



Anja Ernst, BSc

Besonderheiten des Zugkriechens unter Berücksichtigung der Be- und Entlastungsgeschichte

MASTERARBEIT

zur Erlangung des akademischen Grades

Diplom-Ingenieurin

Masterstudium Bauingenieurwissenschaften - Konstruktiver Ingenieurbau

eingereicht an der

Technischen Universität Graz

Betreuer

Ass.Prof. Dipl.-Wirtsch.-Ing. Dr.techn. Dirk Schlicke

Dipl.-Ing. Eva Maria Dorfmann

Institut für Betonbau

EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG

AFFIDAVIT

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe. Das in TUGRAZonline hochgeladene Textdokument ist mit der vorliegenden Masterarbeit identisch.

I declare that I have authored this thesis independently, that I have not used other than the declared sources/resources, and that I have explicitly indicated all material which has been quoted either literally or by content from the sources used. The text document uploaded to TUGRAZonline is identical to the present master's thesis.

Datum / Date

Unterschrift / Signature

Danksagung

Ich möchte mich an dieser Stelle bei all jenen herzlich bedanken, die mir bei der Erstellung dieser Arbeit beiseite gestanden und mich unterstützt haben.

Mein Dank gilt insbesondere meinen beiden Betreuern Frau Dipl.-Ing. Eva Maria Dorfmann und Herrn Ass.Prof. Dr. Dirk Schlicke für die ausgezeichnete fachliche Betreuung und die tatkräftige Unterstützung während der Versuchsdurchführung. Deren Einsatz und Geduld haben die Arbeit in dieser Form erst möglich gemacht. Weiters sei den Mitarbeitern des Instituts für Betonbau und des Labors für Konstruktiven Ingenieurbau für deren Hilfe bei der Erstellung der Versuchskörper und der Versuchsdurchführung gedankt. Durch sie konnte der reibungslose Versuchsablauf gewährleistet werden.

Ein besonderer Dank gilt außerdem meinen Eltern Veronika und Martin, welche mir diese fundierte Ausbildung ermöglicht und mich in all meinen Entscheidungen unterstützt haben. Danken möchte ich auch meinem Freund David für seine Geduld und seinen bedingungslosen und ehrlichen Beistand während meiner gesamten Studienzzeit. Zum Schluss möchte ich noch bei meiner restlichen Familie und meinen Freunden (und Studienkollegen, die zu Freunden wurden) bedanken, dass sie immer ein offenes Ohr für mich hatten und mir mit Rat und Tat zur Seite gestanden sind.

DANKE!

Kurzfassung

Die vorliegende Masterarbeit beschäftigt sich mit dem Kriechverhalten von Beton unter Zugbeanspruchung bei Be- und Entlastung. Besonderes Augenmerk liegt dabei auf dem Einfluss der Spannungsgeschichte auf das anschließende Kriechverhalten. Hintergrund sind die bei der Hydratation von verformungsbehinderten Systemen allmählich entstehenden Zugzwangsspannungen. Das Kriechverhalten von jungem Beton hat in diesem Zusammenhang wesentlichen Einfluss auf die Rissgefahr und die erforderliche Mindestbewehrung für die Begrenzung der Rissbreite gezwängter Bauteile.

Die durchgeführten Untersuchungen vergleichen den Einfluss einer sich langsam aufbauenden Zugzwangsspannung mit einer plötzlich auftretenden Einwirkung auf das Zugkriechen von Beton. Neben der Belastungsgeschichte folgt auch eine Betrachtung der Entlastungsphase. Zu klären ist dabei, ob das Verhalten von Beton unter Zug mit den praxisüblichen Materialgesetzen und Berechnungsmodellen zutreffend erfasst werden kann.

Im Zuge der Masterarbeit wurden hierzu Zugkriechversuche mit aufgehängten Betonzylindern durchgeführt. Mit der Auswertung der Ergebnisse der experimentellen Untersuchung wurde gezeigt, dass die Kriechverformung während der Be- und Entlastungsphase wesentlich von der vorangegangenen Belastungsgeschichte abhängt. Obwohl das maximale Belastungsniveau in beiden Fällen gleich groß war, führte die langsame Belastung im jüngeren Alter zu einer kleineren Kriechverformung, als die einstufige Einwirkung im höheren Betonalter. Bei der Entlastung wird ein ähnliches Verhalten beobachtet.

Die Nachrechnung der gemessenen Dehnungen des stufenweise belasteten Körpers erfolgt mittels allgemeiner Superposition und mittels inkrementeller Superposition lt. einem an der TU-Graz entwickelten Berechnungsalgorithmus. Basis für die Berechnungen ist der Produktansatz lt. EN 1992-1-1. Der Vergleich zeigt, dass die normativen Vorhersagemodelle, die im Allgemeinen aus Versuchen zum Druckkriechen abgeleitet wurden, das viskoelastische Verhalten von Beton unter Zug stark überschätzen. Eine verlässliche Prognose der Kriechdehnungen bei Be- und Entlastung ist mittels dieser Modelle nicht möglich. An der TU-Graz wurde aus diesem Grund ein modifizierter Produktansatz formuliert, der das Kriechverhalten des Betons unter Zug besser beschreibt.

Im Bezug auf die Bemessung von gezwängten Bauteilen ist bei der Ermittlung der Zugzwangsspannung besondere Vorsicht geboten. Aufgrund der festgestellten, geringen Kriechfähigkeit des Betons unter Zug relaxiert bis zum Erreichen der Ausgleichstemperatur und im darauffolgenden Nutzungszeitraum nur ein kleinerer Teil der entstandenen Zwangsspannung. Durch die reduzierte Relaxation entstehen bzw. verbleiben höhere Zugspannungen im Bauteil, welche zu einer früheren Überschreitung der Zugfestigkeit des Betons führen können und so die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten von Rissen wesentlich erhöht. Die praxisübliche Bemessung auf Basis der reduzierten Zugspannungen kann zu auf der unsicheren Seite liegenden Ergebnissen führen.

Abstract

The present master's thesis deals with the creep behavior of concrete under tensile stress and its recovery after unloading. Particular attention has been paid to the influence of the stress history on the real creep behaviour under tension. The development of the restraint tensile stresses, as a result of the hydration, affects the cracking risk and the required minimum reinforcement for crack width control of restrained concrete members.

The present experimental study compares the impact of immediately and gradually applied stress on the creep behavior of concrete and its recovery after unloading. In particular, it is of great interest to analyse whether the creep behavior under tension is equal to the behavior under compression. It has to be clarified, if the behaviour of concrete under tension can be captured in a correct way, when material laws and computational models are applied.

During the present master's thesis further experimental studies concerning creep under tension with the help of suspended concrete cylinders were executed. The results of the present study demonstrate that the creep deformation depends essentially on the previous stress history. Although the maximum applied stress level in the specimens was equal, the deformations have been completely different. Furthermore the loading of younger specimen led to smaller creep deformations than in the later loaded one. In case of unloading a similar trend can be observed.

Finally creep deformations of the gradually loaded samples were compared to the general superposition principle and to the incremental superposition principle corresponding to a calculation algorithm by TU-Graz. The recalculation is based on the product type approach by EN 1992-1-1 for creep under compression. The curve shapes of compressive creep deformations strongly overestimate the measured data. As a result of this, the incremental superposition principle of the TU-Graz for creep under tension is based on a modified product type approach.

Respectively to the design of restraint structures the calculation of the decisive restraint stresses, including the consideration of the viskoelasticity of concrete, is of great importance. As a result of the measured low creep capacity under tension, only a small part of the built up stress, resulting from the hydration, can relax. The arising respectively remaining higher tension increases the probability for the appearance of cracks and needs to be considered by the engineer.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Motivation	1
1.2	Gliederung der Arbeit	2
2	Eigenschaften des Betons	3
2.1	Betonverformungen - Gesamt	3
2.2	Spannungsunabhängige Verformungen - Schwinden	3
2.2.1	Autogenes Schwinden	4
2.2.2	Trocknungsschwinden	5
2.3	Spannungsentwicklung im jungen Beton	5
3	Viskoelastisches Materialverhalten	7
3.1	Grundlagen	7
3.2	Physikalische Ursachen	9
3.3	Einflussfaktoren	11
3.4	Kriechtheorien	12
3.4.1	Fließen mit Alterung	12
3.4.2	Summenansatz	13
3.4.3	Produktansatz	14
3.5	Praxisübliche Betrachtung - Verfahren von Trost	15
3.6	Explizite Berücksichtigung des Superpositionsprinzips	16
3.6.1	Allgemeines Superpositionsprinzip	16
3.6.2	Ansatz TU-Graz	17
3.7	Unterscheidung von Druck- und Zugkriechen	21
3.8	Einfluss der Viskoelastizität auf die Spannungsentwicklung im jungen Beton	23
4	Versuchsprogramm	24
4.1	Allgemeines	24
4.2	Versuche zum Einfluss der Belastungshöhe	24
4.3	Versuche zum Einfluss der Belastungsgeschichte	27
4.4	Probenherstellung	29
4.4.1	Versuchskörper	29
4.4.2	Verwendeter Beton	29
4.4.3	Herstellung der Versuchskörper	30
4.5	Versuchsaufbau	32
4.6	Messtechnik	33
4.6.1	Kraftmessung	33

4.6.2	Verformungsmessung	34
4.6.3	Anforderung an das Messsystem	35
5	Ergebnisse und Auswertung der experimentellen Untersuchung	36
5.1	Allgemeines	36
5.2	Serie A	37
5.2.1	Verformung der Versuchskörper unter Last	37
5.2.2	Rückverformung der Versuchskörper nach Entlastung	37
5.3	Serie B	38
5.3.1	Materialeigenschaften der Versuchskörper	38
5.3.2	Raumklima	39
5.3.3	Rückverformung der Versuchskörper nach Entlastung	40
5.4	Serie C	41
5.4.1	Raumklima	41
5.4.2	Verformung der Versuchskörper unter Last	41
5.5	Gegenüberstellung der bisherigen Versuche	42
5.5.1	Spannungsabhängige Verformungen - Belastung	42
5.5.2	Spannungsabhängige Verformungen - Entlastung	45
5.6	Spannungsunabhängige Verformung - Schwinden	46
6	Rechnerische Berücksichtigung der Viskoelastizität bei veränderlicher Spannungsgeschichte	48
6.1	Superpositionsprinzip	48
6.1.1	Berechnung mit allgemeinem Superpositionsprinzip nach EC2	49
6.1.2	Ansatz TU-Graz	50
7	Übertragung der Erkenntnisse auf eine Berechnung der typischen Spannungsgeschichte infolge Betonerhärtung	52
8	Zusammenfassung und Ausblick	55

1 Einleitung

1.1 Motivation

Im Zuge dieser Arbeit werden zwei Aspekte des Zugkriechens untersucht: Einerseits wird das Zugkriechen von Beton bei simuliertem Zwangkraftaufbau mit dem Kriechen bei einstufiger Belastung verglichen. Andererseits wird das viskoelastische Verhalten bei vollständiger Entlastung betrachtet.

Von besonderem Interesse ist dabei die Zwangsspannungsentwicklung von behinderten Systemen. Die bei der Hydratation anfangs freigesetzte Wärme führt zu einer Ausdehnung und somit zu Druckspannungen im Bauteil. Im weiteren Verlauf folgt eine Abkühlung auf die Ausgleichstemperatur und damit einhergehend der Aufbau von Zugspannungen im Beton. Die Größe dieser Zugspannungen ist von wesentlicher Bedeutung für die Rissentstehung und Dauerhaftigkeit des Systems, da ein Überschreiten der Zugfestigkeit des Betons die Tragfähigkeit negativ beeinflussen kann. Von großer Wichtigkeit bei der Entwicklung der Zwangsspannungen ist das viskoelastische Materialverhalten von Beton, auch als Kriechen und Relaxation bezeichnet. Das Kriechen, bzw. im Fall von gezwängten Bauteilen die Relaxation, beeinflusst in hohem Maß die Größe der sich ausbildenden Spannungen und so die Dauerhaftigkeit der Bauteile.

Anhand der Zwangrahmenversuche, welche an der TU-Graz im Zuge der Forschungsarbeit „Mindestbewehrung unter Zwangbeanspruchung“ durchgeführt wurden, konnte festgestellt werden, dass die bei der Erhärtung entstandene Zugspannung im weiteren Zeitverlauf nur in einem geringen Maß durch Relaxation abgebaut wird. Dieses Erkenntnis steht im Widerspruch zum derzeitigen Wissensstand über das viskoelastische Materialverhalten unter Zug. Abb. 1.1 veranschaulicht die Diskrepanz zwischen den gegenwärtig bestehenden Berechnungsmodellen und den Versuchsergebnissen.

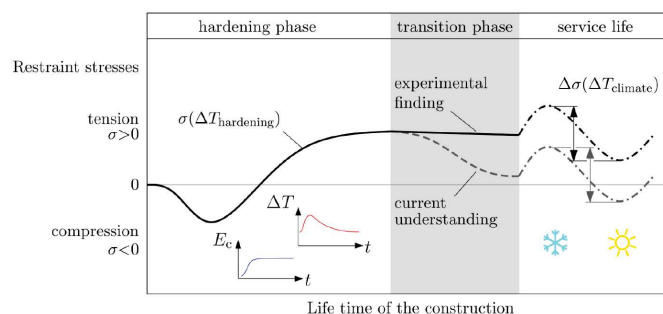


Abb. 1.1: Spannungsgeschichte eines verformungsbehinderten Betonbauteils [12]

Im Rahmen dieser Arbeit wird das Zugkriechen infolge eines simulierten Zwangkraftaufbaues und im Vergleich dazu infolge einer einstufigen Belastung mit gleichem Belastungsniveau

näher untersucht. Es soll festgestellt werden, ob das viskoelastische Verhalten von Beton unter Zug mit den derzeit gültigen Berechnungsmodellen für Druckkriechen verglichen werden kann, und in welcher Weise sich die Belastungsgeschichte auf das Zugkriechen in der Be- und Entlastungsphase auswirkt.

1.2 Gliederung der Arbeit

Die vorliegende Arbeit gliedert sich in acht Teile. Als Erstes ist in Kapitel 1 eine kurze Einleitung zu finden, danach folgen Kapitel 2 und 3, in denen das Verformungsverhalten von Beton zunächst grundlegend gemäß dem Stand der Technik näher erläutert wird. Der Fokus darin liegt auf dem Verformungsbestreben des Betons im Erhärungszeitraum und dessen viskoelastischen Materialeigenschaften.

Im Kapitel 4 erfolgt eine Beschreibung des Versuchsprogramms, welches neben den bisherigen Versuchen auch die experimentelle Untersuchung, welche im Zuge dieser Arbeit durchgeführt wurde, beinhaltet. In den nächsten beiden Kapiteln (Kapitel 5 und 6) folgen die Ergebnisse und die detaillierte Auswertung davon. Die Erkenntnisse aus der vorangegangenen Versuchsauswertung werden abschließend im Kapitel 7 auf die Nachrechnung der Zwangsspannungsentwicklung im Nutzungszeitraum umgelegt.

Den Abschluss der Arbeit bildet das letzte Kapitel (Kapitel 8) mit den wesentlichen Schlussfolgerungen.

2 Eigenschaften des Betons

2.1 Betonverformungen - Gesamt

Die Gesamtverformung des Betons unter einer konstanten Spannung zum Zeitpunkt t setzt sich wie folgt aus mehreren Anteilen zusammen:

$$\varepsilon_{\text{ges}}(t) = \varepsilon_{\text{el}}(t) + \varepsilon_{\text{cc}}(t) + \varepsilon_{\text{cs}}(t) + \varepsilon_{\text{ct}}(t) \quad (2.1)$$

$\varepsilon_{\text{ges}}(t)$	Gesamtverformung
$\varepsilon_{\text{el}}(t)$	spannungsabhängige Anfangsverformung zum Zeitpunkt der Lastaufbringung
$\varepsilon_{\text{cc}}(t)$	Kriechverformung
$\varepsilon_{\text{cs}}(t)$	Schwindverformung
$\varepsilon_{\text{ct}}(t)$	Temperaturdehnung

Der Fokus dieser Arbeit liegt auf dem zeitabhängigen Verhalten des Betons im Erhärungszeitraum. Aufgrund der Tatsache, dass die spannungsab- und spannungsunabhängigen Verformungen in diesem Zeitraum zeitgleich wirken, können Kriechen und Schwinden nicht unabhängig voneinander betrachtet werden. Nur durch diese ganzheitliche Betrachtung kann das Kriechverhalten des Betons richtig verstanden und interpretiert werden. Vor allem beim Zugkriechen wirken die Verkürzungen infolge des Schwindens den Kriechdehnungen entgegen und würden ohne genaue Unterscheidung zu scheinbar keinerlei Verformungen des Bauteils führen.

2.2 Spannungsunabhängige Verformungen - Schwinden

Neben der thermischen Verformung infolge Hydratation und Schwankungen der Umgebungstemperatur stellt die Schwindverformung den zweiten spannungsunabhängigen Anteil an der Gesamtverformung dar. Sie setzt sich aus dem Trocknungsschwinden ε_{cd} und dem autogenen Schwinden ε_{ca} zusammen, welche sich in deren Ursache und Wirkungszeitraum unterscheiden. Der maßgebliche Anteil des autogenen Schwindens tritt bereits im Erhärungszeitraum infolge der stattfindenden Hydratation auf. Hingegen setzt das Trocknungsschwinden erst mit dem Zeitpunkt des Ausschalens bzw. dem Ende der Nachbehandlung t_s ein.

$$\varepsilon_{\text{cs}}(t, t_s) = \varepsilon_{\text{cd}}(t, t_s) + \varepsilon_{\text{ca}}(t) \quad (2.2)$$

2.2.1 Autogenes Schwinden

Das autogene Schwinden verläuft zeitlich parallel zur Hydratation und findet hauptsächlich in den ersten Tagen bzw. Wochen nach Erstarrungsbeginn statt. Da der bei der Hydratation entstehende Zementleim ein kleineres Volumen als seine Ausgangsstoffe einnimmt, kommt es in weiterer Folge zu einem Unterdruck im Porensystem des Zementsteins und einer damit einhergehenden Volumenreduktion des Bauteils. Die Größe der autogenen Schwindverformung hängt maßgeblich von der verwendeten Zementsorte und vom W/Z-Wert der Betonrezeptur ab. Aufgrund dessen ist für normalfesten Beton dieser Wert relativ klein und spielt, wie in Abb. 2.1 zu erkennen ist, erst bei hochfesten Betonen eine wesentliche Rolle. Größe und Verlauf sind normativ in [1] geregelt.

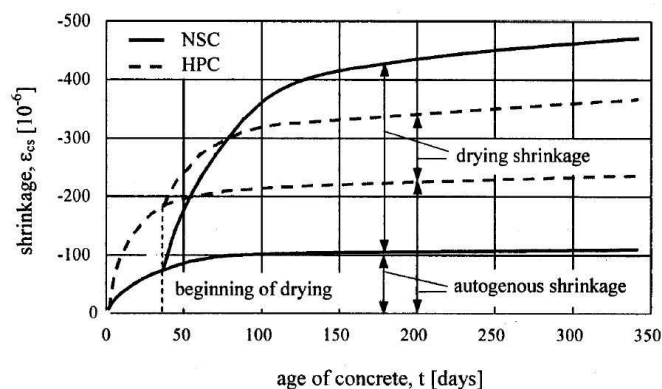


Abb. 2.1: autogenes Schwinden und Trocknungsschwinden in Abhängigkeit des Betonalters für normal- und hochfesten Beton [13]

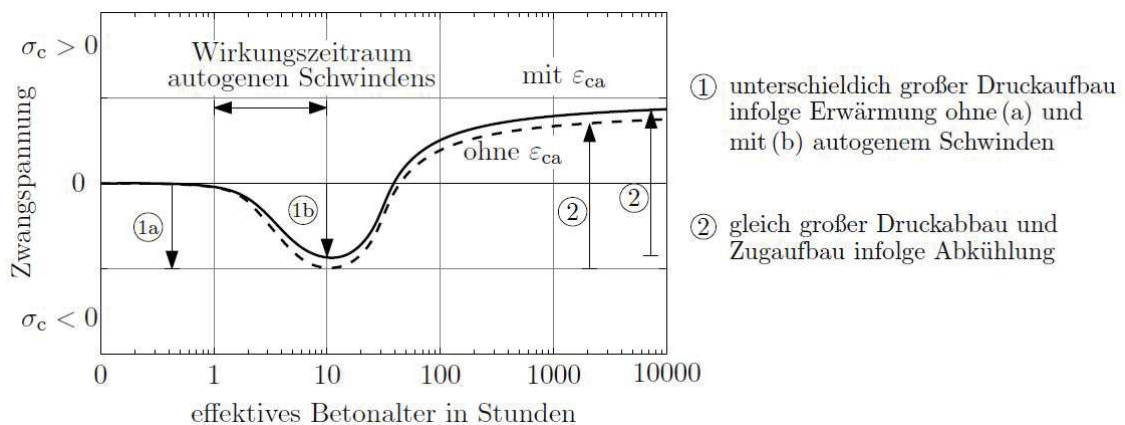


Abb. 2.2: Einfluss des autogenen Schwindens auf den Zwangspannungsaufbau im Erhärungszeitraum [11]

Wie in Abb. 2.2 zu sehen ist, wirkt sich das autogene Schwinden im Erhärungszeitraum beim Aufbau der Zugzwangspannung, eines behinderten Bauteils infolge der Abkühlung, stets negativ auf die Rissgefahr aus.

2.2.2 Trocknungsschwinden

Unter Trocknungsschwinden wird das Verdunsten von chemisch ungebundenem Wasser über die Bauteiloberfläche und einer damit verbundenen Volumenreduktion des Bauteils verstanden. Dieser Vorgang läuft so lange, bis ein Gleichgewicht mit der relativen Luftfeuchte der Umgebung entstanden ist. Das Endschwindmaß ist normativ in [1] geregelt und ist abhängig von der relativen Luftfeuchtigkeit der Umgebung, der Massigkeit des Bauteils und der Festigkeitsklasse des verwendeten Betons. Je massiger ein Bauteil ist, desto weniger kann das Innere des Bauteils austrocknen und desto später wird die Ausgleichsfeuchte erreicht. Für Querschnittsgeometrien des klassischen Hochbaus stellt das Trocknungsschwinden jedoch eine wesentliche Einwirkung während des Nutzungszeitraums dar.

2.3 Spannungsentwicklung im jungen Beton

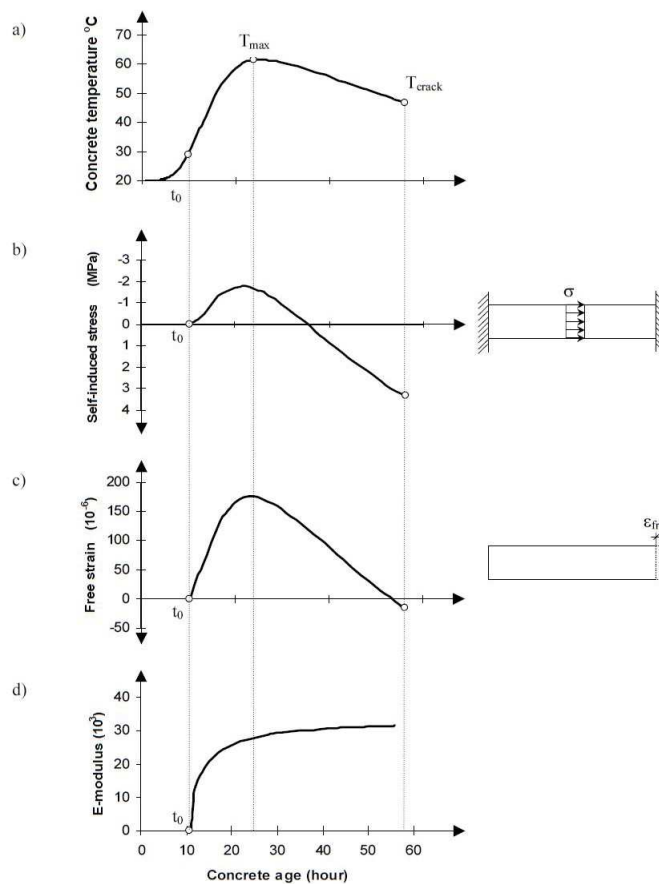


Abb. 2.3: schematische Darstellung der Spannungsentwicklung in jungem Beton [2]

Die Spannungsentwicklung unter teilweise Zwang (in der Baupraxis z.B. bei der Errichtung von Wänden auf bestehenden Bodenplatten) wird wesentlich vom Schwinden und dem viskoelastischen Verhalten von Beton beeinflusst. Bei einem Versuch von [2] wurden die in Abb. 2.3 dargestellten Verläufe von Spannung, Dehnung und E-Modul in Abhängigkeit des Betonalters infolge der Betontemperatur ermittelt.

Bei gezwängten Bauteilen bewirkt die anfängliche Temperaturerhöhung infolge der Hydratation von Zement eine Ausdehnung und damit einhergehend den Aufbau von Druckspannungen. Bei der darauffolgenden Abkühlung auf die Umgebungstemperatur will sich das Bauteil wieder verkürzen, was zu Zugspannungen im Querschnitt führt. Für die korrekte Abschätzung des Spannungsniveaus des Bauteils im Nutzungszeitraum ist eine zeitdiskrete Betrachtung mit expliziter Berücksichtigung der Viskoelastizität von entscheidender Bedeutung und wird später noch genauer erläutert.

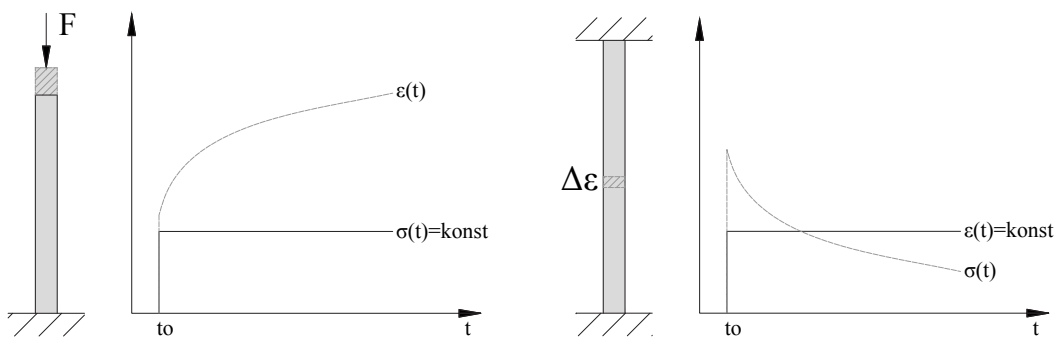
Bei statisch bestimmten Systemen kann sich das Bauteil infolge des Temperaturverlaufs frei verformen ohne etwaige Spannungen aufzubauen.

3 Viskoelastisches Materialverhalten

In diesem Kapitel folgt eine Erklärung des viskoelastischen Verhaltens von Beton und der derzeitigen Modelle für dessen Beschreibung. In diesen Ausführungen wird zunächst nicht explizit zwischen dem viskoelastischen Verhalten unter Druck- oder Zugbeanspruchung unterschieden. Das Zugkriechen von Beton ist im Vergleich zum Druckkriechen noch relativ wenig erforscht, da in der Praxis die Zugbeanspruchung für das Tragverhalten eine eher untergeordnete Rolle spielt. Mit Blick auf die Zwangbeanspruchung existieren allerdings verschiedene Untersuchungen zu diesem Unterschied, worauf im nächsten Kapitel näher eingegangen wird.

3.1 Grundlagen

Neben den spannungsunabhängigen Verformungen treten im Beton auch Verformungen infolge von Belastungen auf. Unter Langzeitbeanspruchung kommt es im Beton neben den sofortigen, elastischen auch zu zeitabhängigen Verformungen, welche ein Vielfaches der elastischen Größe betragen können. Dieses Materialverhalten wird als Viskoelastizität bezeichnet. Im Falle von erhärtetem Beton wird dieses Verhalten in der Tragwerksplanung in der Regel zur Ermittlung der Verformungen und im Spannbetonbau zur Bestimmung des Spannkraftverlustes berücksichtigt. Aber auch bei jungem Beton spielt dieses Verhalten eine wichtige Rolle. Die Berücksichtigung des viskoelastischen Verhaltens für die korrekte Beschreibung des Trag- und Verformungsverhaltens ist daher auch für den frühen Nutzungszeitraum von Betonkonstruktionen von Bedeutung.



(a) Kriechen - Längenänderung unter konstanter Spannung

(b) Relaxation - Spannungsänderung unter konstanter Dehnung

Abb. 3.1: Schematische Darstellung reines Kriechen (totale Verformungsfreiheit) und reine Relaxation (totale Verformungsbehinderung)

Das viskoelastische Materialverhalten wird in der Baupraxis meist in die beiden Grenzfälle des reinen *Kriechens* Abb. 3.1(a) und der reinen *Relaxation* Abb. 3.1(b) unterteilt. Unter reinem Kriechen wird die Verformungsänderung unter einem konstanten Spannungsniveau, mit der Voraussetzung der vollständigen Verformungsfreiheit, verstanden. Dem gegenüber steht die Relaxation, bei der es zu einem Spannungsabbau infolge des Kriechens, unter der Bedingung der vollständigen Verformungsbehinderung, kommt. Im Falle von Zwangsbeanspruchung kann nicht mehr in reines Kriechen oder reine Relaxation unterschieden werden, vielmehr handelt es sich um eine Überlagerung der beiden Grenzfälle.

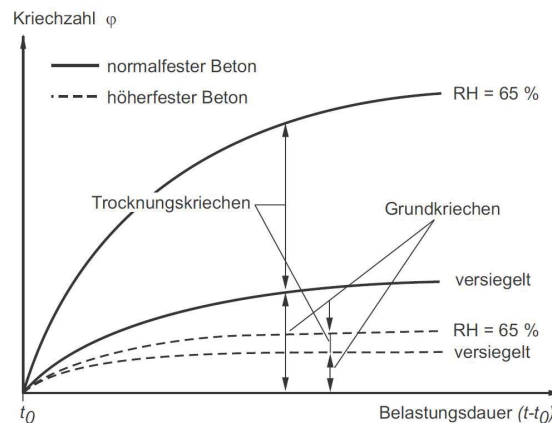


Abb. 3.2: Zusammensetzung der Kriechverformung bei versiegelten und unversiegelten Proben von normal- und hochfestem Beton [17]

Die Kriechdehnung des Betons kann in zwei Komponenten, das *Grundkriechen* und das *Trocknungskriechen*, wie in Abb. 3.2 zu sehen ist, unterteilt werden. Beim Grundkriechen handelt es sich um eine Verformungsänderung infolge einer Belastung, ohne Feuchtigkeitsaustausch mit der Umgebung. Das Trocknungskriechen, auch als „Pickett Effekt“ bezeichnet, ist jene zusätzliche Kriechverformung die infolge der Wasserabgabe an die Umgebung, unter der einwirkenden Last, entsteht. Das Trocknungskriechen ist allerdings getrennt vom Trocknungsschwinden zu sehen.

Die Kriechverformung wird weiters in einen *reversiblen* und einen *irreversiblen* Anteil unterteilt. Nach einer vollständigen Entlastung des Betons stellt sich unmittelbar die elastische Rückverformung, in Abhängigkeit des zu diesem Zeitpunkt erreichten E-Moduls, ein. Die elastische Verformung zum Belastungszeitpunkt ist aufgrund der noch geringen Steifigkeit des Betons kleiner als zum Zeitpunkt der Entlastung, an dem sich der E-Modul infolge der Erhärtung vergrößert hat. Zusätzlich geht ein Teil der Kriechverformung, der auch als *verzögert elastische Rückverformung* oder *Rückkriechen* bezeichnet wird, sukzessive zurück. Der dritte Verformungsanteil ist jedoch irreversibel und auch bekannt als *Fließen*. Diese Verformungen behält das Bauteil selbst nach einer vollständigen Entlastung bei. [7]

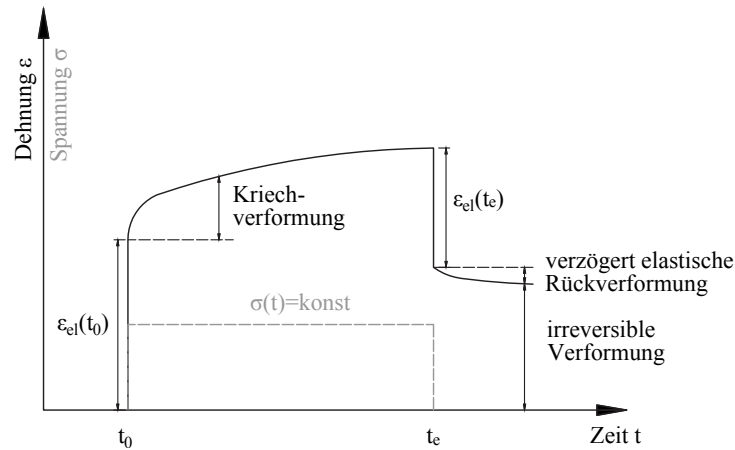


Abb. 3.3: Kriechverformung unter einstufiger Belastung

Ein weiterer Aspekt des Kriechens ist die vom Belastungsniveau abhängige Kriechverformung. Abb. 3.4 bildet die bei hohen Dauerlasten typische Unterteilung des Kriechens in die drei Bereiche *Primärkriechen*, *Sekundärkriechen* und *Tertiärkriechen* ab. Bei Druckbelastungen unterhalb von $<0,3-0,5 f_{cm}$ liegt primäres bzw. lineares Kriechen vor. In diesem Bereich nimmt die Kriechverformung kontinuierlich ab. Wird das Gebrauchslastniveau bzw. das Dauerlastniveau überschritten kommt es im zweiten Bereich zu einer konstanten Dehnungszunahme (auch als sekundäres Kriechen bezeichnet). Beim Tertiärkriechen, ab einer Beanspruchung von ca. $0,85 f_{cm}$, steigt die Kriechdehnung, durch die Bildung von Mikrorissen, überproportional an und führt nach dem Anstieg der Rissbildung schlussendlich zum Bruch. [3]

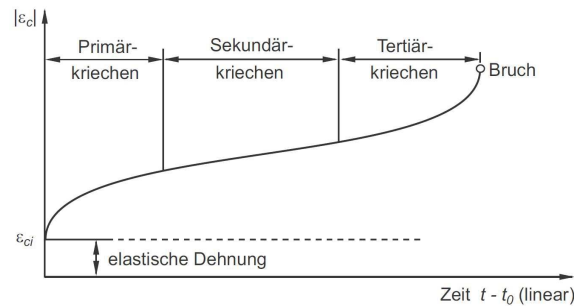


Abb. 3.4: Kriechverformung von Beton unter hoher Dauerlast [17]

3.2 Physikalische Ursachen

Die physikalischen Ursachen für die Viskoelastizität des Betons sind bislang noch nicht vollständig geklärt, doch aufgrund des nahezu elastischen Verformungsverhaltens der Zuschläge werden die Vorgänge in der Zementsteinmatrix als Hauptursache angesehen. Für das Grundkriechen des Betons ist nicht allein ein einziger Mechanismus verantwortlich. Von entscheidender Bedeutung ist jedoch das im Zementstein enthaltene Wasser. Das Phänomen des Kriechens kann demzufolge als ein Zusammenwirken folgender Erscheinungen verstanden werden: [2],[7]

- Viskoses Fließen zwischen den Gelpartikeln des Zementsteins verursacht durch Gleit- und Abschervorgänge,
- Konsolidierung durch Verdunstung und Umlagerung des Porenwassers unter Spannung,
- Verzögerung der elastische Verformung der Zuschlagstoffe infolge der Verformungsbinderung durch den Zementleim,
- Mikrorissbildung

In neueren Forschungsarbeiten wird die Hauptursache, wenn auch nicht die alleinige Ursache, für das Grundkriechen unter Zug in der Mikrorissbildung vermutet. Anhand dieses Mechanismus kann auch der Unterschied zwischen Druck- und Zugkriechen abgeleitet werden.

Das Phänomen der Mikrorissbildung erklären Rossi und Ranaivomanana wie folgt: [10],[9] Im Allgemeinen kann es bereits im unbelasteten Beton, durch unterschiedliches Verformungsverhalten der einzelnen Komponenten oder infolge einer Belastung, zur Mikrorissbildung in der Struktur kommen. Das Wasser und der Wasserdampf aus dem umliegenden Material wird zum Riss geleitet und führt dort zu zusätzlichen Schwinden oder bei Kontakt mit noch unhydratisiertem Zement zur Reaktion und damit zur Selbstheilung. Der Prozess wird in zwei Phasen unterteilt:

1. Anfang der Mikrorissbildung:

Nachdem beim Aufbringen der Belastung bereits Risse im Gefüge entstanden sind, kommt es dort aufgrund der vermehrten Austrocknung zu zusätzlichen Schwindverformungen. Das Bestreben des Betons, sich infolge der Austrocknung zu verformen, führt zu zusätzlichen Spannungen in der Umgebung des Risses, welche durch die starren Zuschlagstoffe behindert werden und dadurch Zugspannungen im Zementstein hervorrufen. Der neue Spannungszustand bewirkt in weiterer Folge wieder vermehrtes Schwinden und damit einhergehend die Generation neuer Risse.

2. Fortpflanzung der Mikrorissbildung:

Die Barenblatt Theorie basiert auf der Bruchmechanik für spröde Materialien. Lt. dieser Theorie existieren am Rissende zwei entgegengesetzt wirkende Kräfte. Eine resultiert aus der äußeren Belastung (Kriechlast), und führt zur Zugspannungskonzentration am Rissende. Die Größe dieser Kraft ist abhängig von der Länge des Risses und der einwirkenden Last. In die entgegengesetzte Richtung wirken Kohäsionskräfte F , welche an den gegenüberliegenden Flächen des Rissendes für Zusammenhalt sorgen. Der Wirkungsbereich d dieser Kraft beschränkt sich auf $d \ll L$, wobei L die Risslänge ist.

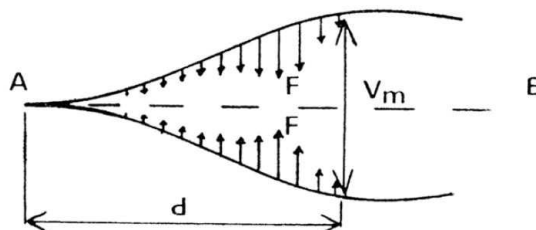


Abb. 3.5: Kohäsionskräfte am Rissende (nach Barenblatt theory) [10]

Würden diese beiden Kräfte gleich groß sein, würde es kein Risswachstum geben. Bei einer konstanten Kriechlast würde sich theoretisch irgendwann ein Gleichgewicht einstellen und die Rissbildung beenden. Die anfangs beschriebene, zum Riss geleitete, Feuchtigkeit vermindert jedoch die Wirkungsweise der Kohäsionskräfte im Riss. Das führt dazu, dass die Kraft infolge der Kriechlast größer ist, und so das Risswachstum voranschreiten lässt.

3.3 Einflussfaktoren

Das viskoelastische Verhalten wird von einer Reihe von Faktoren beeinflusst, die häufig in innere und äußere Einflussparameter unterschieden werden. Als innere Faktoren werden die Eigenschaften des Betons verstanden, so wie Zusammensetzung, Art und Eigenschaften der Zuschläge, Zementart und W/Z-Wert. Zu den äußeren Einflussfaktoren gehören zum Beispiel Relative Luftfeuchtigkeit, Umgebungstemperatur, das Spannungsniveau, das Alter des Betons bei Belastungsbeginn und die Bauteilgeometrie. Diese Parameter haben für die Druck- als auch für die Zugseite Gültigkeit, wenn auch nicht im gleichen Verhältnis, Größe und Anteil. [2],[5]

- Alter des Betons bei Belastung
Das viskoelastische Verhalten ist bei jungem Beton stärker ausgeprägt als bei höherem Alter. Mit fortschreitender Hydratation nimmt die Viskoelastizität ab, was bedeutet, dass die Kriechverformung mit zunehmendem Alter kleiner wird.
- Relative Luftfeuchtigkeit
Die relative Luftfeuchtigkeit der Umgebung steht im direkten Bezug zum Trocknungskriechen. Bei einer niedrigen relativen Luftfeuchtigkeit wird das Austrocknen der Betonoberfläche beschleunigt, was wiederum zu einer vergrößerten Kriechverformung führt. Durch Versiegeln der Oberfläche eines Bauteils kann dieser Effekt stark reduziert werden. Die verbleibende Verformung ergibt sich dann beinahe ausschließlich aus dem Grundkriechen.
- Temperatur
In der Berechnung lt. [1] wird von einer Umgebungstemperatur von etwa 20°C ausgegangen. Bei jungem Beton hat die Temperatur einen ambivalenten Einfluss auf die Kriechverformung. Während das viskoelastische Verhalten bei erhöhten Temperaturen ausgeprägter ist, bewirkt die beschleunigte Entwicklung der Festigkeit, infolge der höheren Temperatur, eine altersabhängige Abnahme der Kriechfähigkeit. Gutsch hat in seinen Versuchen gezeigt, dass die temperaturabhängige, vergrößerte Kriechdehnung der altersabhängigen Abnahme der Kriechverformung überwiegt. [5]
- Wasser/Zement-Wert
Der W/Z-Wert steht in direktem Bezug zur Festigkeit und Steifigkeit des Betons. Die Verringerung des W/Z-Wertes führt zu einer höheren Betonfestigkeit und einem höheren E-Modul was zur Folge hat, dass die Kriechdehnungen abnehmen.
- Zuschlagstoffe
Die Steifigkeit der Zuschlagstoffe beeinflusst wesentlich die Kriechverformung des Bauteils. Zuschlagkörner mit einem hohen E-Modul behindern den Zementstein in seinem Kriechbestreben mehr als jene mit einem Niedrigen, und mindern dadurch die Kriechverformung.

- Bauteilgeometrie
Im Allgemeinen nimmt die Kriechverformung mit zunehmendem Bauteilvolumen ab. Die Ursache dafür liegt in der langsameren Austrocknung des Bauteils, aufgrund der kleineren Oberfläche im Verhältnis zum Volumen des Körpers. Das Wasser im Inneren des Körpers kann nur sehr langsam nach Außen diffundieren und wirkt sich so vermindern auf das Trocknungskriechen aus. Bei versiegelten Körpern spielt dieser Effekt eine untergeordnete Rolle.
- Spannungsniveau
Wie bereits in Abs. 3.1 erwähnt wurde, steigt die Kriechverformung mit zunehmender Belastung an.
- Spannungsgeschichte
Auf den Einfluss der Be- und Entlastungsgeschichte auf das viskoelastische Verhalten von Beton wird in den folgenden Kapiteln näher eingegangen.

3.4 Kriechtheorien

Um die zeitliche Entwicklung des Kriechen beschreiben zu können, wurden verschiedene Theorien entwickelt. Gutsch unterscheidet in [5] zwischen drei unterschiedlichen Kriechtheorien:

- Fließen mit Alterung
- Summenansatz
- Produktansatz

3.4.1 Fließen mit Alterung

Der Begriff „Fließen“ beschreibt das plastische Materialverhalten. Darunter wird die Dehnungszunahme bei einer konstanten Spannung verstanden. Beim „Fließen mit Alterung“ dient die Kriechkurve vom frühest möglichen Belastungszeitpunkt (auch unter WHITNEY'scher Idealkurve bekannt) als Basis für die Berechnung der Kriechkurven von einem späteren Belastungsalter. Diese ergeben sich durch verschieben der Idealkurve normal zur Zeitachse und werden wie folgt berechnet:

$$\varphi(t, t_1) = \varphi(t, t_0) - \varphi(t_1, t_0) \quad (3.1)$$

Mithilfe dieses Ansatzes kann die Abnahme der Kriechverformung bei zunehmendem Erstbelastungsalter gut abgebildet werden. Der Effekt des raschen Anstiegs der Kriechverformung bei der Belastung von altem Beton bleibt hier jedoch unberücksichtigt. In Abb. 3.6 ist der Unterschied zwischen der Theorie „Fließen mit Alterung“ und den tatsächlichen Kriechkurven eines viskoelastischen, alternden Materials wie Beton zu sehen. [5],[17]

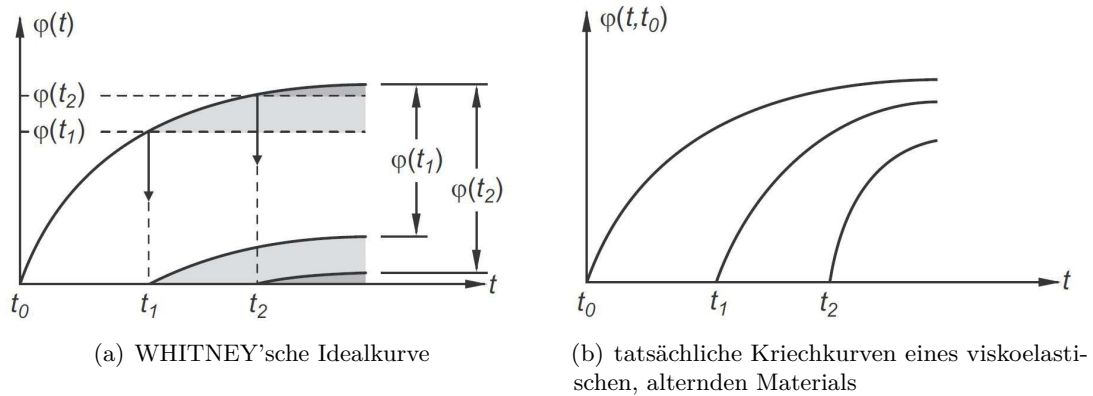


Abb. 3.6: Vergleich Theorie „Fließen mit Alterung“ mit realem Materialverhalten [17]

Im Laufe der Jahre wurde erkannt, dass dieser Ansatz des reinen, irreversiblen Fließens, auf das Betonkriechen nicht zutrifft. Forschungsarbeiten haben gezeigt, dass bei einer Entlastung die Kriechverformung teilweise zurückgeht. [8]

3.4.2 Summenansatz

Die Erkenntnis, dass sich das Kriechen aus reversiblen und irreversiblen Verformungsanteilen zusammensetzt, hat zum Summenansatz geführt. Die Kriechdehnung wird hier in einen verzögert, elastischen Anteil $\varphi_v(t - t_1)$ und in irreversibles Fließen $\varphi_f(t - t_1)$ unterteilt. [5]

$$\varphi(t, t_1) = \varphi_v(t - t_1) + \varphi_f(t - t_1) \quad (3.2)$$

Bei der gleichzeitig wirkenden Austrocknung des Körpers während der Belastung kommt es zu größeren Kriechverformungen. Um diesen Effekt in der Berechnung zu berücksichtigen, wurde der irreversible Fließanteil in *Grundfließen* $\varphi_{f,gr}(t - t_1)$ und *Trocknungsfließen* $\varphi_{f,tr}(t - t_1)$ unterteilt. Darüber hinaus wurden die direkt nach Belastungsbeginn auftretenden schnellen, irreversiblen Anfangsverformungen mit dem Term des *Anfangsfließens* $\varphi_{f,a}(t - t_1)$ berücksichtigt. Durch die Ergänzung dieser drei Faktoren ergibt sich die Kriechfunktion nach [5] zu:

$$\varphi(t, t_1) = \varphi_v(t - t_1) + \varphi_{f,a}(t - t_1) + \varphi_{f,gr}(t - t_1) + \varphi_{f,tr}(t - t_1) \quad (3.3)$$

Im Allgemeinen beschreibt der Summenansatz das Verformungsverhalten unter Entlastung am Besten.

3.4.3 Produktansatz

Die Funktion des Produktansatzes zur Beschreibung des Kriechens setzt sich aus einer altersunabhängigen Zeitfunktion $f(t - t_1)$ und einem werkstoffabhängigen Alterungsfaktor $k_i \leq 1$ zusammen.

$$\varphi(t, t_1) = k_i \cdot f(t - t_1) \quad (3.4)$$

Im Fall der *verzögerten Elastizität* ist der Alterungsfaktor k_i ein konstanter Wert, der dazu führt, dass der Kriechverlauf vom Belastungszeitpunkt t_1 unabhängig ist und die Kurven identisch sind. Abb. 3.7(a) zeigt diesen Sonderfall des affinen Kriechens. In der Realität stimmt diese Annahme jedoch nicht. Um die Verringerung des Kriechens mit zunehmendem Erstbelastungsalter zu berücksichtigen, wird der Faktor k_i durch einen vom Belastungsalter t_1 abhängigen Term $k_i = f(t_1)$ ersetzt. Die altersabhängigen Kriechkurven, welche in Abb. 3.7(b) zu sehen sind, zeigen nun affine Verläufe, weshalb dieser Fall als *affines Kriechen* bezeichnet wird. [5]

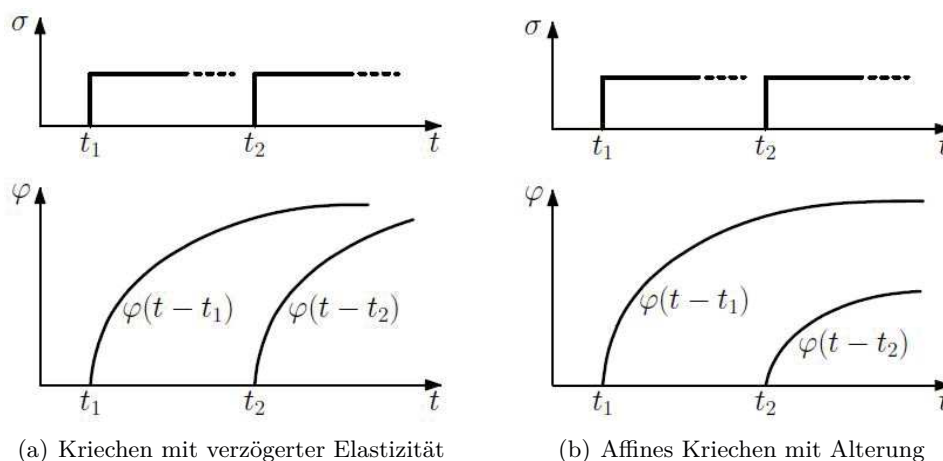


Abb. 3.7: Produktansatz [5]

Im Vergleich zum Summenansatz werden die Einflussfaktoren wie Erstbelastungsalter, Betonrezeptur, Temperatur und Feuchtigkeit direkt durch den Alterungsfaktor berücksichtigt. Im Allgemeinen wird dadurch die Bestimmung der Kriechzahl erleichtert. Aus diesem Grund beruht die Berechnungsmethode lt. EN-1992-1-1 [1] ebenfalls auf dem Produktansatz.

Ein wesentlicher Nachteil dieser Funktion zeigt sich jedoch im Fall der Entlastung. Wenn bei einer Vollentlastung die Verformungen mittels allgemeinem Superpositionsprinzip (negativer Spannungssprung) berechnet wird, kann unter Verwendung des Produktansatzes die Kriechverformung wieder ansteigen, was sich beim Vergleich mit Versuchsergebnissen als unrealistisch erweist. Der Einfluss dieses Fehlers wird umso größer, je früher der Beton belastet wird und je kürzer die Beanspruchung wirkt. [5] Schlicke stellt in [11] einen neuen modifizierten Produktansatz zur Lösung dieses Problems vor. Darauf wird in Abs. 6.1.2 genauer eingegangen.

3.5 Praxisübliche Betrachtung - Verfahren von Trost

Kriechen und Relaxation sind viskoelastische Werkstoffeigenschaften, welche sich durch die Einwirkungsart (Spannung oder Dehnung) unterscheiden. Aufgrund dessen wird gefordert, dass die beiden Eigenschaften ineinander überführt werden können. Da in der Vergangenheit bevorzugt Versuche zum Kriechen gemacht wurden, aber in der Praxis auch Relaxationsprobleme auftreten, wurden Verfahren entwickelt um mit bekannten Kriechfunktionen auf die Relaxation schließen zu können. [5] Eine in der Praxis häufig angewendete Methode zur Bestimmung des Bauteilverhaltens unter Berücksichtigung der Viskoelastizität stellt das Verfahren von Trost dar. [15]

Der Einfluss der Relaxation auf das Kriechen wird hier durch den *Relaxationsbeiwert* ρ berücksichtigt. Trost stellt mit Hilfe dieses Beiwertes eine vereinfachte algebraische Form des Superpositionsgesetzes auf (Glg. (3.5)). In diesem Fall entfällt die aufwändige Integration zur Bestimmung der Kriechverformung (siehe Glg. (3.9)) und die Gleichung ergibt sich für den Belastungszeitpunkt t_0 und den Betrachtungszeitpunkt t_k zu:

$$\varepsilon(t_k, t_0) = \frac{\sigma(t_0)}{E_{28}} \cdot [1 + \varphi(t_k, t_0)] + \frac{\sigma(t_k) - \sigma(t_0)}{E_{28}} \cdot [1 + \rho(t_k, t_0) \cdot \varphi(t_k, t_0)] + \varepsilon_s(t) \quad (3.5)$$

Die Implementierung der Kriechverformung erfolgt über eine Modifikation des E-Moduls wie folgt:

$$E_{c,\text{eff}} = \frac{E_{28}}{1 + \rho(t_k, t_0) \cdot \varphi(t_k, t_0)} \quad (3.6)$$

Gemäß Trost darf der E-Modul als konstante Größe (Mittelwert) angenommen werden, vor allem wenn die Belastung des Betons in späterem Alter erfolgt. Der Relaxationsbeiwert ρ (auch *Alterungsbeiwert* genannt) berücksichtigt den Einfluss des Alters auf die Kriechfähigkeit und auf das damit einhergehende Endkriechmaß von späteren Belastungsstufen. Lt. [5] liegt der Wert im Bereich von $0,55 \leq \rho(t_k, t_0) \leq 1,0$. Vereinfachend wird in der Praxis jedoch für stetig veränderliche Spannungen $\rho = 0,8$ angenommen.

Bei teilweise behinderten Bauteilen hängt der Relaxationsbeiwert maßgeblich vom Behinderungsgrad a ab, welcher wiederum an die Steifigkeitsentwicklung des Betons gebunden ist. Um die viskoelastischen Effekte bei zwangbeanspruchten Systemen realistisch abbilden zu können, bedarf es einer steifigkeitsabhängigen Vorgehensweise. Für die zeitdiskrete Betrachtung von behinderten Systemen ist die Anwendung eines konstanten Relaxationsbeiwertes (durchschnittlicher Wert über die einzelnen Spannungsstufen) jedoch ungeeignet. [11]

$$\rho(t_k, t_0) = \frac{\int_{t_i=t_0}^{t_k} \frac{d\sigma(t_i)}{dt_i} \cdot \varphi(t_k, t_i) dt_i}{[\sigma(t_k) - \sigma(t_0)] \cdot \varphi(t_k, t_0)} = \frac{\sum_{t_i=0}^{t_i \rightarrow \infty} \Delta\sigma(t_i) \cdot \varphi(t_k, t_i)}{\sigma(t_k, t_0) \cdot \varphi(t_k, t_0)} \leq 1,0 \quad (3.7)$$

Der Zusammenhang von Relaxation und Kriechen bei gezwängten, sich gegenseitig behindernden Systemen führt mit der praxisüblichen Modifikation des Elastizitätsmoduls (siehe Glg. (3.6)) durch den Relaxationsbeiwert, zu einem verfälschten Behinderungsgrad. Dadurch ist es nicht mehr möglich, die Zwängungssituation angemessen darzustellen.

3.6 Explizite Berücksichtigung des Superpositionsprinzips

In Abs. 3.5 wurde bereits erwähnt, dass die beiden Werkstoffeigenschaften Kriechen und Relaxation mittels geeigneter Verfahren ineinander überführt werden können. Eine in der Praxis weniger übliche Vorgehensweise zur Bestimmung des Bauteilverhaltens unter Berücksichtigung der Viskoelastizität stellt die explizite Berücksichtigung des Superpositionsprinzips dar. Wie zuvor bereits erwähnt, bedarf es dafür aufwändiger Überlagerungen der Verformungen infolge der einzelnen Belastungsstufen. Nach der anfänglichen isolierten Betrachtung des Kriechens der einzelnen Laststufen, werden diese für die Ermittlung der Gesamtverformung aufaddiert.

3.6.1 Allgemeines Superpositionsprinzip

Mit dem *Boltzmann*'schen Superpositionsprinzip kann die Dehnung bei einwirkender Spannungsgeschichte bzw. die Spannung bei einwirkender Dehnungsgeschichte inklusive der viskoelastischen Effekte des Betons bestimmt werden. Durch die Aufsummation der Anfangsspannung $\sigma(t_0)$ und den, zu unterschiedlichen Belastungszeitpunkten t_i einwirkenden, Spannungssprüngen $\Delta\sigma(t_i)$ ergibt sich für die vorhandene Spannungsgeschichte die daraus resultierende Dehnungsgeschichte des Systems. Die Grundlage für die Berechnung der Kriechverformung kann der Produktansatz lt. EN-1992-1-1 [1] bilden. Voraussetzung für die Gültigkeit des Superpositionsprinzips ist der lineare Zusammenhang zwischen Dehnung und Spannung. Wenn es sich bei der Spannungsgeschichte um eine stetig veränderliche Beanspruchung handelt, wird der Summenausdruck zum Integral über den gesamten Betrachtungszeitraum.[17],[5]

$$\varepsilon(t_k, t_i) = \frac{\sigma(t_0)}{E(t_0)} \cdot [1 + \varphi(t_k, t_0)] + \sum_{i=1}^n \frac{\Delta\sigma(t_i)}{E(t_i)} \cdot [1 + \varphi(t_k, t_i)] \quad (3.8)$$

$$\varepsilon(t_k, t_i) = \frac{\sigma(t_0)}{E(t_0)} \cdot [1 + \varphi(t_k, t_0)] + \int_{t_1}^{t_k} \frac{d\sigma(t_i)}{dt_i} \cdot \frac{1}{E(t_i)} \cdot [1 + \varphi(t_k, t_i)] dt_i \quad (3.9)$$

In Abb. 3.8 ist der schematische Ablauf des Boltzmann'schen Superpositionsprinzips dargestellt. Neben der elastischen Anfangsverformung $\Delta\varepsilon_{el}(t_i)$ besitzt jeder von außen einwirkende Spannungssprung ein eigenes viskoelastisches Potential, welches sich über die Zeit entwickelt. Der Verformungsverlauf ist abhängig vom Belastungszeitpunkt und dem zu diesem Zeitpunkt vorherrschenden Elastizitätsmodul.

Bei der Entlastung wird die Spannungsgeschichte durch Spannungssprünge mit einem negativen Vorzeichen, welche wiederum ein viskoelastisches Potential aufweisen, berücksichtigt. Eine Belastung in die entgegengesetzte Richtung ruft in weiterer Folge also wieder Kriechverformungen hervor.

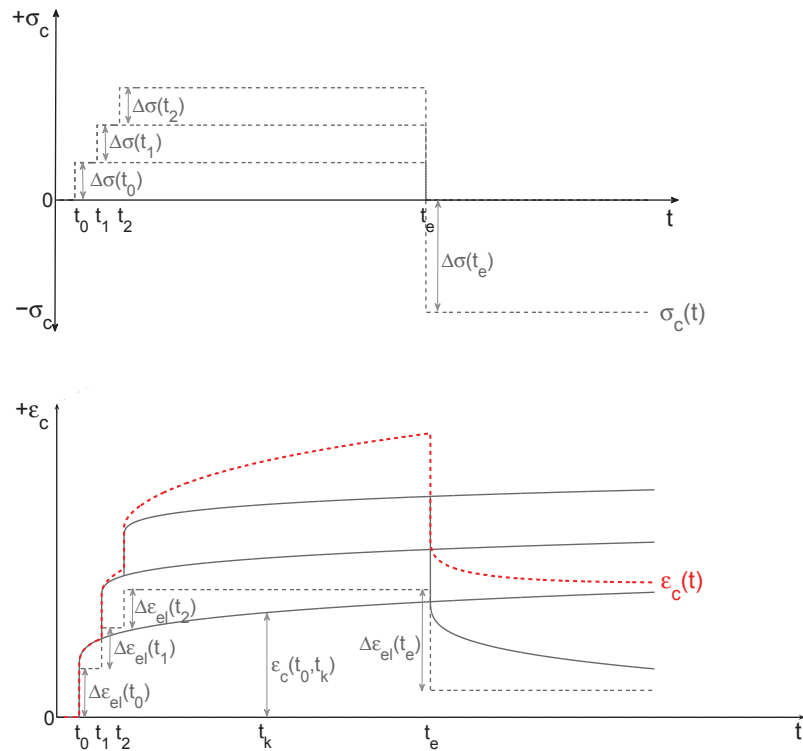


Abb. 3.8: Allgemeines Superpositionsprinzip (Dehnungsantwort infolge einwirkender Spannungsgeschichte)

3.6.2 Ansatz TU-Graz

Beim *Ansatz der TU-Graz* [11] handelt es sich um eine inkrementelle Superposition der viskoelastischen Zusatzverformungen auf Basis eines modifizierten Produktansatzes gemäß EN-1992-1-1 [1]. Dieser verformungsbasierte Ansatz bildet die Größe der Zusatzverformungen, in Abhängigkeit des Erhärtungszustandes und der bis zu diesem Zeitpunkt eingebrachten Spannungen, zeitdiskret ab. Neben der Alterung des Betons findet hier auch die Änderung der Systemspannung, in Abhängigkeit des Behinderungsgrades, Berücksichtigung.

Im Falle von Belastung superponiert dieser Ansatz zunächst die viskoelastische Zusatzverformungen infolge einer Belastungsgeschichte. Im Falle einer Entlastung haben die verminderten Verformungseinwirkungen jedoch kein eigenes viskoelastisches Potential, sondern führen zu einer Reduktion der bis dorthin wirkenden viskoelastischen Zusatzverformungen.

Ein Spannungszinkrement ruft im Beton das viskoelastische Materialverhalten hervor und führt in diesem Fall zur Kriechverformung. Die Berechnung der viskoelastischen Gesamtverformung zum Zeitpunkt t_∞ kann für jeden beliebigen Belastungszeitpunkt t_i wie folgt bestimmt werden:

$$\varepsilon_{cc,\infty}(t_k, t_i) = \frac{\Delta\sigma(t_i)}{E_c(t_i)} \cdot \varphi_\infty(t_k) \quad (3.10)$$

$\varphi_\infty(t_i)$ Endkriechzahl für den Belastungszeitpunkt t_i

Die Endkriechzahl stellt das Verhältnis der elastischen Anfangsverformung zur viskoelastischen Zusatzverformung dar. Da in [1] die Endkriechzahl vom Elastizitätsmodul nach 28 Tagen abhängig ist, ist es erforderlich diese auf den Elastizitätsmodul des Belastungszeitpunktes t_i umzurechnen.

$$\varphi_\infty(t_i) = \varphi_{\infty,EC28}(t_i) \cdot \frac{E_c(t_i)}{E_{c,28}} \quad (3.11)$$

$\varphi_{\infty,EC28}(t_i)$ Endkriechzahl bezogen auf den Elastizitätsmodul nach 28 Tagen

Bei einer einstufigen Belastung $\Delta\sigma_c$ mit dem Belastungsbeginn t_i lässt sich der Verlauf der Kriechdehnung zu einem beliebigen Betrachtungszeitpunkt t_k mit der folgenden Gleichung berechnen:

$$\varepsilon_{cc}(t_k, t_i) = \frac{\Delta\sigma(t_i)}{E_c(t_i)} \cdot \varphi_{c,\infty}(t_k) \cdot \beta_c(t_k, t_i) \quad (3.12)$$

Aus der elastischen Anfangsverformung wird mittels der Endkriechzahl $\varphi_{c,\infty}(t_k)$ und dem Zeitbeiwert $\beta_c(t_k, t_i)$, der zur Berücksichtigung der zeitlichen Entwicklung dient, die gesuchte Kriechdehnung im betrachteten Zeitschritt berechnet. In der Praxis tritt der Fall der sprunghaften Spannungseinwirkung eher selten auf. Meist handelt es sich um kontinuierlich auftretende Spannungsänderungen, welche schrittweise auf den Körper einwirken.

Für die zeitdiskrete Darstellung der Verformung infolge einer mehrstufigen Spannungsgeschichte werden, wie schon bei der allgemeinen Superposition, die einzelnen Belastungsschritte gesondert betrachtet und im Anschluss daran superponiert. Die Formel zur inkrementellen Ermittlung der Kriechdehnung, für einen Zeitschritt $t_k - t_{k-1}$, lautet wie folgt:

$$\Delta\varepsilon_{cc}(t_k - t_{k-1}, t_i) = \frac{\Delta\sigma_c(t_i)}{E_c(t_i)} \cdot \Delta\varphi_c(t_k - t_{k-1}, t_i) \quad (3.13)$$

Das Kriechzahlinkrement $\Delta\varphi_c(t_k - t_{k-1}, t_i)$ ergibt sich aus der schrittweisen Berechnung des Zeitbeiwertes $\beta_c(t_k, t_i)$ zu:

$$\Delta\varphi_c(t_k - t_{k-1}, t_i) = \varphi_{c,\infty}(t_i) \cdot [\beta_c(t_k, t_i) - \beta_c(t_{k-1}, t_i)] \quad (3.14)$$

Die Größe der Kriechzahlinkremente ist abhängig vom Zeitpunkt an dem die Spannungsänderung auf den Körper einwirkt und der Schrittweite. Da sie von der Spannungsgröße unabhängig sind, können sie zwischen den einzelnen Zeitschritten verglichen werden.

Im Fall der reinen Belastung, haben alle Spannungszinkremente das gleiche Vorzeichen und jeweils ein eigenes viskoelastisches Potential, welches sich über die Zeit entwickelt. Ab dem Zeitpunkt, an dem der Körper keine äußere Spannungsänderung mehr erfährt, nimmt das viskoelastische Verformungspotential der bereits wirkenden Spannungszinkremente über die Zeit ab.

Aus der inkrementellen Kriechdehnung und der zum jeweiligen Spannungssprung gehörigen elastischen Verformung kann durch Aufsummation die Gesamtverformung des Systems berechnet werden:

$$\varepsilon_c(t_n) = \sum_{i=0}^{n-1} \left[\Delta\varepsilon_c(t_i) + \sum_{k=i+1}^n \Delta\varepsilon_{cc}(t_k - t_{k-1}, t_i) \right] \quad (3.15)$$

In Abb. 3.9 ist der Verformungsverlauf aus Glg. (3.15) schematisch dargestellt. Zu den Belastungszeitpunkten $t_1 - t_3$ erfährt das Betonelement jeweils eine von außen einwirkende Spannungsänderung. Zu jedem Spannungssprung ist das zugehörige viskoelastische Potential abgebildet und in weiterer Folge durch Superposition zur Gesamtverformung überlagert.

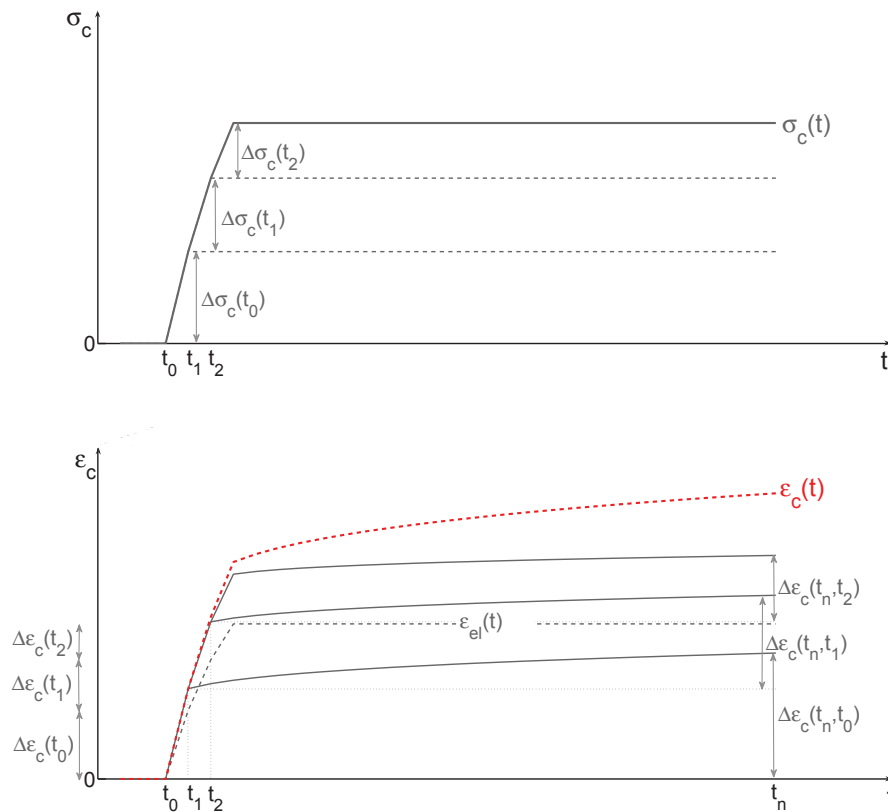


Abb. 3.9: Superpositionsprinzip mit dem Ansatz der TU-Graz (Dehnungsantwort infolge einwirkender Spannungsgeschichte)

Hinsichtlich der Entlastung wurde bereits erwähnt, dass das reduzierend wirkende Spannungszinkrement im Modell TU-Graz kein eigenes viskoelastisches Potential besitzt sondern lediglich die bereits wirkenden Verformungspotentiale verringert. Der Grundgedanke ist

jener, dass ein physikalisches System immer bestrebt ist seinen energetisch günstigsten Zustand einzunehmen. Der energetisch günstigste Zustand wäre schlussendlich ein spannungsfreies System. Die Vorgehensweise bei der Reduktion der bestehenden viskoelastischen Potentiale kann allerdings auf unterschiedliche Arten erfolgen. Heinrich erläutert in seiner Arbeit [6] die genauen Hintergründe dieser Überlegung. Letztendlich wurde in [6] gezeigt, dass die betragsmäßig gleiche Reduktion aller bis zu diesem Zeitpunkt vorhandenen viskoelastischen Potentiale eine ausreichend genaue Lösung bietet. Bei n vorhandenen viskoelastischen Potentiale erfolgt die Abminderung je nach Wirkungsrichtung dann wie folgt:

$$\Delta\sigma_c(t_k) > 0: \quad \varepsilon_{cc,\infty}(t_{k+1}, t_i) = \max \left\{ \varepsilon_{cc,\infty}(t_k, t_i) - \frac{\Delta\sigma_c(t_k)}{n \cdot E_c(t_k)}; 0 \right\} \quad (3.16)$$

$$\Delta\sigma_c(t_k) < 0: \quad \varepsilon_{cc,\infty}(t_{k+1}, t_i) = \min \left\{ \varepsilon_{cc,\infty}(t_k, t_i) - \frac{\Delta\sigma_c(t_k)}{n \cdot E_c(t_k)}; 0 \right\} \quad (3.17)$$

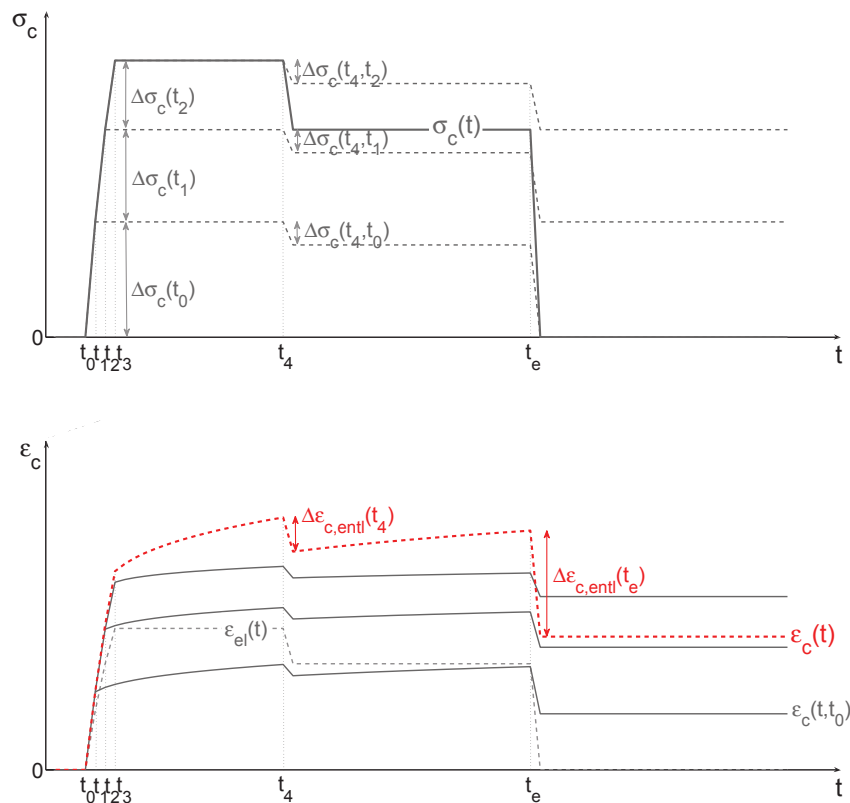


Abb. 3.10: Dehnungsantwort infolge zu- und abnehmender Spannungsgeschichte

In Abb. 3.10 ist schematisch die Verformungsgeschichte infolge einer einer Spannungsgeschichte mit zu- und abnehmenden Anteilen dargestellt. Zu den Zeitschritten $t_0 - t_2$ ist der Körper einer zunehmenden Belastung ausgesetzt. Ab t_3 kommen keinerlei äußere Beanspruchungen hinzu. In dieser Zeit stellen sich die viskoelastischen Verformungen infolge

der äußeren Einwirkung ein. Zum Zeitpunkt t_4 erfährt der Körper eine teilweise Entlastung, was dazu führt, dass sich im weiteren Verlauf wieder Kriechverformungen einstellen, diese jedoch aufgrund des verringerten viskoelastischen Potentials kleiner sind als im ersten Bereich. Erst infolge der vollständigen Entlastung zum Zeitpunkt t_e hat der Körper den energetisch günstigsten Zustand erreicht, d.h. er besitzt kein viskoelastisches Potential mehr mit dem sich weitere Kriechverformungen einstellen könnten. Im Gegensatz zum allgemeinen Superpositionsprinzip kommt es hier zu keiner Rückverformung.

3.7 Unterscheidung von Druck- und Zugkriechen

In Literatur ist das Kriechen infolge von Zugbelastung noch relativ wenig untersucht. Für die Unterscheidung von Zug- und Druckkriechen existieren jedoch bereits einige Studien, doch aufgrund der Komplexität des Kriechens hat sich noch keine einheitliche Feststellung über das viskoelastische Materialverhalten durchgesetzt. Der ausgeprägte Einfluss des Belastungsalters, der Umgebungstemperatur und des W/Z-Wertes ist sowohl im Druck- als auch im Zugkriechen offensichtlich. Während bei einer Temperatur von mehr als 20°C und der Belastung im jungen Alter die Kriechverformungen zunehmen, geschieht bei einem abnehmenden W/Z-Wert genau das Gegenteil. [2]

Atrushi [2] und Delsaute [3] haben bei ihren Versuchen mit unterschiedlichen Belastungsalter festgestellt, dass das Zugkriechen im Laufe der Zeit über das Druckkriechen ansteigen kann. (siehe Abb. 3.11)

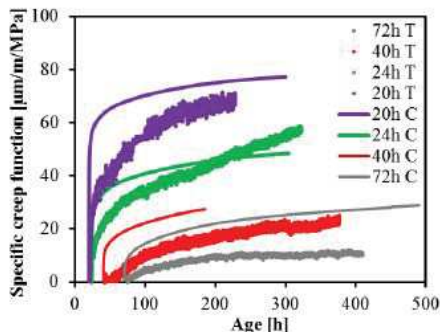


Figure 10 – Specific tensile and compressive creep function according to the age of the material

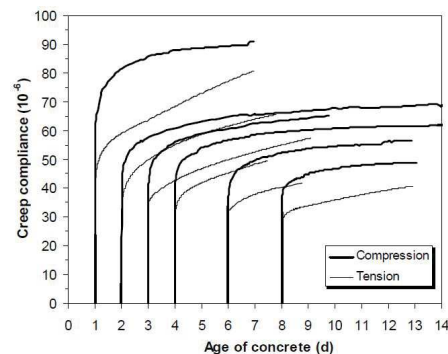


Figure 5.23 Comparison between creep in tension and compression, BASE-5 concrete, stress/strength ratio is 40% at loading age, $T=20^\circ\text{C}$.

Abb. 3.11: Vergleich der Verformung bei Zug- und Druckkriechen [3],[2]

In den ersten Stunden der Belastung steigt, unabhängig vom Belastungsalter, die Kriechverformung infolge der Druckbelastung schneller an als unter Zug. Bei jungem Beton übersteigt das Zugkriechen im Laufe der Zeit die Druckkriechverformungen. Dieser Effekt nimmt lt. Delsaute mit zunehmendem Belastungsalter jedoch ab. [2],[3]

Neuere Forschungsarbeiten weisen auf ein gegenteiliges Verhalten von Beton hin. Tailhan et al. zeigen, dass der Beton unter Druck mehr kriecht als unter Zug. [14] Die bisherigen Forschungsergebnisse der TU-Graz (siehe Kapitel 4) weisen ebenfalls dieses Verhalten auf. Es muss an dieser Stelle darauf hingewiesen werden, dass die messtechnische Bestimmung

der Zugkriechdehnung ein deutlich höheres Fehlerpotential aufweist als die der Druckkriechdehnung. Ursächlich dafür ist, dass die Kriechverformungen unter Zug um eine Größenordnung kleiner sind als unter Druck. Zudem weisen die Schwinddehnungen und die Verformungen infolge von Zugkriechen eine gleiche Größenordnung auf, bewegen sich jedoch in entgegengesetzte Richtungen.

Eine mögliche Erklärung für das unterschiedliche viskoelastische Verhalten unter Druck und Zug kann im erhöhten Einfluss der Mikrorissbildung auf das Zugkriechen gefunden werden. Dieses Phänomen wurde bereits in Abs. 3.2 näher erläutert. Der Unterschied des Grundkriechs unter Druck- oder Zugbelastung erklärt Delsaute anhand der Orientierung der Mikrorisse in Abhängigkeit der Belastungsrichtung. (siehe Abb. 3.12)

Mikrorisse unter Druck sind normalerweise parallel zur Belastungsrichtung orientiert, wohingegen sich jene unter Zug normal auf die Belastungsrichtung ausbilden. Das aus der Rissbildung resultierende Schwinden wirkt hauptsächlich parallel zum Riss. Der Unterschied zwischen Druck und Zug wird durch die Tatsache erklärt, dass das zusätzliche Schwinden bei Druckbelastung das Kriechen vergrößert und bei Zugbelastung sogar verkleinert. [3]

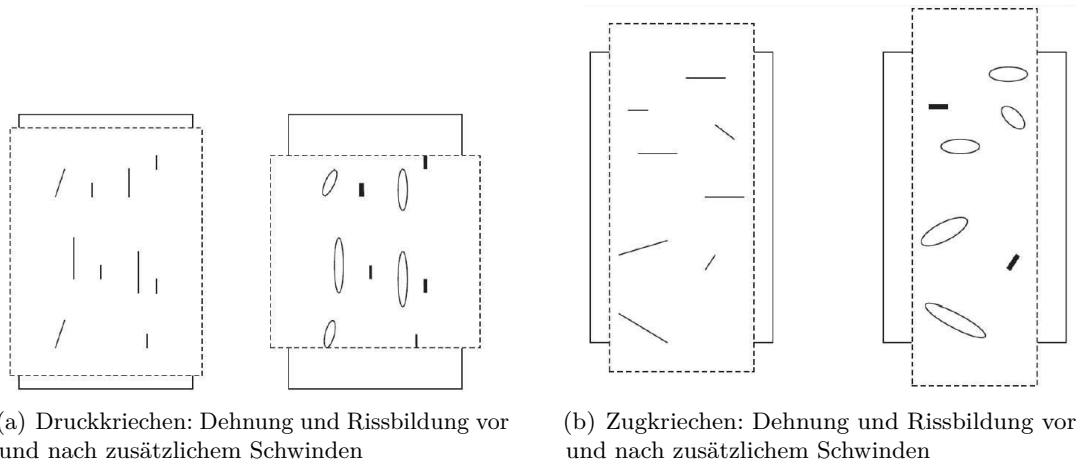


Abb. 3.12: Rissorientierung unter Druck- und Zugbelastung [3]

Weiters wird von Rossi et al. zwischen jungem und altem Beton unterschieden. Es ist bekannt dass die anfänglichen Mikrorisse infolge einer Druckbeanspruchung gleichmäßiger und mit einer höheren Dichte im Bauteil verteilt sind als infolge von Zug. Die höhere Anzahl der Risse und das damit einhergehende Trocknungsschwinden führen bei altem Beton zu größeren Kriechverformungen. Das Verhalten von jungem Beton unter Last ist etwas komplexer. Aufgrund der geringen Festigkeit und des noch niedrigen E-Moduls des jungen Betons können sich keine großen Spannungen in der Struktur ausbilden, was zu wenigen und kurzen Rissen führt. Angesichts des noch geringen Hydratationsgrades werden die Mikrorisse durch die Selbstheilung des Betons wieder geschlossen und die daraus resultierenden autogenen Schwindverformungen wirken sich mindernd auf die Zugkriechdehnungen aus. Bei andauernder Belastung und fortschreitender Hydratation tritt wieder der Effekt des zusätzlichen Trocknungsschwindens infolge der Rissbildung in den Vordergrund. [10]

Im Fall der teilweisen bzw. vollständigen Entlastung einer Probe, welche zuvor eine Druckbelastung erfahren hatte, kommt es im Laufe der Zeit zu einer teilweisen Rückverformung der Kriechdehnung. Dieser Effekt kann bei einer vorangegangenen Zugbeanspruchung (siehe

Kapitel 5) nicht in dem gleichen Ausmaß beobachtet werden. Ursächlich dafür scheint wieder der erhöhte Einfluss der Mikrorissbildung auf das Zugkriechen zu sein. Durch die Reduktion der äußeren Belastung schließt sich der Riss so weit, bis die Spannungsspitze an den Rissenden abgebaut ist, und dadurch das Risswachstum und die dazugehörige Langzeitverformung endet.

3.8 Einfluss der Viskoelastizität auf die Spannungsentwicklung im jungen Beton

Das viskoelastische Verhalten von Beton hat, entgegen der derzeitigen Meinung, nicht nur eine spannungsreduzierende Wirkung hinsichtlich Rissgefahr. Infolge der Hydratation des Zements kommt es zu einer anfänglichen Temperaturerhöhung, welche im Beton Druckspannungen hervorruft. Da die Viskoelastizität im jungen Beton stark ausgeprägt ist, werden diese Spannungen merklich reduziert. Die darauffolgende Abkühlung führt jedoch aufgrund des beschleunigten Druckspannungsabbaus zum früheren und deutlich größeren Aufbau von Zugspannungen im Bauteil. In Abb. 3.13 ist dieser Effekt schematisch dargestellt. Hinsichtlich der Rissgefahr kann eine rein elastische Berechnung sogar zu unsicheren Ergebnissen führen.

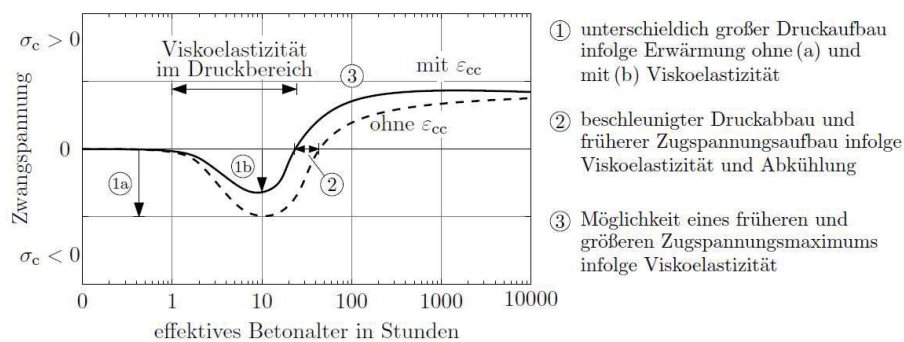


Abb. 3.13: Schematische Darstellung der Zwangsspannungsentwicklung im jungen Beton mit und ohne Berücksichtigung der Viskoelastizität [11]

An der TU-Graz wurden Zwangrahmenversuche durchgeführt, um dieses Verhalten genauer zu untersuchen. Die Versuchsergebnisse konnten durch den Vergleich von elastischer und viskoelastischer Nachrechnung diesen Effekt bestätigen. Nähere Informationen dazu befinden sich in [11].

4 Versuchsprogramm

4.1 Allgemeines

Im Zuge des gesamten Versuchsprogramms wurden bisher zwei mögliche Einflussgrößen auf das Zugkriechen betrachtet. Einerseits liegt der Fokus auf dem Einfluss der Belastungshöhe und andererseits auf dem Einfluss der Belastungsgeschichte auf die Entwicklung der Zugkriechdehnungen. Für beide Versuche wurde die gleiche Betonrezeptur, Probenform und Messtechnik und ein ähnlicher Versuchsaufbau verwendet.

Der Versuch in Abs. 4.2 zum Einfluss der Belastungshöhe stellt den ersten Teil der Untersuchung dar und wurde an der TU-Graz bereits vor ungefähr vier Jahren durchgeführt. Der Versuch in Abs. 4.3 zum Einfluss der Belastungsgeschichte wurde das erste Mal im Zuge der Masterarbeit „Zugkriechen von Beton in Abhängigkeit der Spannungsgeschichte“ [4] durchgeführt und ausgewertet. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird dieser Versuch zunächst ein weiteres Mal durchgeführt. Mit der erneuten Durchführung und Auswertung sollen zunächst die Beobachtungen und Schlussfolgerungen aus [4] bestätigt werden. Darüber hinaus wird in der vorliegenden Arbeit auch die Entlastungsphase gezielt analysiert. Aufgrund einer Störung in der Messwerterfassung während der Belastungsphase konnten aus der erneuten Versuchsdurchführung lediglich die Messdaten der Entlastung für die weiteren Auswertungen herangezogen werden. Um die Ergebnisse der Belastungsphase aus der vorangegangenen Masterarbeit dennoch bestätigen zu können, wurde der Versuch ein drittes Mal durchgeführt.

Für eine bessere Zuordnung der Messergebnisse zu den einzelnen Versuchsdurchgängen erfolgt nun eine Benennung der Durchgänge, welche für den Rest dieser Arbeit beibehalten wird.

Serie A	Versuchsdurchgang aus „Zugkriechen von Beton in Abhängigkeit der Spannungsgeschichte“ [4]
Serie B	1. Versuchsdurchgang im Zuge dieser Arbeit (Entlastungsphase)
Serie C	2. Versuchsdurchgang im Zuge dieser Arbeit (Belastungsphase)

Tab. 4.1: Benennung Versuchsdurchgänge

4.2 Versuche zum Einfluss der Belastungshöhe

Ziel dieser durchgeführten experimentellen Untersuchung war, den Einfluss einer kurzzeitigen Erhöhung der Last auf das Verformungsverhalten von Beton unter Langzeitbeanspruchung zu ermitteln und zu interpretieren. Der Versuchsaufbau für die Zugbeanspruchung beinhaltet drei zylinderförmige Probekörper, welche nebeneinander aufgehängt wurden. Ein Körper blieb, zur Ermittlung der Schwindverformungen, unbelastet während die beiden anderen mittels angehängter Stahlgewichte eine Belastung erfuhren. Zur Simulation der

kurzzeitigen Erhöhung der Last wurden zusätzlich bei einem Körper runde Stahlscheiben auf den angehängten Stahlklotz gelegt und danach wieder entfernt. Abb. 4.1 zeigt den Aufbau dieses Versuchs.



Abb. 4.1: Versuchsaufbau [12]

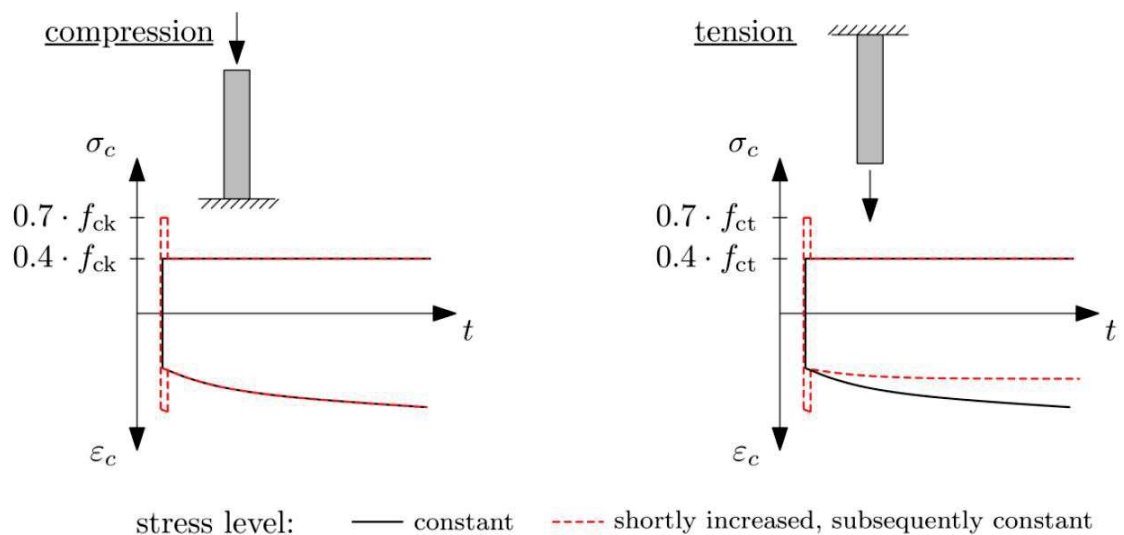


Abb. 4.2: Schematische Darstellung des Versuchsablaufs und des erwarteten Ergebnisses [12]

Im Gegensatz zu dem vernachlässigbaren Einfluss einer kurzzeitigen Spannungserhöhung unter Druckbeanspruchung auf die Langzeitverformung unter Druck, wurde von einer kurzzeitigen Spannungserhöhung unter Zug erwartet, dass hierdurch das Langzeitverhalten wesentlich beeinflusst wird. Abb. 4.2 veranschaulicht diese Überlegung. Das Bild zeigt schematisch in rot den Dehnungsverlauf der einmalig erhöhten Belastung und in schwarz

den Verformungsverlauf des Körpers mit der konstanten Einwirkung. Die anfängliche höhere Belastung von 70 % der Zugfestigkeit wurde für 5 min gehalten. Danach erfolgte eine langsame, über 20 min andauernde Entlastung auf 40 % der Festigkeit. [12]

Das Kriechverhalten von Beton unterscheidet sich für den Fall der teilweisen Entlastung infolge von Zugbeanspruchung maßgeblich von dem allgemeinen Verhalten unter Druck. Eine Verminderung der Druckbeanspruchung führt zur verhältnismäßig gleich großen Verkleinerung der Kriechverformung. Das Druckkriechen entwickelt sich danach in Abhängigkeit der verbliebenen Belastung und Lasteinwirkungsdauer weiter. Beim Unterschreiten des maximalen Zugspannungsniveaus wird dieser Effekt in ausgeprägterer Form beobachtet. Der Verlauf des Zugkriechen entwickelt sich danach wesentlich langsamer und mit geringerer Kriechrate als der Druckkriechverlauf. [12]

Eine Erklärung für das beobachtete Verhalten kann in den unterschiedlichen Mechanismen von Druck- und Zugkriechen gefunden werden. Während für das Kriechen unter Druckbelastung in erster Linie die Umlagerung des ungebundenen Wassers im Zementstein verantwortlich ist, scheint der Hauptgrund für das Zugkriechen woanders zu liegen. Kriechen unter Zug kann nicht alleine durch die Bewegung des Kapillarporenwassers erklärt werden, da bei einer Zugspannung das Porenvolumen eher größer wird. Eine plausible Erklärung für das Verhalten unter Zug kann im Mechanismus der Mikrorissbildung gefunden werden. Unabhängig von der Höhe der Belastung verringert sich das Zugkriechen bereits nach einer minimalen Entlastung maßgeblich. Bei einer Reduktion der Spannung (wie es im Fall eines gezwängten Bauteils durch Relaxation geschieht) schließen sich die, durch das vorangegangene Kriechen, geöffneten Risse wieder teilweise und das Fortschreiten der Mikrorissbildung endet. [12]

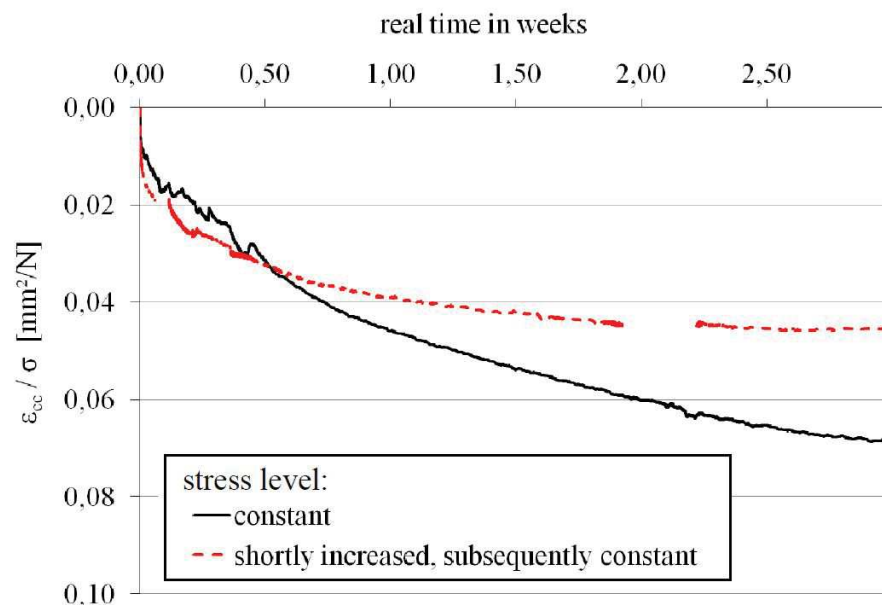


Abb. 4.3: Gemessenes Dehnungs-/Spannungsverhältnis in Abhängigkeit der Spannungsgeschichte (effektives Belastungsalter 7 Tage) [12]

Die Versuchsergebnisse in Abb. 4.3 bestätigen diese Annahmen.

4.3 Versuche zum Einfluss der Belastungsgeschichte

Ziel der durchgeführten experimentellen Untersuchung war, den Einfluss der Lastaufbringung auf das Verformungsverhalten des Betons unter Langzeitzugbeanspruchung sowie Rückverformung bei Entlastung zu ermitteln und im Anschluss daran zu interpretieren. Der gesamte Versuchsaufbau beinhaltet vier zylinderförmige und 90 cm langen Probekörper:

- Versuchskörper 1, erfuhr eine mehrstufige Lastaufbringung
- Versuchskörper 2, auf den die identische Last einstufig (in einem Schritt) aufgebracht wurde
- Versuchskörper 3 alias Schwinddummy, war während der gesamten Versuchsdurchführung unbelastet und fungierte als reiner Schwinddehnungsmesser
- Versuchskörper 4, als Reservekörper gedacht

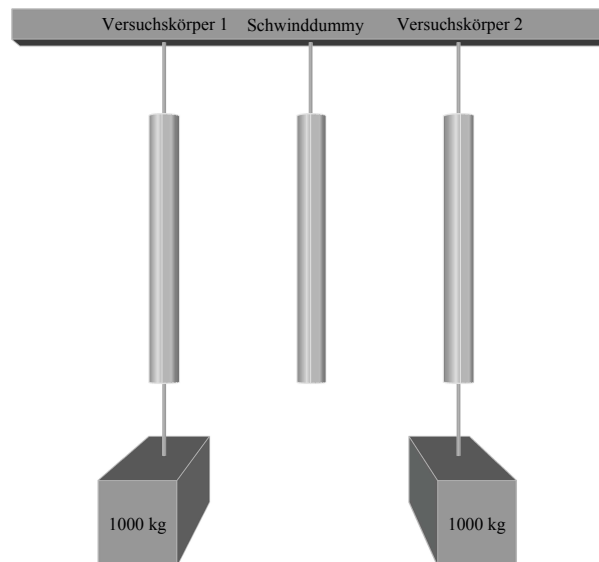


Abb. 4.4: schematischer Versuchsaufbau

Die zwei Versuchskörper und der Schwinddummy wurden in einem Stahlrahmenregal nebeneinander aufgehängt und anschließend belastet. An die Versuchskörper 1 und 2 wurde jeweils ein Stahlblock mit dem Gewicht von 1000 Kilogramm angehängt, während der Schwinddummy unbelastet blieb. Die Last rief in den Probekörpern eine Spannung von 1.27 MN/m^2 hervor, was ca. 50 % der aufnehmbaren Zugspannung des Betons zum Belastungszeitpunkt entspricht.

Während der Versuchskörper 2 eine einstufige Belastung erfuhr, wurde am Versuchskörper 1, durch das Aufbringen einer mehrstufigen Belastung, der Zwangkraftaufbau eines verformungsbehinderten Bauteils infolge der Erhärtung simuliert. In Abb. 4.5 ist in Rot der Belastungsablauf des Versuchskörpers 1 für die praktische Durchführung schematisch dargestellt.

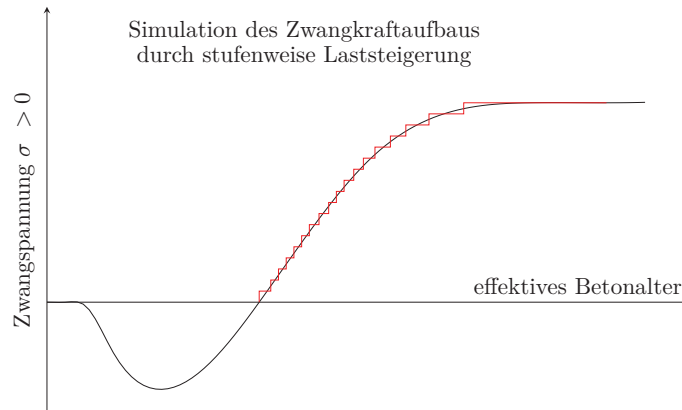


Abb. 4.5: schematische Nachbildung der Zwangspannungsgeschichte

Die dauerhafte Messung der Verformungen und der einwirkenden Kraft startete mit dem Aufbringen der ersten Laststufe auf den Versuchskörper 1. Durch das abwechselnde Absenken zweier Lagersockel, die unter dem Stahlblock angeordnet waren, wurde außerdem eine gleichmäßige Lasteinleitung in den Körper gewährleistet. Über den Zeitraum von acht Tagen wurden pro Tag ca. sechs Laststeigerungen durchgeführt, bis der Stahlblock frei an der am Probekörper angeschraubten Gewindestange hing und so das gesamte Gewicht von 10 kN in den Versuchskörper eingeleitet werden konnte. Nachdem Zylinder 1 den letzten Belastungsschritt erfahren hatte, erfolgte die Belastung des Versuchskörpers 2. In diesem Fall wurde die Last durch möglichst gleichzeitiges, totales Absenken der Lagersockel auf den Körper aufgebracht. Die aus der Belastung resultierende Gesamtspannung in den Probekörpern ergibt sich zu:

$$\sigma_{\text{ges}} = \frac{F}{A_c} = \frac{10 \text{ kN}}{78,54 \text{ cm}^2} = 1,27 \text{ MN/m}^2.$$

Das entspricht einem Belastungsniveau von etwa 50 % der Zugfestigkeit. Für den Zeitraum von vier Monaten wurde die Last auf den Körpern konstant gehalten und die daraus resultierenden Verformungen gemessen. Die Entlastung erfolgte bei beiden Probekörpern äquivalent durch zügiges Anheben der Stahlblöcke. Um über das Verformungsverhalten der Körper nach der Entlastung ebenfalls Auskunft zu erhalten, blieb die ständige Dehnungsmessung über weitere fünf Monate in Betrieb.

Auf den dritten Versuchskörper, auch Schwinddummy genannt, wirkte während der gesamten Versuchsdauer keinerlei äußere Last ein. Er wurde zum Zweck der Verformungsmessung infolge äußerer Einflüsse, wie Luftfeuchtigkeits- und Temperaturschwankungen, installiert.

Abb. 4.6 zeigt schematisch den Versuchsablauf anhand der Be- und Entlastung der drei Probekörper.

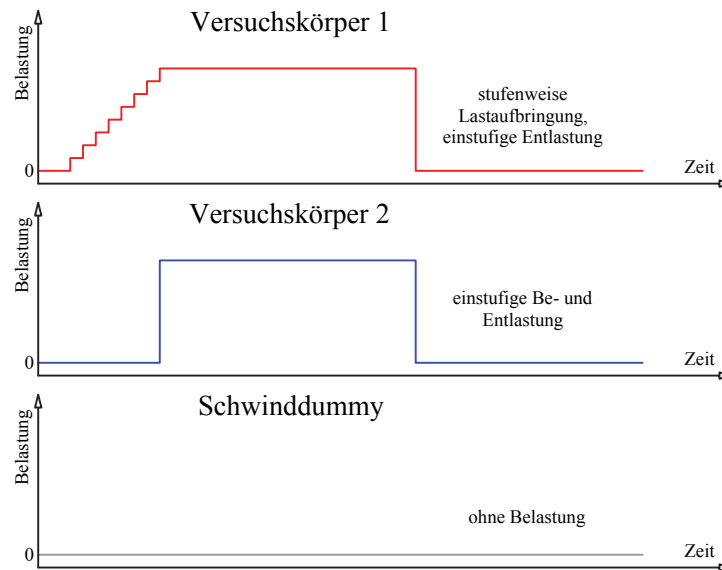


Abb. 4.6: schematischer Versuchsablauf

Da es sich beim Kriechen wie auch beim Rückkriechen um Langzeiteffekte handelt, erstreckt sich der Versuchszeitraum von Serie B über neun Monate. Davon wurden vier Monate die Kriechverformungen infolge der Zugbelastung und weitere fünf Monate die Verformungen nach der Entlastung gemessen. Aufgrund einer Störung der Messwerte im Zeitraum der Dauerbelastung, die auch nicht systematisch bereinigt werden konnte, mussten die Messwerte der Belastungsphase verworfen werden. Aus dieser Versuchsserie konnten in weiterer Folge nur Messwerte für die Entlastung gewonnen werden. Um dennoch Ergebnisse für die Belastung zu erhalten wurde Serie C durchgeführt.

4.4 Probenherstellung

4.4.1 Versuchskörper

Für die Versuchsdurchführung wurden vier zylinderförmige Probekörper hergestellt. Als Schalung für die Prüfkörper kamen Rohre der Firma Polokal, mit einer Länge von 1000 mm und einem Innendurchmesser von 100 mm, zum Einsatz. Die Wahl des Innendurchmessers war von entscheidender Bedeutung für die Herstellbarkeit und die Verdichtbarkeit des Betons. Um die sehr kleinen Kriechverformungen mithilfe der Wegaufnehmer entsprechend messen zu können, wurde die endgültige Länge der Probekörper mit 900 mm festgelegt. Für die zentrische Lasteinleitung sowie als Aufhängevorrichtung wurden an den Enden der Körper Stahlstempel mit eingeschnittenem Gewinde aufgeklebt.

4.4.2 Verwendeter Beton

In der Tab. 4.2 ist die anteilmäßige Zusammensetzung des verwendeten Betons dargestellt. Es handelt sich hierbei um einen Beton der Festigkeitsklasse C35/45 mit einem W/Z-Wert von 0,47 und einem Größtkorn von 16 mm. Für eine bessere Verdichtbarkeit wurde dem Beton das Fließmittel Sika ViscoCrete 1020 zugegeben. Die verwendete Betonrezeptur

wurde bereits bei der Masterarbeit „Zugkriechen von Beton in Abhängigkeit der Spannungsgeschichte“ eingesetzt und soll in weiterer Folge zu vergleichbaren Ergebnissen führen. Eine genauere Charakterisierung des Referenzbetons erfolgte bereits im Forschungsvorhaben „Mindestbewehrung unter Zwangbeanspruchung“ der TU Graz, weshalb für nähere Informationen auf [11] verwiesen wird.

Einsatzmittel	Bezeichnung	Gehalt [kg/m ³]
Wasser	-	142
Zement	CEM III/A 32,5 N Holcim	300
Gesteinskörnung:		
Sand 0-2mm	-	620
Kies 2-8mm	-	719
Kies 8-16mm	-	630
Zusatzmittel:		
Fließmittel	Sika ViscoCrete 1020	3

Tab. 4.2: Betonrezeptur

4.4.3 Herstellung der Versuchskörper

Die Herstellung der benötigten Menge Beton für die Versuchskörper und die Begleitkörper (150 x 150 mm Würfel) erfolgte in zwei Durchgängen. Einige Tage vor dem Betonieren kamen die Gesteinskörnungen zum Trocknen in den Ofen, um eine mögliche Restfeuchte in den Körnern ausschließen zu können. Als erstes erfolgte eine Durchmischung der Gesteinskörnungen mit dem Zement, anschließend wurde unter ständigem Rotieren der Trommel das Wasser und das Fließmittel zur Mischung hinzugefügt und zu einer homogenen Masse verarbeitet.



Abb. 4.7: betonierte Versuchskörper

Der Frischbeton wurde in drei Lagen in die zuvor eingöhlten, stehenden Schalungsrohre gefüllt und mit der Rüttelflasche verdichtet. Die Verdichtung erfolgte pro Lage einerseits

im Inneren des Rohres, durch kontinuierliches Herausziehen der Rüttelflasche aus dem Beton, und andererseits an der Außenseite, durch Anregen des Schalungsrohres. Die äußere Verdichtung sollte die Luftporen von der Schalungswand lösen und zu einer möglichst ebenmäßigen Oberfläche der Körper führen. Das Betonieren der Begleitkörper geschah in Würfelschalungen, die mithilfe eines Rütteltisches verdichtet wurden.

Nachdem die Körper fertig betoniert waren, wurden sie mit Folie abgedeckt und zum Erhärten in der Prüfhalle zwischengelagert (siehe Abb. 4.7). Nach sechs Tagen wurden die Versuchskörper an beiden Enden um 50 mm gekürzt, um die in den Randbereichen möglichen vorhandenen Unregelmäßigkeiten aus der Herstellung zu entfernen und die dadurch entstehenden negativen Einflüsse auf die Versuchsdurchführung zu vermeiden. Im weiteren Schritt wurden die Versuchskörper ausgeschalt und die drei besten Zylinder, welche im Versuch zur Anwendung kamen, ausgewählt. Ausschlaggebend für die Entscheidung war Ebenheit und die Abplatzungsfreiheit der Schnittflächen und die Oberflächenqualität. Besonderes Augenmerk wurde dabei auf die Luftporenverteilung und -anzahl an den Enden der Körper gelegt. Um die Oberfläche vor dem Austrocknen zu schützen wurden die Zylinder, wie in Abb. 4.8 zu sehen ist, zweilagig mit selbstklebender Aluminiumfolie umwickelt.



(a) abgesägte Versuchskörper

(b) ausgeschaltete Versuchskörper



(c) mit Aluminiumfolie umwickelte Versuchskörper

Abb. 4.8: Nachbearbeitung der betonierten Versuchskörper

Im nächsten Schritt wurden die Schnittflächen der Versuchskörper mit der Drahtbürste aufgeraut und anschließend mit Druckluft entstaubt. Für das Kleben der Stahlstempel wurden eigens angefertigte Halterungen verwendet, da die Stempel zentrisch an den Körpern angeklebt werden mussten, um etwaige Exzentrizitäten bei der Lastaufbringung

und -einleitung zu vermeiden. Während die Versuchskörper 1 und 2 an beiden Enden mit einem Stahlstempel versehen wurden, war am Schwinddummy lediglich an der Seite der Aufhängung ein Stempel notwendig. Für die Verbindung von Stahl und Beton kam der 2-Komponenten Klebstoff Sikadur auf Epoxidharzbasis zum Einsatz. In Abb. 4.9 sind die einzelnen Komponenten und die fertigt geklebten Versuchskörper dargestellt.

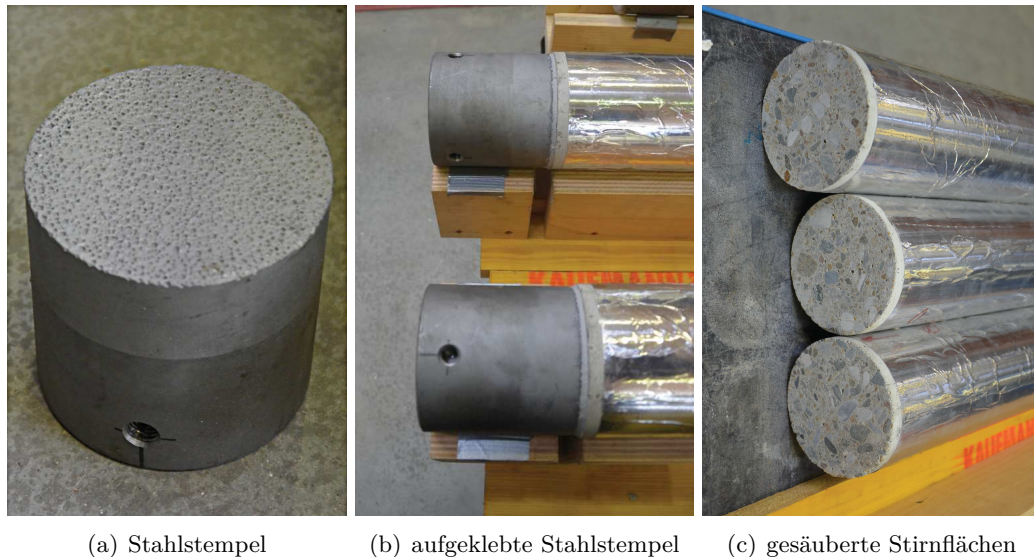


Abb. 4.9: Kleben der Stahlstempel

4.5 Versuchsaufbau

Die fertig vorbereiteten Versuchskörper wurden anschließend in einem Stahlrahmenregel nebeneinander aufgehängt, um für alle drei Körper möglichst gleiche Umgebungsbedingungen zu gewährleisten. Die zentrische Lasteinleitung erfolgte über Gewindestangen, die mit den Stahlstempeln verschraubt wurden. Bei Versuchskörper 1 wurde an der Seite der Aufhängung eine Kraftmessdose zwischengeschaltet, um die stufenweise Lastaufbringung kontrollieren zu können.

Nachdem die Körper aufgehängt waren, wurden die Messgeräte für die Verformungsmessung angebracht. Abschließend erfolgte die Positionierung der Stahlblöcke unter den beiden Versuchskörpern. Für die zentrische Lasteinleitung wurden die Gewichte auf jeweils zwei höhenverstellbaren Lagersockeln gelagert und der Anschluss der Blöcke an die Versuchskörper erfolgte mittels eingeschraubter Gewindestangen. In Abb. 4.10 ist der endgültige Versuchsaufbau zu sehen.



Abb. 4.10: Versuchsaufbau

4.6 Messtechnik

4.6.1 Kraftmessung

Während der stufenweisen Belastung des Versuchskörpers 1 wurde die auf den Zylinder wirkende Kraft mit einer Kraftmessdose der Firma HBM, siehe Abb. 4.11, gemessen. Das Messgerät kann neben Zug- auch Druckkräfte messen und ist für Anwendungen bis ± 50 kN geeignet. Die Toleranz des Ergebnisses liegt bei 0,1 %.



Abb. 4.11: HBM Kraftaufnehmer

4.6.2 Verformungsmessung

Für die Verformungsmessung kamen DD1 Wegaufnehmer der Firma HBM zum Einsatz. Die Funktionsweise dieser Wegaufnehmer beruht auf einer Tastzunge, die mit ihrer Spitze fest auf der Betonoberfläche aufsitzt und sich bei einer Längenänderung des Betons gemeinsam mit diesem verformt. Die Verschiebung der Spitze führt zu einer Verkrümmung der Tastzunge, welche mit Hilfe von Dehnungsmessstreifen aufgenommen wird und in weiterer Folge die Längenänderung des Versuchskörpers darstellt.

Da die zu messenden Verformungen sehr klein sind wurde die Messbasis, wie in Abb. 4.12 zu sehen ist, auf 80 cm verlängert. Durch diese Anpassung konnte eine höhere Genauigkeit der Einzelergebnisse erreicht werden.



Abb. 4.12: Messvorrichtung mit HBM DD1 Dehnungsaufnehmer mit 80 cm langer Messbasis

An jedem Zylinder wurden drei der adaptierten Messvorrichtungen, im Abstand von 120° über den Umfang verteilt installiert, um etwaige Biegemomente aus Exzentrizitäten bei der Messung erfassen zu können.

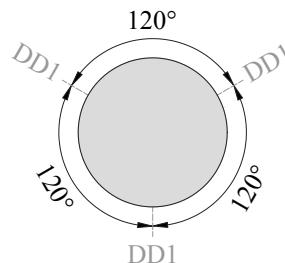


Abb. 4.13: Anordnung der DD1 Wegaufnehmer

Der Nennmessbereich der Sensoren liegt bei $\pm 2,5$ mm und die Genauigkeitsklasse von 0,1 % bedeutet eine absolute Messgenauigkeit von 0,001 mm. Die daraus resultierende relative Genauigkeit, bezogen auf die verlängerte Messbasis, ergibt sich zu

$$\frac{0,001 \text{ mm}}{800 \text{ mm}} = 1,25 \times 10^{-3} \text{ ‰}$$

Die elastische Verformung pro Belastungsschritt ergibt sich aus der aufgetragenen Spannungsänderung von $0,04 \text{ N/mm}^2$ und dem Zug-E-Modul des Betons zum Versuchszeitpunkt von ungefähr 40000 N/mm^2 zu

$$\Delta\varepsilon_{el} = \frac{\Delta\sigma}{E_c} = \frac{0,04 \text{ N/mm}^2}{40000 \text{ N/mm}^2} = 1,0 \times 10^{-3} \text{ ‰}.$$

Durch die Adaptierung der Messbasis ergibt sich, wie in den Berechnungen ersichtlich wird, für den Messwert und die Messgenauigkeit die gleiche Größenordnung. Während des gesamten Versuchszeitraums erfolgte die Messung von Verformung und Kraft im Minutentakt, lediglich in der Zeit der Be- und Entlastung wurde die Messfrequenz auf 1 Hz erhöht. Aufgrund von der punktuellen Messung ergeben sich Abweichungen in der Genauigkeit von Sensor und gemessener Dehnung je Zeiteinheit. Die gemessenen Ergebnisse weisen einen Schwankungsbereich um den tatsächlichen Wert auf, dennoch ergeben sich aus den gemittelten Verformungen repräsentative Dehnungsverläufe.

4.6.3 Anforderung an das Messsystem

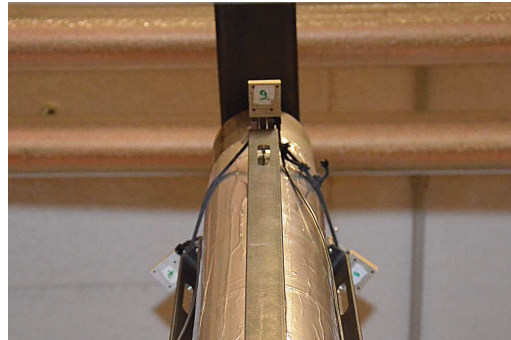


Abb. 4.14: Befestigung der Messvorrichtung mittels Gummiband

Die Schwierigkeit bei der Installation der Messsysteme lag darin, durch die Befestigung am Betonkörper keine unerwünschten Verformungen an den Tastzungen der Wegaufnehmer zu generieren. Dem konnte durch die Anwendung eines Gummibandes, welches direkt über den Wegaufnehmern angebracht wurde, vorgebeugt werden. In Abb. 4.14 ist die Applikation an einem Ende eines Probekörpers zu sehen.

5 Ergebnisse und Auswertung der experimentellen Untersuchung

5.1 Allgemeines

In diesem Kapitel sind die Dehnungsverläufe der einzelnen Wegaufnehmer dargestellt. Die Berechnung der Dehnungsverläufe erfolgt auf inkrementelle Weise. Hierbei wurden äußere Einflüsse, wie Bewegungen des Stahlrahmenregals oder Anstöße an die Messbasis, welche in den Messdaten unrealistische Sprünge erzeugen, herausgerechnet. Hingegen erzeugen die Schwankungen der Raumtemperatur, und die damit einhergehenden unterschiedlichen Verformungen von Messbasis und Versuchskörper, kleinere Unregelmäßigkeiten in den Dehnungsverläufen, welche in weiterer Folge durch Kompensation mit den Dehnungen des Schwinddummies bereinigt wurden.

Die Anordnung der DD1 Wegaufnehmer ist in Abb. 5.1 dargestellt. Der Farbcode (rot=Versuchskörper 1, blau=Versuchskörper 2 und grau=Schwinddummy) wird für die gesamte Arbeit beibehalten.

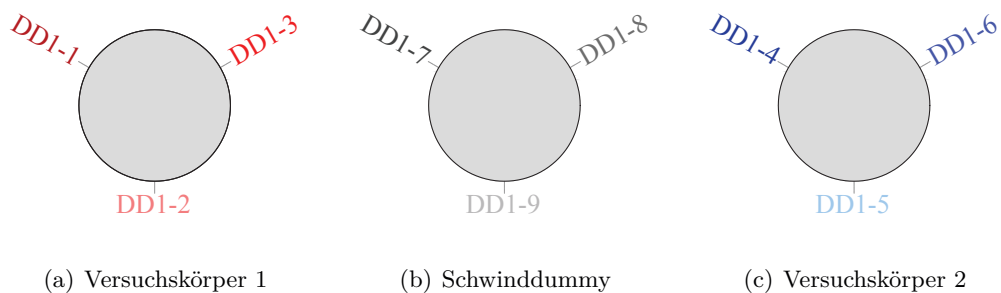


Abb. 5.1: Anordnung der DD1 Wegaufnehmer

Im Zuge dieser Auswertung sollen die Versuchsergebnisse des Belastungszeitraums aus Serie A (vorangegangene Masterarbeit [4]) bestätigt und in weiterer Folge das Verhalten des Betons nach der Entlastung näher betrachtet werden. Inhalt dieser Auswertung sind die Ergebnisse aus den in Abs. 4.1 aufgelisteten Versuchen.

5.2 Serie A

Die hier dargestellten Messergebnisse stammen aus dem Versuchsdurchgang der im Zuge der Masterarbeit von [4] durchgeführt wurde und werden in weiterer Folge für den Vergleich mit den Daten von Serie C verwendet.

5.2.1 Verformung der Versuchskörper unter Last

Der Schwinddummy erfährt im Vergleich zu den beiden anderen Versuchskörpern die größten Verkürzungen. Da sich Schwinden und Zugkriechen gegenläufig verhalten, stellt die Dehnungsdifferenz von Versuchskörper 1 und Versuchskörper 2 mit dem Schwinddummy die Dehnungszunahme infolge der äußeren Belastung dar. Des weiteren kann anhand der Messwertverläufe auf die Belastungsgeschichte geschlossen werden, welche sich im Verlauf von Versuchskörper 1 durch die stetige Verformungszunahme und bei Versuchskörper 2 durch die elastische Verlängerung bei der Lastaufbringung widerspiegelt.

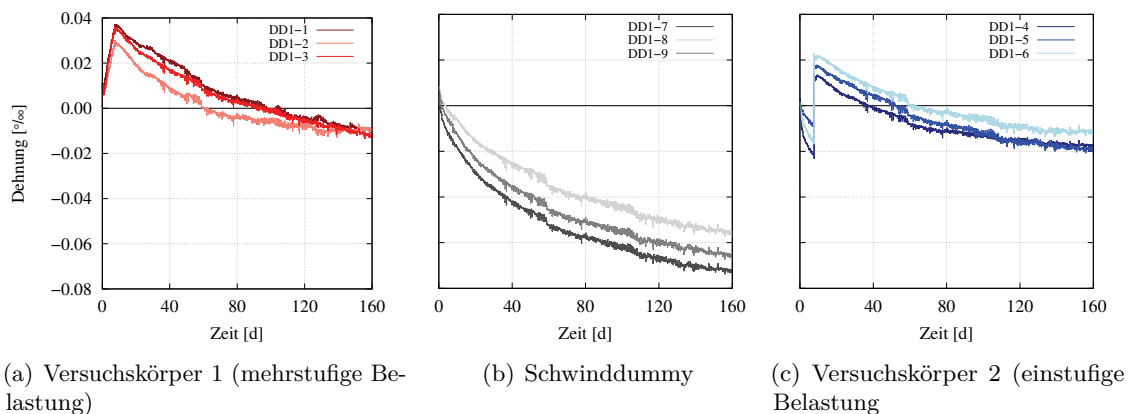


Abb. 5.2: Serie A: Gemessene Verformung der Versuchskörper unter Last

5.2.2 Rückverformung der Versuchskörper nach Entlastung

Im Zuge dieser Serie konnte nur bei Versuchskörper 1 (mehrstufige Belastungsgeschichte) eine kontrollierte Entlastung erfolgen, weshalb für die weiteren Berechnungen lediglich die Messdaten dieses Körpers herangezogen werden. Anhand der Verläufe in Abb. 5.3 wird ersichtlich, dass die Verformung des Versuchskörpers beinahe ident zu jener des Schwinddummys ist. Die Größenordnung in der sie sich befinden liegt zwischen 0,01-0,02 ‰. Aus der Tatsache, dass sich die Schwind- und Kriechverformungen gegenläufig verhalten, wird ersichtlich, dass die beiden Versuchskörper außer der Schwinddehnungen kaum Rückverformungen aus der Entlastung erfahren.

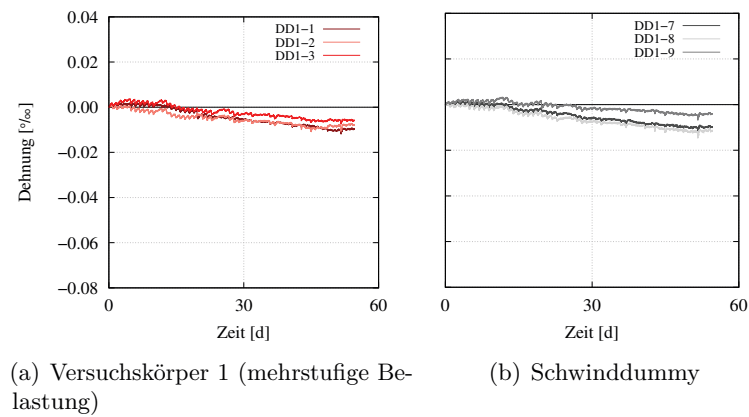


Abb. 5.3: Serie A: Gemessene Rückverformungen des Versuchskörpers 1 nach Entlastung

5.3 Serie B

Die Daten von Serie B stammen aus dem ersten Versuchsdurchgang, der im Zuge dieser Arbeit durchgeführt wurde und beinhalten aufgrund der unbrauchbaren Messwerte des Belastungszeitraums nur die Daten aus der Entlastungsphase.

5.3.1 Materialeigenschaften der Versuchskörper

Im Zuge dieser Serie wurden zu Beginn der mehrstufigen Belastung von Versuchskörper 1 und zu dem Zeitpunkt ab dem beide Körper voll belastet waren jeweils mit drei Betonwürfeln Spaltzugprüfungen durchgeführt und die zugehörigen Festigkeiten ermittelt. Die Umrechnung der Spaltzugfestigkeit in die zentrische Zugfestigkeit erfolgt über die Glg. (5.1) und die jeweiligen Ergebnisse sind in Tab. 5.1 dargestellt.

$$f_{ct} = 0,9 \cdot f_{ct,sp} \quad (5.1)$$

Prüfzeitpunkt [d]	eff. Betonalter [d]	Spaltzugfestigkeit [N/mm ²]	zentr. Zugfestigkeit [N/mm ²]
8	4,63	2,27	2,047
8	2,93	1,752	1,577
8	6,45	2,604	2,344
Mittelwert	4,37		1,989
16	6,52	2,61	2,353
16	4,42	2,22	1,999
16	6,89	2,666	2,399
Mittelwert	5,78		2,25

Tab. 5.1: Betonfestigkeit aus Würfelprüfungen

Da die Festigkeitsentwicklung auch von der Umgebungstemperatur im Erhärtungszeitraum beeinflusst wird, kann aus dem Vergleich der Messwerte mit der Sollkurve des verwendeten Betons auf das effektive Betonalter geschlossen werden. Dieses ist abhängig von der tatsächlichen Festigkeit der einzelnen Proben.

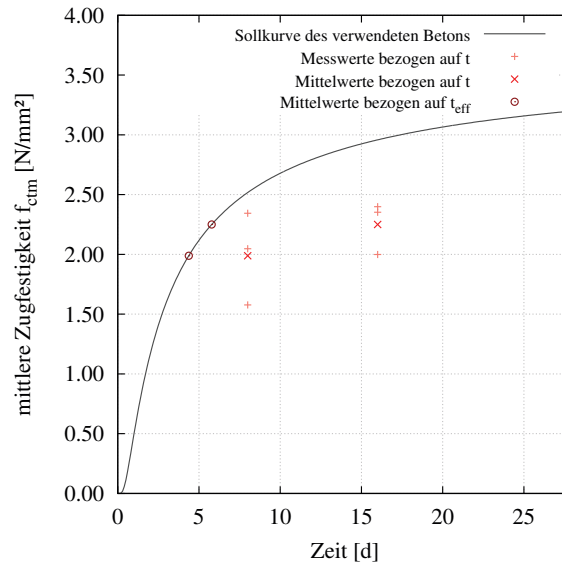


Abb. 5.4: Festigkeitsentwicklung des verwendeten Betons

Die Sollkurve, wie in Abb. 5.4 ersichtlich, ist aus der Anpassung der Zugfestigkeitsentwicklung nach Wesche [16] an die tatsächlichen Festigkeiten des verwendeten Betons aus früheren Versuchen entstanden. Für nähere Informationen dazu wird auf [11] verwiesen. Die Betonwürfel wurden bis zum Versuchsbeginn mit den Probekörpern gemeinsam in der Prüfhalle, bei etwa 10°C bis 20°C, gelagert. Aus den gemeinsamen Umgebungsbedingungen lässt sich darauf schließen, dass sich die Festigkeit bei allen Körpern annähernd gleich entwickelt hat. Wie in Abb. 5.4 und Tab. 5.1 zu sehen ist, ist das effektive Betonalter am Beginn des mehrstufigen Versuchs etwa 4 Tage.

Nach dem Versuchsstart wurden die Würfel, nicht wie die Versuchszylinder in den Kellerraum gebracht, sondern weiterhin in der Prüfhalle in der Nähe des Ausgangs gelagert. In der Zeit zwischen den beiden Prüfungen (Beginn mehrstufige Belastung Versuchskörper 1 bei 8d und einstufige Belastung Versuchskörper 2 bei 16d) hatte es Außentemperaturen von -5°C bis -10°C und wie in „Baustoffe für tragende Bauteile“ [16] bereits dokumentiert wurde, ist bei -10°C die Reife des Betons Null, das heißt die Erhärtung hört auf. Aus dem Zusammenhang zwischen Umgebungstemperatur und Reifung des Beton lässt sich die geringe Festigkeitssteigerung, von $t_{\text{eff}}=4\text{d}$ auf $t_{\text{eff}}=6\text{d}$ binnen 8 Tagen, erklären.

Die Temperatur im Kellerraum war annähernd konstant bei ungefähr 20°C. Es kann angenommen werden, dass die Zylinder äquivalent zur Sollkurve gereift sind und zum Zeitpunkt der zweiten Prüfung ein effektives Alter von 12 Tagen aufwiesen.

5.3.2 Raumklima

Der Raum für die Versuchsdurchführung befindet sich im Keller des Gebäudes und weist aufgrund dessen ein relativ konstantes Raumklima auf. Durch eine dort installierte Messstation

wurden im halbstündigen Abstand Temperatur und relative Luftfeuchtigkeit aufgezeichnet. Die Verläufe der Messwerte für den Entlastungszeitraum dieses Versuchsdurchganges sind in Abb. 5.5 dargestellt. Jahreszeitbedingte Temperatur- und Luftfeuchtigkeitsänderungen während des Messzeitraums von Juni bis November hatten lediglich in den heißen Sommermonaten einen merkbaren Einfluss auf das Raumklima.

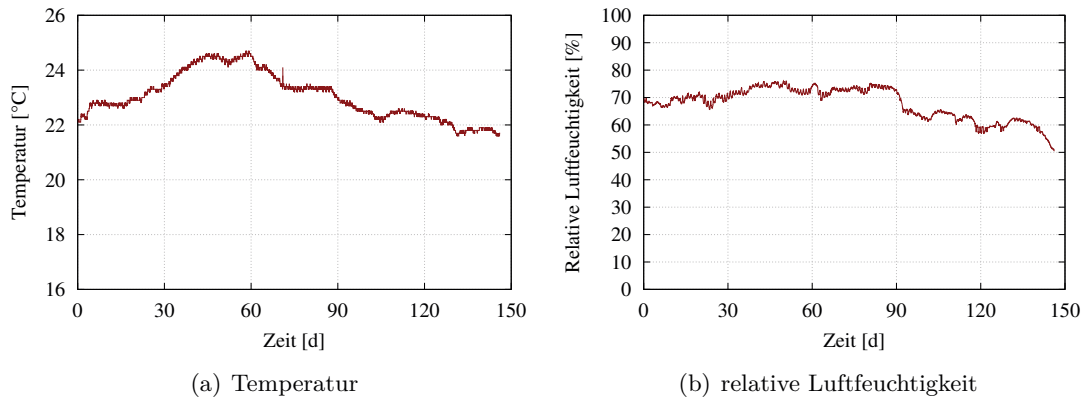


Abb. 5.5: Raumklimadaten Serie C: Entlastungsphase

5.3.3 Rückverformung der Versuchskörper nach Entlastung

In Abb. 5.6 ist eine ähnliche Entwicklung der Dehnungsverläufe wie bei Serie A zu erkennen. Die Messergebnisse dieses Versuchs liegen auch hier bei allen drei Körpern in der Größenordnung von 0,01-0,02 ‰, was darauf schließen lässt dass die beiden Versuchskörper fast ausschließlich Schwinddehnungen erfahren.

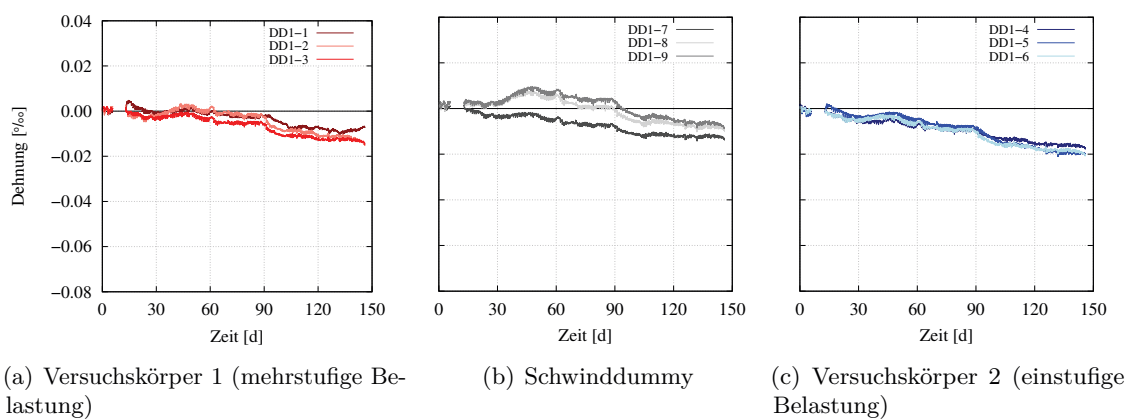


Abb. 5.6: Serie B: Gemessene Rückverformungen der Versuchskörper nach Entlastung

5.4 Serie C

Serie C wurde ebenfalls im Zuge dieser Arbeit durchgeführt um das Verhalten in der Belastungsphase mit den Versuchsergebnissen aus Serie A vergleichen zu können.

5.4.1 Raumklima

Abb. 5.7 zeigt die Verläufe der relativen Luftfeuchtigkeit und der Temperatur des Keller- raums für den Belastungszeitraum der dritten Versuchsdurchführung (von Dezember bis März). Die jahreszeitlichen Klimaschwankungen hatten in dieser Phase keinen merklichen Einfluss auf das Raumklima.

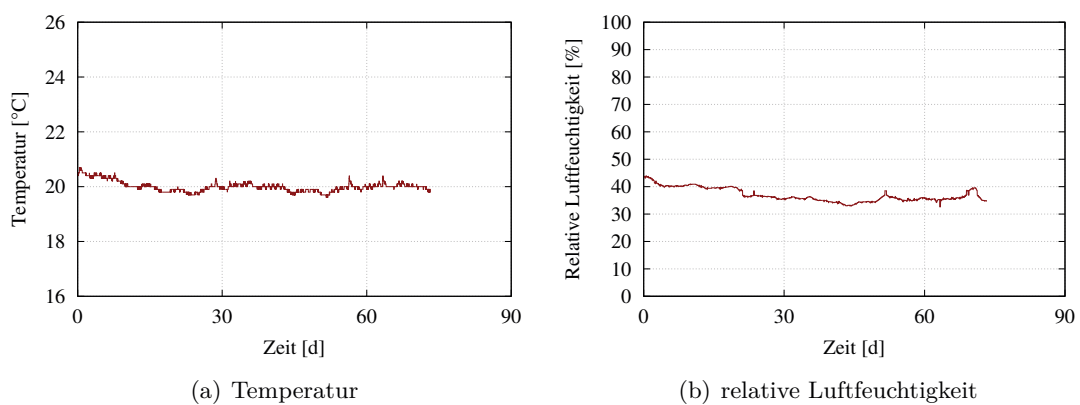


Abb. 5.7: Raumklimadaten Versuch 3: Belastungsphase

5.4.2 Verformung der Versuchskörper unter Last

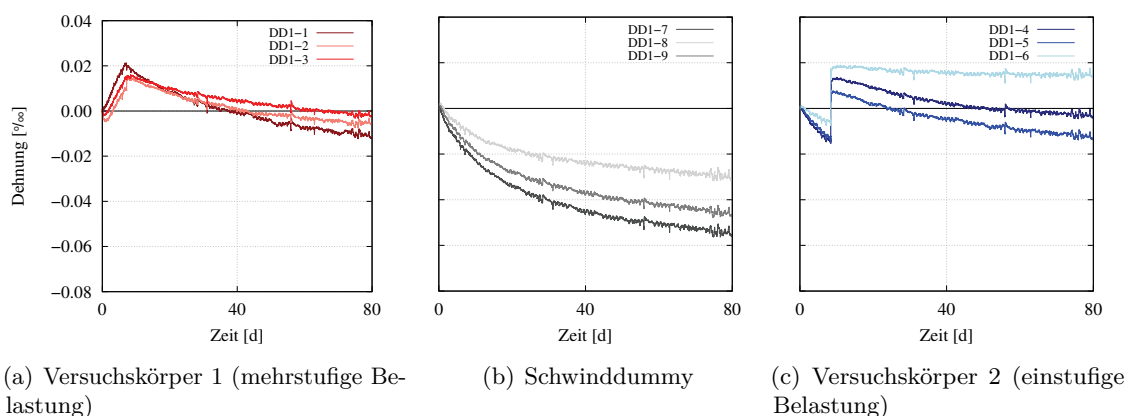


Abb. 5.8: Serie C: Gemessene Verformungen der Versuchskörper unter Last

Wie schon bei Serie A beschrieben wurde, erfährt der Schwinddummy im Vergleich zu den Versuchskörpern 1 und 2 die größten Verkürzungen. Aufgrund des gegenläufigen Verformungsbestrebens von Schwinden und Zugkriechen, stellt die sichtbare Verformungsdifferenz

die Dehnungszunahme der Versuchskörper infolge der unterschiedlichen äußeren Belastung dar.

5.5 Gegenüberstellung der bisherigen Versuche

Im folgenden Kapitel werden die Messergebnisse hinsichtlich ihrer Verformungsentwicklung näher untersucht und in weiterer Folge gegenübergestellt.

5.5.1 Spannungsabhängige Verformungen - Belastung

Aus den einzelnen Wegaufnehmern wurde je Versuchskörper die mittlere Dehnung ε_{ges} ermittelt und in Abb. 5.9 für Serie A und Serie C dargestellt. Der Verlauf des mehrstufig belasteten Versuchskörpers (rot) und des einstufig belasteten Körpers (blau) zeigt die Summe aus elastischer Verformung, Schwind- und Kriechverformungen, während der Schwinddummy (grau) reine Schwindverformungen aufweist.

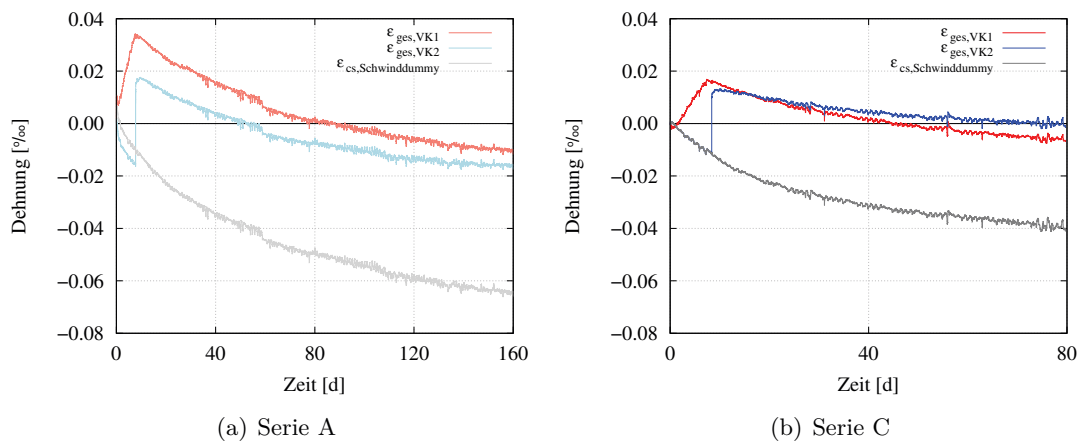


Abb. 5.9: Mittlere Verformungen der Versuchskörper

Die spannungsabhängige Verformung ε_c der Körper ergibt sich aus der Differenz der Gesamtverformung des Versuchskörpers ε_{ges} und der gemessenen Schwinddehnung ε_{cs} des Schwinddummys. Abb. 5.10 bildet für die beiden Betonzylinder aus Serie A und C die elastische Verformung, in Abhängigkeit der von außen einwirkenden Last, mit darauffolgender Kriechdehnung über die Zeit ab. Anhand dieser Verläufe wird der Einfluss der unterschiedlichen Belastungsgeschichte auf die Dehnungsentwicklung der Körper klar ersichtlich.

$$\varepsilon_c = \varepsilon_{ges} - \varepsilon_{cs} \quad (5.2)$$

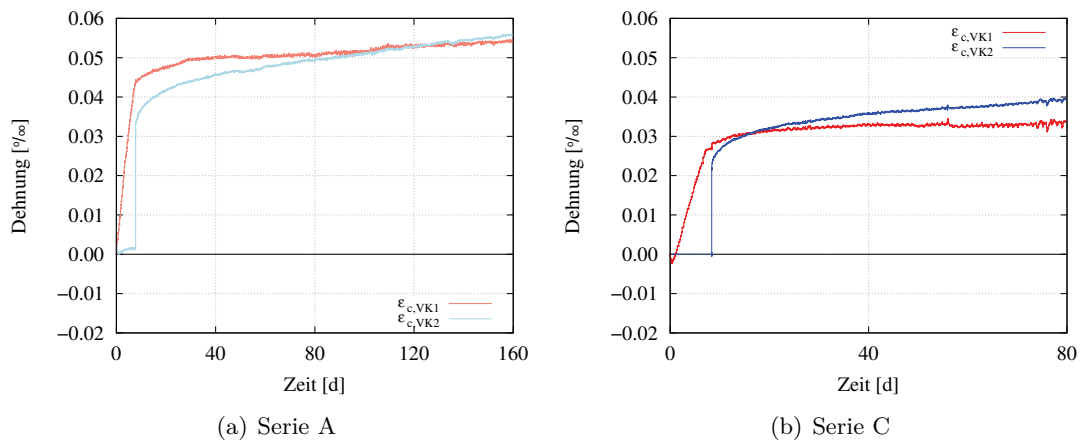


Abb. 5.10: Spannungsabhängige Verformung der Versuchskörper

Zur besseren Veranschaulichung sind die Kriechdehnungen der beiden Körper aus Serie A und Serie C gemeinsam in Abb. 5.11 abgebildet.

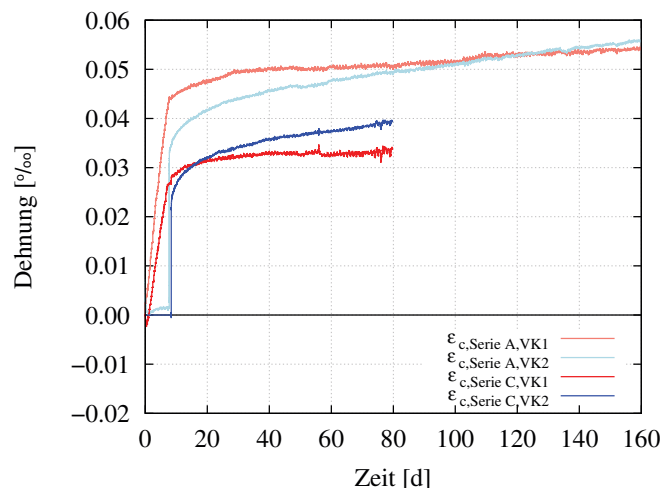


Abb. 5.11: Vergleich Serie A mit Serie C: spannungsabhängige Verformung während Belastung

Die etwas größere absolute Anfangsverformung des stufenweise belasteten Körpers aus Serie A ergibt sich neben dem geringeren E-Modul zum Belastungszeitpunkt vor allem aus den viskoelastischen Verformungen infolge der einzelnen Laststufen. Betragsmäßig liegt die rein elastische Verformung infolge der äußeren Belastung bei beiden Körpern bei $\approx 0,03 \text{ ‰}$. Im Vergleich dazu beträgt die elastische Verformung der Versuchskörper aus Serie C nur $\approx 0,022 \text{ ‰}$, was darauf hindeutet, dass diese Körper zum Belastungszeitpunkt bereits einen größeren E-Modul aufwiesen.

Bei einem Körper mit frühem Belastungsbeginn treten größere Kriechverformungen auf, als bei einem Bauteil mit einem höheren Belastungsalter. Anhand der Dehnungsverläufe ist zu erkennen, dass nach der elastischen Anfangsverformung die Kriechverformung des stufenweise belasteten Körpers, trotz früherem Belastungsalter, deutlich geringer ist als die aus der einstufigen Belastung. Die Kriechzahlentwicklung in Abb. 5.12 verdeutlicht das

unterschiedliche Verformungsbestreben der Körper. Dieses Verhalten steht im Widerspruch zu dem derzeitigen Wissensstand über das viskoelastische Materialverhalten. Der Vergleich der qualitativen Verläufe von Serie C mit jenen aus Serie A zeigt, dass sich die Körper beinahe ident verhalten und so die Ergebnisse aus [4] bestätigt werden können.

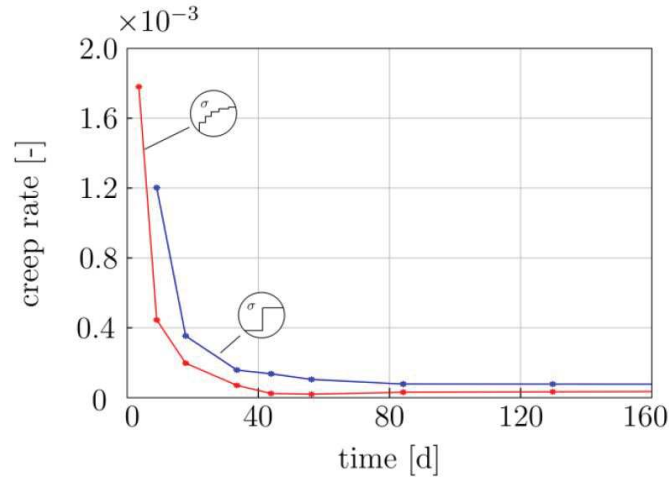


Abb. 5.12: Serie A: Vergleich der Kriechzahlentwicklung aus [4]

Für die Berechnung des Zugelastizitätsmoduls wird der Dehnungsverlauf von Versuchskörper 2 herangezogen. Da die Belastung dieses Körpers in einem sehr kleinen Zeitraum aufgebracht wurde, kann davon ausgegangen werden, dass er zu diesem Zeitpunkt eine reine elastische Dehnung vollzieht und weitere Kriechverformungen im Zeitraum der Lastaufbringung ausgeschlossen werden können. Auf Basis dieser Annahme kann der Zug-Elastizitätsmodul des Betons mit folgender Formel ermittelt werden:

$$E_c = \frac{F_{\text{ges}}}{A \cdot \Delta \varepsilon_{\text{el}}} = \frac{F_{\text{ges}}}{A \cdot (\varepsilon_{\text{fin}} - \varepsilon_{\text{in}})} \quad (5.3)$$

F_{ges}	einwirkende Last
A	Querschnittsfläche der Versuchskörper
ε_{in}	absolute Dehnung des Versuchskörpers unmittelbar vor Lastaufbringung
ε_{fin}	absolute Dehnung des Versuchskörpers unmittelbar nach Beendigung der Lastaufbringung

Mithilfe des mittleren Zug-Elastizitätsmodul wird der zum jeweiligen Belastungszeitpunkt gehörige E-Modul $E_c(t_i)$ berechnet (siehe [11]). Aus der Division der Spannungskremente $\Delta \sigma(t_i)$ durch den dazugehörigen Elastizitätsmodul können die zu jedem Inkrement gehörigen elastischen Dehnungen ε_{el} berechnet werden. Für den einstufig belasteten Körper ergibt sich daraus direkt die elastische Dehnungsantwort, während für den Fall der mehrstufigen Belastung die elastischen Dehnungen für jeden Spannungssprung aufsummiert werden müssen um die elastische Gesamtverformung zu erhalten. Aus der Differenz der

spannungsabhängigen und elastischen Verformungen ergibt sich die reine Kriechdehnung ε_{cc} jedes Körpers.

$$\varepsilon_{cc} = \varepsilon_c - \varepsilon_{el} \quad (5.4)$$

5.5.2 Spannungsabhängige Verformungen - Entlastung

In Abb. 5.13 sind die gemittelten Verformungen der drei Versuchskörper aus Serie A und Serie B, infolge der vollständigen Entlastung, dargestellt.

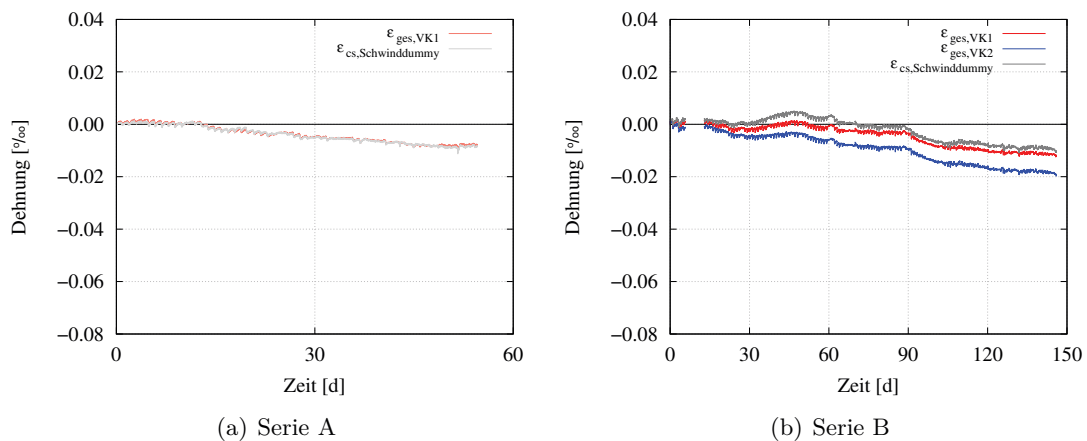


Abb. 5.13: Mittlere Verformung der Versuchskörper

Anhand der Messdaten der beiden Versuchsdurchgänge in Abb. 5.13 ist sehr deutlich zu erkennen, dass die Rückverformung der Versuchskörper beinahe ident mit der Schwinddehnung sind. Werden nun die gemittelten Verformungen voneinander abgezogen ($\varepsilon_{ges,VK1} - \varepsilon_{cs,Schwinddummy}$) resultieren daraus die spannungsabhängigen Verformungen in Abb. 5.14.

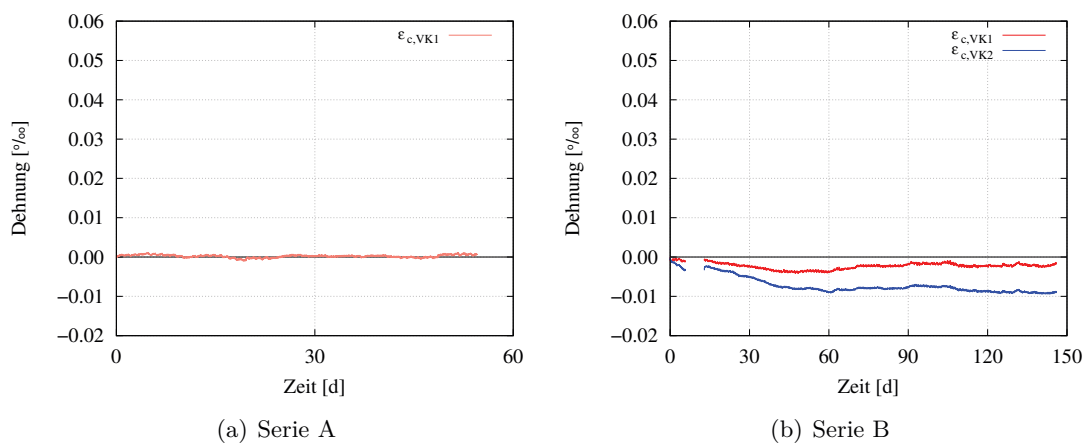


Abb. 5.14: Spannungsabhängige Verformung der Versuchskörper

Um die spannungsabhängigen Verformungen in Entlastungszeitraum besser vergleichen zu können folgt wieder eine gemeinsame Darstellung in Abb. 5.15.

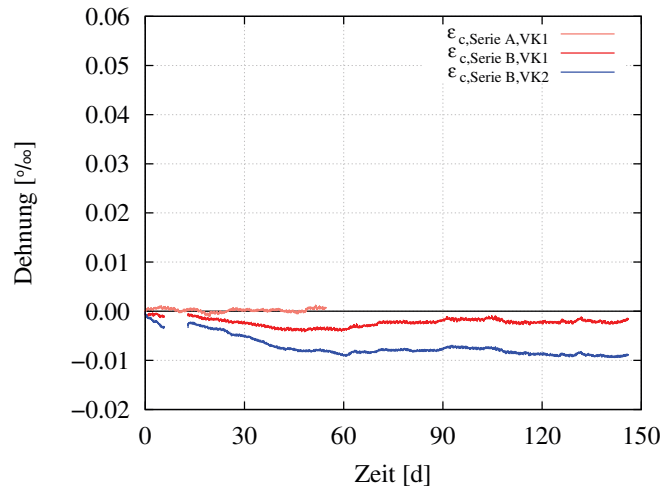


Abb. 5.15: Vergleich Serie A mit Serie B: spannungsabhängige Verformung nach Entlastung

Versuchskörper 1 aus Serie A zeigt über die gesamte Entlastungsphase hinweg keinerlei Rückverformungsbestreben infolge der vorangegangenen Belastung. Die qualitativen Verläufe der Zylinder aus Serie B präsentieren ein etwas unterschiedlicheres Verhalten. Während der einstufig belastete Körper (blau) nach einer anfänglichen geringfügigen Rückverformung keinerlei weitere Verformungstendenz aufweist, ist bei Versuchskörper 1 schon ab dem Zeitpunkt der Entlastung kaum Rückkriechen erkennbar.

5.6 Spannungsunabhängige Verformung - Schwinden

Für die weiteren Nachrechnungen der Versuchsergebnisse ist auch die Auswertung der gemessenen Schwindverformung erforderlich, da die wirksame Bauteildicke h_0 in der Berechnung nach EN 1992-1-1 eine wesentliche Rolle spielt. Die wirksame Bauteildicke berücksichtigt die Bauteilgeometrie durch das Verhältnis der Querschnittsfläche A_c zum Umfang U des Querschnitts, welcher der Umgebungsluft zum Trocknen ausgesetzt ist.

$$h_0 = \frac{2 \cdot A_c}{U} \quad (5.5)$$

Durch das Einwickeln der Versuchskörper mit Aluminiumfolie wird das Austrocknen über die Oberfläche sehr stark reduziert, was sich in der Größe des h_0 Wertes widerspiegelt. Der Einfluss der Versiegelung kann jedoch nicht direkt durch Berechnung, sondern lediglich näherungsweise aus der Anpassung der Schwindkurve des Eurocodes an die Schwinddehnung des Versuchs bestimmt werden.

Die Eingangswerte für die Ermittlung der Schwindkurve nach EN 1992-1-1 sind wie folgt:

$f_{ck} = 35 \text{ N/mm}^2$	für C35/45
$f_{cm} = 43 \text{ N/mm}^2$	für C35/45
Zementart = N	
RH = 37 %	durchschnittliche relative Luftfeuchtigkeit der Belastungsphase von Serie B
$t_s = 4 \text{ d}$	effektives Alter des Betons zu Beginn des Trocknungsschwindens/-quellens (Ende der Nachbehandlung)
$h_0 = \text{var.}$	wirksame Bauteildicke in mm

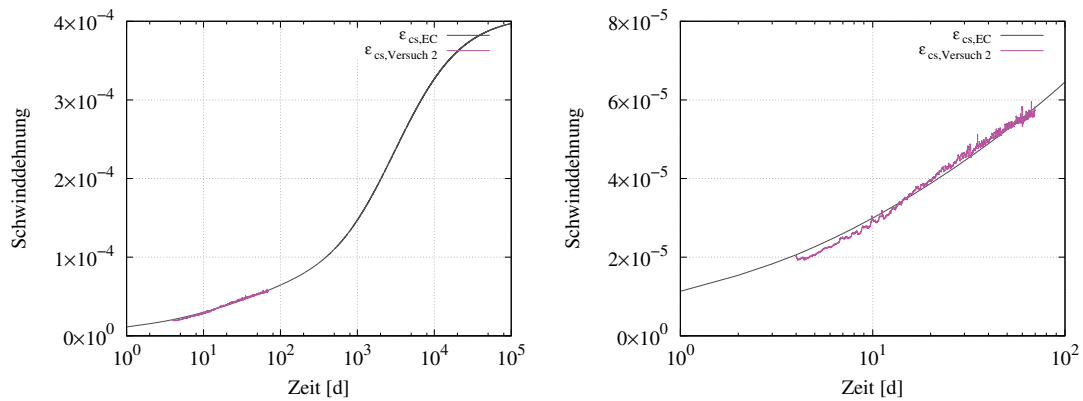


Abb. 5.16: modifizierte normative Schwinddehnung überlagert mit realer Schwindverformung von Serie C

In Abb. 5.16 ist die reale Schwindverformung von Serie C in Magenta abgebildet. Durch Variation des h_0 Wertes wurde die normative Kurve an die Versuchswerte angenähert. Mit $h_0 = 1800 \text{ mm}$ konnte eine gute Anpassung der Messkurve an die Normkurve erzielt werden. Dieser Wert hat maßgeblichen Einfluss auf die weitere Berechnung der Kriechzahl und der damit einhergehenden Kriechverformungen.

6 Rechnerische Berücksichtigung der Viskoelastizität bei veränderlicher Spannungsgeschichte

In diesem Kapitel erfolgt die Nachrechnung des mehrstufig belasteten Versuchskörpers mittels Superpositionsprinzip. Das prinzipielle Vorgehen der allgemeinen Superposition und des Ansatzes der TU-Graz wurden bereits im Abs. 3.6 erläutert. In diesem Kapitel werden nun die Ergebnisse der Nachrechnung mit den qualitativen Dehnungsverläufen des Versuchs gegenüber gestellt.

6.1 Superpositionsprinzip

Die reale Belastungsgeschichte des Versuchskörpers 1 ist in Abb. 6.1 dargestellt. Die zum jeweiligen Belastungszeitpunkt gehörigen Spannungsinkremente dienen der Nachrechnung des mehrstufig belasteten Versuchskörpers (VK 1).

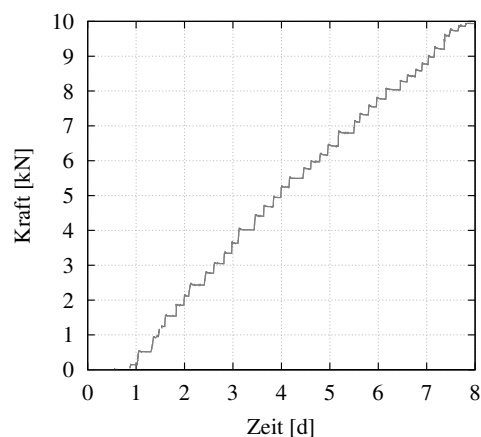


Abb. 6.1: reale Belastungsgeschichte Versuchskörper 1

Als Eingangsparameter für die weiteren Berechnungen werden folgende Werte verwendet:

$f_{cm} = 43 \text{ N/mm}^2$	für C35/45
$E_{cm} = 56917 \text{ N/mm}^2$	Zug-Elastizitätsmodul aus Glg. (5.3)
$RH = 37 \%$	durchschnittliche relative Luftfeuchtigkeit
$h_0 = 1800 \text{ mm}$	wirksame Bauteildicke aus Abs. 5.6
$\Delta\sigma(t_i) = var.$	einwirkende Spannungsinkremente aus Abb. 6.1
$t_i = var.$	effektives Betonalter zum Belastungszeitpunkt

6.1.1 Berechnung mit allgemeinem Superpositionsprinzip nach EC2

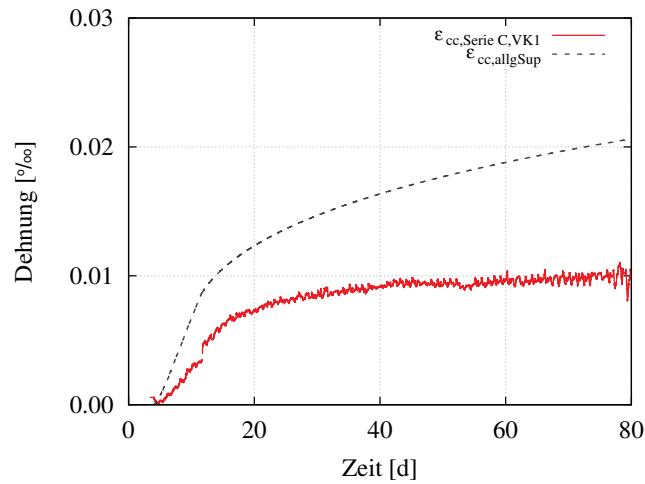


Abb. 6.2: Vergleich der viskoelastischen Verformungen von VK 1 mit der Nachrechnung der allg. Superposition nach EC2 für Belastung

Der Vergleich der Messwerte für den Belastungszeitraum mit der Nachrechnung der allgemeinen Superposition ist in Abb. 6.3 dargestellt. Die Kurven zeigen die rein viskoelastischen Dehnung infolge der einwirkenden Belastung. Dazu wurden die Messwerte um die elastische Verformung von $\approx 0,022 \text{ ‰}$ verringert. Die Berechnung der Kriechzahl φ basiert auf dem Produktansatz lt. EN-1992-1-1 für Druckkriechen. Es ist deutlich zu erkennen, dass die lt. Norm zu erwartende Kriechverformung die tatsächlich vorhandene Dehnung stark überschätzt. Der qualitative Verlauf der beiden Kurven ist recht ähnlich, jedoch konvergiert die Kriechrate der Messdaten gegen einen niedrigeren Wert als jene der Nachrechnung. Die Annahme, dass die Berechnung der Kriechzahl für Zug- gleich wie für Druckkriechen erfolgen kann, wird hier nicht bestätigt.

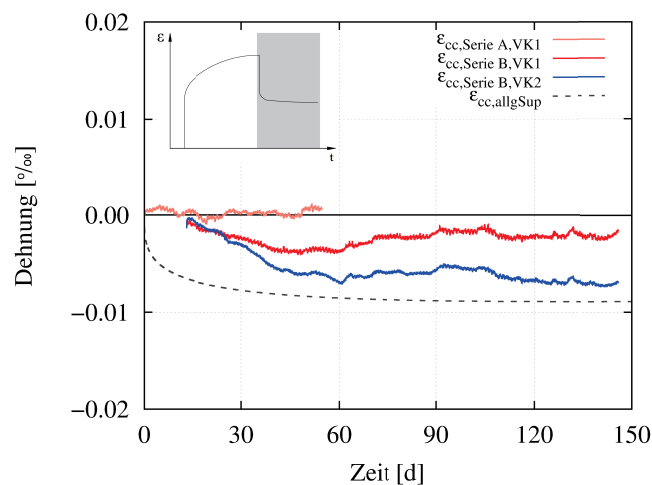


Abb. 6.3: Vergleich der Messwerte von VK 1 und VK 2 mit der Nachrechnung der allg. Superposition nach EC2 für Entlastung

Um den qualitativen Verlauf der Dehnung nach Entlastung besser interpretieren zu können, wurden die Kurven um den anfänglichen Messausfall bereinigt und auf einen gemeinsamen Ausgangspunkt verschoben.

Die im Fall der Entlastung normativ vorhergesagte Rückverformung bildet das tatsächliche Verformungsbestreben der Versuchskörper nach Entlastung nicht ausreichend ab. Keiner der drei Versuchskörper weist das normativ vorhergesagte Rückkriechen am Anfang der Entlastungsphase auf. Während der einstufig belastete Körper eine geringfügige Rückverformungstendenz zeigt, kann bei den mehrstufig belasteten Körpern keinerlei Rückkriechen abgelesen werden. Ganzheitlich betrachtet überschätzt die Nachrechnung das tatsächliche Rückverformungsbestreben nicht nur der mehrstufig belasteten Körper sondern auch des einstufig belasteten Zylinders.

In beiden Fällen (der Be- und Entlastung) kann mit der Nachrechnung der allgemeinen Superposition, unter Verwendung des Produktansatzes lt. EC2 für Druckkriechen, keine zufriedenstellende Übereinstimmung mit den realen Messwerten erzielt werden.

6.1.2 Ansatz TU-Graz

Die mit dem Ansatz der TU-Graz berechnete viskoelastische Zusatzverformung wird in weiterer Folge mit der gemessenen Verformung aus den beiden Versuchen verglichen. Dazu wurden wieder die um die elastische Verformung bereinigten Messwerte verwendet. Da die Be- und Entlastungsphase nicht aus der gleichen Versuchsdurchführung stammen, werden sie, wie auch schon bei der Nachrechnung mit der allgemeinen Superposition, getrennt betrachtet.

Die Berechnung der Kriechzahl basiert auf der derzeit gültigen Norm [1]. Es wird wieder angenommen, dass diese Regelung neben Druck- auch für Zugkriechen angewendet werden kann.

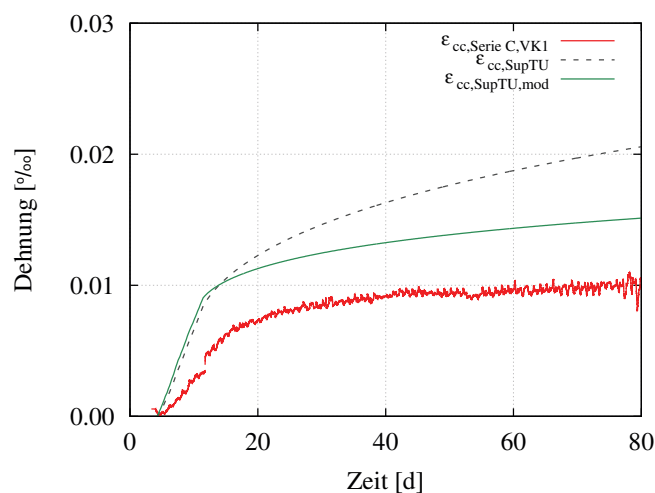


Abb. 6.4: Vergleich der viskoelastischen Zusatzverformungen von VK 1 mit der Nachrechnung lt. EC2 (Druckkriechen) und der Modifikation lt. Schlicke

Da bei früheren Zwangrahmenversuchen herausgefunden wurde, dass die Verwendung der Kriechkurven lt. Norm (Druckkriechen) für die Zugseite zu ungenauen Ergebnissen

führt, wurde für eine bessere Übereinstimmung mit der Versuchskurve lt. [11] folgende Modifikation vorgenommen werden:

- Reduktion der Endkriechzahl für Druckbelastungen um 70% für die Verwendung unter Zug
- Beschleunigung der Entwicklung der Zugkriechdehnung mittels Anpassung des im Zeitbeiwert β_c enthaltenen Exponenten von 0,3 auf 0,17.

Zu Beachten ist, dass durch die Modifikation der Versuchskurve bereits die Abweichungen des Zug- vom Druck-Elastizitätsmoduls berücksichtigt werden und die Berechnungen aus diesem Grund mit dem statischen E-Modul für die Druckseite von 34100 N/mm^2 durchgeführt werden können.

Der Vergleich der Messkurve für den Belastungszeitraum mit der Nachrechnung nach Eurocode 2, in der Abb. 6.4 grau strichliert dargestellt, zeigt wie auch schon in [4] festgestellt, wurde eine starke Überschätzung der zu erwartenden Kriechverformungen. Die modifizierte Kriechkurve lt. [11], in grüner Farbe abgebildet, überschätzt die tatsächliche Kriechdehnung ebenfalls, jedoch wird damit der Kurvenverlauf realistischer abgebildet.

In Abs. 6.1.1 wurde zur besseren Nachrechenbarkeit eine Bereinigung der qualitativen Messwertverläufe durchgeführt. Im Zuge der nachfolgenden Interpretation der Entlastungsphase werden wieder diese modifizierten Kurven (hellrot und blau) herangezogen.

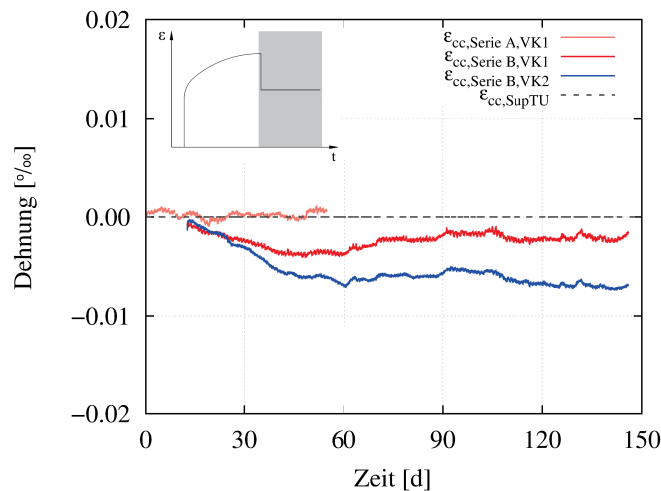


Abb. 6.5: Vergleich der Messwerte von VK 1 und 2 mit der Nachrechnung

Wie in Abb. 3.10 schematisch dargestellt ist, kommt es nach einer Vollentlastung neben der elastischen Rückverformung, welche von dem zu diesen Zeitpunkt vorherrschenden E-Modul abhängt, zu keinerlei viskoelastischer Zusatzverformungen mehr. Die Nachrechnung mittels Superposition des Ansatzes der TU-Graz Abb. 6.5 zeigt, dass dieses Verhalten vor allem bei Körpern mit einer vorangegangenen Spannungsgeschichte (in hell- und dunkelrot dargestellt) beobachtet werden kann.

7 Übertragung der Erkenntnisse auf eine Berechnung der typischen Spannungsgeschichte infolge Betonerhärtung

Die Erkenntnisse der vorangegangenen Versuche werden nachfolgend hinsichtlich ihrer Relevanz für die baupraktischen Berechnungen untersucht. Wie bereits im Abs. 3.8 erwähnt wurde, hat die Viskoelastizität des Betons einen wesentlichen Einfluss auf die Spannungsentwicklung von behinderten Betonbauteilen im Erhärtungs- und Nutzungszeitraum. Der Fokus der folgenden Nachrechnung liegt auf dem Zeitraum nach Erreichen der Ausgleichstemperatur. Bisherige Annahmen vom Abbau der Zwangsspannungen nach dem Erlangen der Ausgleichstemperatur stehen, wie in Abb. 7.1 schematisch dargestellt ist, im Widerspruch zu den aktuellen Erkenntnissen aus den experimentellen Untersuchungen.

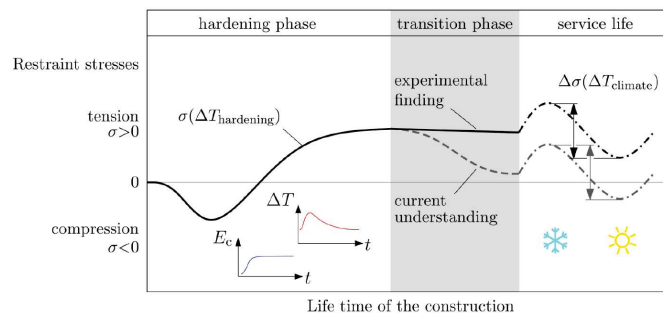


Abb. 7.1: Spannungsgeschichte eines verformungsbehinderten Betonbauteils [12]

Mittels dieser Nachrechnung werden die bisher bekannten Berechnungsmethoden (nach Trost und EC2) und der Ansatz der TU-Graz miteinander verglichen. Um die Ergebnisse besser gegenüber stellen zu können, wird von einem vollständig behindertem Bauteil und den folgenden Eingangsgrößen ausgegangen:

$f_{cm} = 43 \text{ N/mm}^2$	für C35/45
$E_{cm} = 34100 \text{ N/mm}^2$	Elastizitätsmodul
$RH = 60 \%$	relative Luftfeuchtigkeit
$h_0 = 1800 \text{ mm}$	wirksame Bauteildicke aus Abs. 5.6
$\rho = 0,8$	Relaxationsbeiwert nach Trost

Für die realistische Simulation des Zwangspannungsabbaus durch Relaxation bedarf es der Festlegung einer einwirkenden viskoelastischen Spannungsgeschichte. Abb. 7.2 zeigt in

rot dargestellt die schematische Nachbildung des, für die Nachrechnung angenommenen, Aufbaus der Zugzwangsspannung.

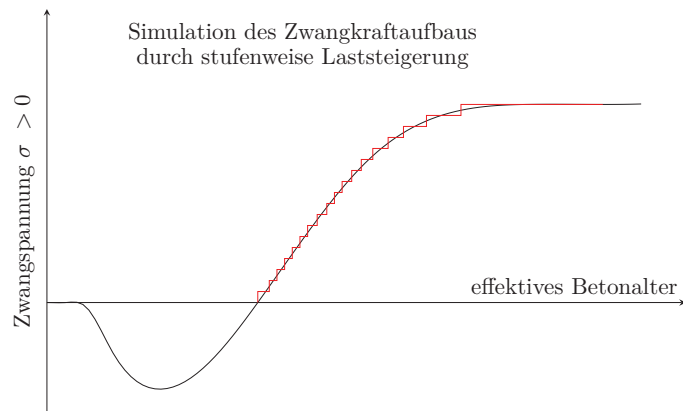


Abb. 7.2: schematische Nachbildung der Zwangsspannungsgeschichte

In Abb. 7.3 sind die Ergebnisse der Nachrechnung mittels der drei bekannten Methoden (allgemeine Superposition, Verfahren nach Trost und modifizierter Ansatz der TU-Graz) dargestellt.

Die bisherigen Erkenntnisse aus der Nachrechnung der Versuche zeigen, dass die Superposition mit dem *modifizierten Ansatz der TU-Graz* das viskoelastische Materialverhalten von gezwängten Systemen unter Zugbeanspruchung mit der besten Näherung widerspiegelt. Die grüne Kurve stellt die Nachrechnung auf Basis dieses Ansatzes dar. Im Vergleich zu den beiden anderen Verläufen zeigt sich hier bereits während der Hydratation ein viel geringerer Abbau der Zugzwangsspannung und in weiterer Folge auch eine höherer Restspannungsgehalt im Bauteil.

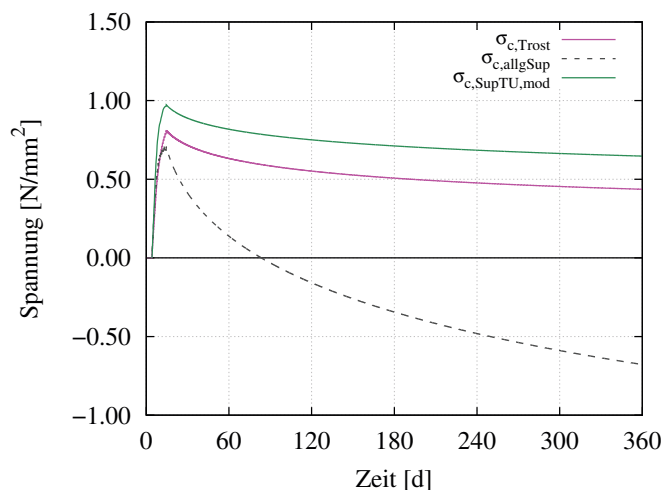


Abb. 7.3: Nachrechnung des Zwangsspannungsabbaus

Die grau strichlierte Linie stellt die Nachrechnung der Relaxation mithilfe der allgemeinen

Superposition dar. Die Annahme, dass die Kriechzahl lt. EN 1992-1-1 [1] neben Druck- auch für Zugkriechen angewendet werden kann, zeigt hier, im Vergleich zum Ansatz der TU-Graz, eine deutliche Überschätzung des Spannungsabbaus. Eine Umkehr der Zug- in Druckspannungen, was ungefähr nach 90 Tagen (3 Monate) geschieht, ist ebenfalls unrealistisch kann durch die gewonnenen Erkenntnisse widerlegt werden. Solange das System keine externe Einwirkung erfährt, wird die Gesamtspannung lediglich bis zu Null abgebaut.

Die dritte Methode, in magenta abgebildet, stellt das „Verfahren nach Trost“ dar. Auch in diesem Fall wird der Zugzwangsspannungsabbau während der Hydratation überschätzt, wenn auch in einem geringeren Ausmaß.

In Bezug auf die Bemessung von gezwängten Bauteilen können die bisher bekannten Methoden (allgemeine Superposition und Verfahren nach Trost) zu einer Unterschätzung der tatsächlich vorhandenen Spannungen und zu Ergebnissen auf der unsicheren Seite führen.

8 Zusammenfassung und Ausblick

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit dem Zugkriechen von Beton während der Be- und Entlastungsphase unter Berücksichtigung der vorangegangenen Belastungsgeschichte. Zu Beginn wurde eine ausführliche Literaturstudie durchgeführt, in der die Ursachen, Einflussfaktoren des Kriechens und die bestehenden Berechnungsmodelle näher untersucht wurden. Da das Kriechen immer zeitgleich mit dem Schwinden des Betons auftritt, erfolgte ebenfalls eine kurze Erläuterung der Schwindverformungen.

Der Fokus dieser Arbeit lag insbesondere auf der Durchführung, Auswertung und Nachrechnung der experimentellen Untersuchung des Zugkriechens. Im Zuge dessen sollte das Kriechverhalten von Beton, während der Be- und Entlastungsphase unter Berücksichtigung des Zwangsspannungsaufbaus infolge der Erhärtung, analysiert und ausgewertet werden. Der Versuchsaufbau besteht aus drei zylinderförmigen Probekörpern. Einer der drei Zylinder blieb unbelastet und diente zur Messung der Schwindverformungen, während die beiden anderen Körper mit einer Last von 10 kN versehen wurden. Die Belastung erfolgte bei Versuchskörper 1 in einem Schritt und bei Versuchskörper 2 durch mehrstufiges Absenken des Gewichts. Dieses Vorgehen sollte den langsamen Zugzwangsspannungsaufbau im Erhärtungszeitraum simulieren. Nach einer Belastungsphase von ungefähr vier Monaten wurden beide Körper in einem Schritt vollständig entlastet und blieben für die Verformungsmessung von weiteren fünf Monaten unbelastet.

Die Auswertung der Ergebnisse zeigt deutlich den Einfluss der Belastungsgeschichte auf die Entwicklung der Kriechdehnung. Trotz geringerem Betonalter bei Belastungsbeginn weist der mehrstufig belastete Körper kleinere Kriechverformungen auf als der zu einem späteren Zeitpunkt belastete Versuchskörper 2. Ursächlich dafür ist die Entwicklung der Kriechrate. Diese konvergiert beim mehrstufig belasteten Körper gegen einen niedrigeren Wert als jene des einstufig belasteten Zylinders.

Im Anschluss an die Auswertung wurden die Messergebnisse mittels allgemeiner Superposition nach Norm und Superposition mit dem „Ansatz der TU-Graz“ nachgerechnet und verglichen. Die Ergebnisse zeigten, dass die normativen Vorhersagemodelle für Druckkriechen die Entwicklung der Zugkriechdehnungen stark überschätzen. Diese Erkenntnis konnte im Be- aber auch im Entlastungszeitraum gemacht werden. Eine bessere Übereinstimmung der Nachrechnung mit den Messwerten konnte unter Anwendung des Ansatzes der TU-Graz und einer Modifikation der Kriechzahl für Zugkriechen erreicht werden.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die derzeit bestehenden Modelle lt. Norm für die Anwendung bei Zugkriechen nicht geeignet sind, da sie zu einer Überschätzung der zu erwartenden Kriechdehnungen und in Verbindung damit auch zu einer Überschätzung der zu erwartenden Relaxation bei gewängten Bauteilen führen. Bei der Bemessung von zwangbeanspruchten Systemen ist daher besondere Vorsicht geboten, um nicht Ergebnisse auf der unsicheren Seite zu erhalten.

Literaturverzeichnis

- [1] 1992-1-1, EN: *Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken - Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau*. 2015. – Ausgabe:2015-02-15
- [2] ATRUSHI, D. S.: *Tensile and Compressive Creep of Early Age Concrete: Testing and Modelling*, Department of Structural Engineering, NTNU Trondheim, Diss., 2003
- [3] DELSAUTE, B.: *New approach for Monitoring and Modelling of the Creep and Shrinkage behaviour of Cement Pastes, Mortars and Concretes since Setting Time*, Université Libre de Bruxelles, Belgium and Université Paris-Est, France, Diss., 2017
- [4] DORFMANN, E. M.: *Zugkriechen von Beton in Abhängigkeit der Spannungsgeschichte*, Institut für Betonbau, Technische Universität Graz, Diplomarbeit, 2017
- [5] GUTSCH, A.-W.: *Stoffeigenschaften jungen Betons - Versuche und Modelle*, Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz, Technische Universität Braunschweig, Diss., 1998
- [6] HEINRICH, P.: *Analytische Berücksichtigung viskoelastischer Betoneigenschaften bei der Ermittlung der Zwangsspannungen von erhärtenden Betonbauteilen unter teilweiser Verformungsbehinderung*, Institut für Betonbau, Technische Universität Graz, Diplomarbeit, 2012
- [7] MÜLLER, H. S. ; REINHARDT, H.-W.: Beton. In: *Beton-Kalender 2010: Brücken - Betonbau im Wasser*. Ernst & Sohn, Berlin, 2010, S. S.291–436. – ISBN 978-3-433-02931-2
- [8] NOTHNAGEL, R. ; TWELMEIER, H.: *Baustoff und Konstruktion*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2013
- [9] RANAIVOMANANA, N. ; MULTON, S. ; TURATSINZE, A.: Tensile, compressive and flexural basic creep of concrete at different stress levels. In: *Cement and Concrete Research* Band 52 (2013), S. S.1–10
- [10] ROSSI, P. ; TAILHAN, J.-L. ; MAOU, F. L.: Comparison of concrete creep in tension and in compression: influence of concrete age at loading and drying conditions. In: *Cement and Concrete Research* Band 51 (2013), S. S.78–84
- [11] SCHLICKE, D.: *Mindestbewehrung für zwangbeanspruchten Beton*, Institut für Betonbau, Technische Universität Graz, Diss., 2014
- [12] SCHLICKE, D. ; TURNER, K. ; TUE, N. V.: Decrease of Tensile Creep Response under Realistic Restraint Conditions in Structures. In: *CONCREEP 10: Mechanics Physics of Creep, Shrinkage, and Durability of Concrete and Concrete Structures*, American Society of Civil Engineers, 2015, S. S.1333–1339. – ISBN 978-0-7844-7934-6

-
- [13] STRUCTURAL CONCRETE (FIB), International F.: *Structural Concrete: Textbook on Behaviour, Design and Performance: Updated Knowledge of the CEB/FIP Model Code 1990*. 1999. – ISBN 2-88394-041-X
- [14] TAILHAN, J.-L. ; BOULAY, C. ; ROSSI, P. ; MAOU, F. L. ; MARTIN, E.: Compressive, tensile and bending basic creep behaviour related to the same concrete. In: *Structural Concrete 14* Bd. Heft 2. Wilhelm Ernst & Sohn, Berlin, 2013, S. S.124–130
- [15] TROST, H.: Auswirkungen des Superpositionsprinzips auf Kriech- und Relaxationsprobleme bei Beton und Spannbeton. In: *Beton- und Stahlbetonbau* Bd. Heft 10. Wilhelm Ernst & Sohn, Berlin, 1967, S. S.230–238
- [16] WESCHE, K.: *Baustoffe für tragende Bauteile, Band 2: Beton und Mauerwerk*. Vieweg+Teubner Verlag, 1993
- [17] ZILCH, K. ; ZEHETMAIER, G.: *Bemessung im konstruktiven Betonbau*. Bd. Nr. 2. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2010. – ISBN 978-3-540-70637-3