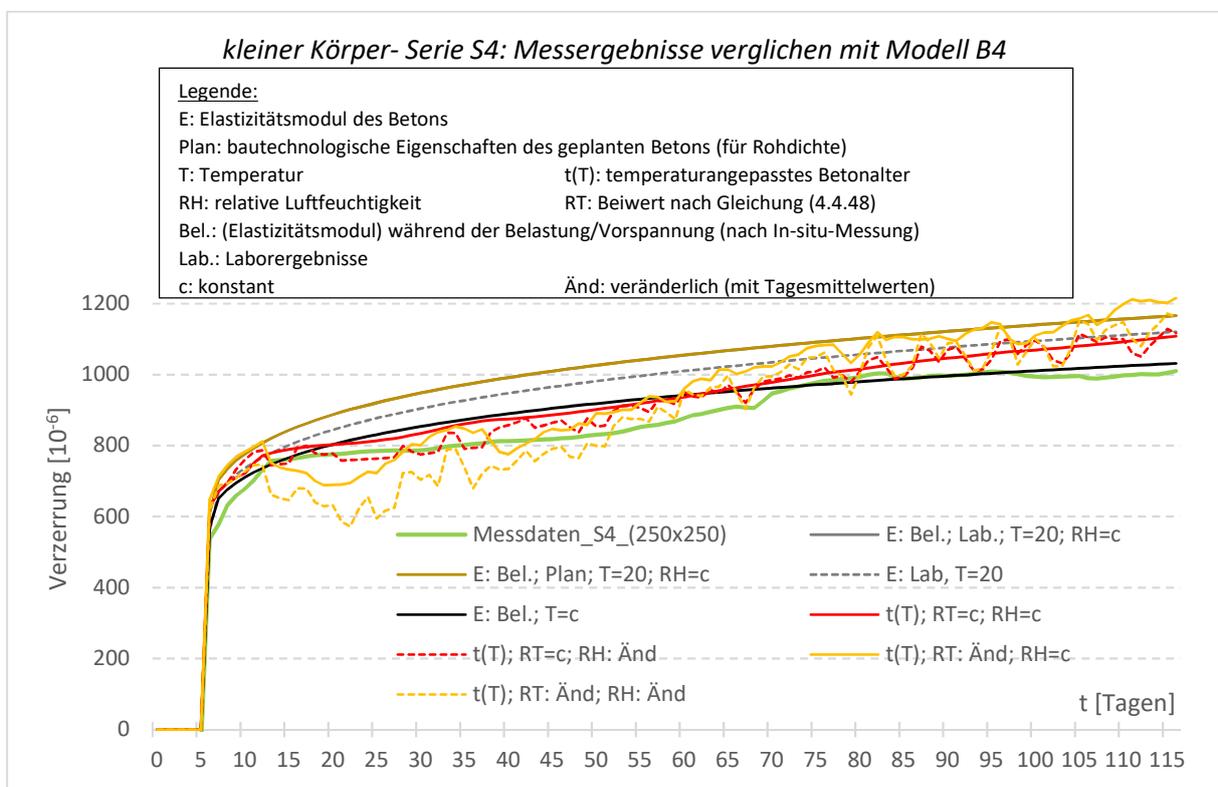


Bild E.8: Kriechen nach Modell B4, verglichen mit den Messwerten des Experiments;
kleiner Körper (mit 250x250 [mm] Querschnitt); Serie S4