

ENDBERICHT

FFG Projektnummer	860138	FörderungsnehmerIn	Österreichische Bautechnik Vereinigung
Bericht Nr.	1	Berichtszeitraum	01.02.2019 - 31.01.2020
Bericht erstellt von	Dipl.-Ing. Michael Pauser		

Richtwert für den Umfang: 10-20 Seiten

• Ziele und Ergebnisse

Die Planung von dauerhaften und wirtschaftlichen Bauwerken aus Stahlbeton und Spannbeton erfordert die Bereitstellung von wirklichkeitsnahen und praxistauglichen Modellen zur Beschreibung des Materialverhaltens von Beton. Im Planungsstadium ist die zutreffende Modellierung der durch das Abfließen der Hydratationswärme und der durch Schwind- und Kriechprozesse ausgelösten Vorgänge im jungen Beton entscheidend für die spätere Dauerhaftigkeit von Ingenieurbauwerken. Auch die Gebrauchstauglichkeitseigenschaften, wie zum Beispiel die Durchbiegungen in weitgespannten Tragwerken, werden maßgeblich durch eine genaue Beschreibung der Materialeigenschaften im Planungsstadium beeinflusst. Obwohl dem planenden Ingenieur heute durch die Eurocodes umfassende Normenwerke zur Verfügung stehen, sind die Angaben in den Normen zur Beschreibung des Verhaltens des Betons im Bauwerk oft nicht ausreichend genau. Beispielsweise beträgt der Variationskoeffizient für durch Schwinden und Kriechen hervorgerufene Bauteilverformungen ca. 30 %. Maßgebliche Gründe dafür sind unzureichend erfasste Maßstabs- und Betonrezeptureinflüsse. Das Ziel des Forschungsprojekts war die Entwicklung von Modellen und Methoden, die den planenden Ingenieur in die Lage versetzen, das spätere Verhalten des tatsächlichen Bauwerks genauer zu modellieren.

Zur Erreichung dieses Projektziels wurden vier Versuchsserien mit großformatigen Betonprismen und entsprechende Vergleichsproben für Laboruntersuchungen unter Baustellenbedingungen hergestellt. Die Betonprismen wurden im Freien gelagert, wobei sie durch eine Überdachung vor direkter Sonneneinstrahlung und vor Niederschlag geschützt sind. Während der Freilagerung erfolgte eine durchgängige Aufzeichnung des Umgebungsklimas (Temperatur, relative Luftfeuchte). Die Betonprismen weisen alle die gleiche Länge (3,0 m), aber unterschiedliche quadratische Querschnittsabmessungen mit Seitenlängen von 1,0 m, 0,5 m und 0,25 m auf. Die Messung der Kriech- und Schwindverformungen, des Elastizitätsmoduls und des Temperatúrausdehnungskoeffizienten in den ersten drei Forschungsjahren und der Vergleich mit den Messergebnissen der Laboruntersuchungen ermöglichte die Bestimmung der Materialeigenschaften (AP6) und einen Vergleich der Materialkennwerte mit den Werten gemäß EC 1992-1-1 und *fib* MC 2010 (AP7). Die Unstimmigkeiten zwischen den Messdaten und den originalen Vorhersagemodellen wurden analysiert. Anschließend wurden, basierend auf den physikalischen Theorien, die bestehenden Modelle weiterentwickelt (AP8). Die erreichten Erkenntnisse führten zu den Empfehlungen, die während der Planungsphase angewendet werden können, um das Verhalten der Konstruktionen besser zu approximieren (AP9). Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass die im dritten Forschungsjahr angestrebten Ziele erreicht werden konnten.

• Arbeitspakete und Meilensteine

2.1 Übersichtstabellen

In dem Förderansuchen wurde der Projektbeginn mit 01.01.2017 angenommen. Das Projekt wurde ab dem 01.02.2017 gefördert. In dem Förderansuchen wurde im Abschnitt 6 ein Zeitplan für das Gesamtprojekt angegeben. Der Fertigstellungsgrad in der nachfolgenden Tabelle bezieht sich auf das Gesamtprojekt.

Tabelle 1: Arbeitspakete

AP Nr.	Arbeitspaket Bezeichnung	Fertigstellungsgrad	Basistermin		Aktuell		Erreichte Ergebnisse / Abweichungen
			Anfang	Ende	Anfang	Ende	
1	Projektmanagement	100%	02/17	01/20	02/17	01/20	Die Projektabwicklung wurde ordnungsgemäß durchgeführt.
2	Wissenschaftliche Leitung	100%	02/17	01/20	02/17	01/20	Wissenschaftliche Leitung erfolgte durch die TU Wien und das KIT.
3	Recherche derzeitiger Kennwerte	100%	02/17	01/19	02/17	01/19	Die Untersuchungen zur Herkunft der Angaben im Eurocode zur Bestimmung der Materialkennwerte sind abgeschlossen.
4	Herstellung Probekörper	100%	02/17	04/18	02/17	04/18	Die Versuchskörper aller vier Serien wurden hergestellt. Das komplette Monitoring für die Bestimmung der Materialeigenschaften wurde eingerichtet.
5	Charakterisierung Gesteinskörnung	100%	02/17	07/18	02/17	07/18	Die Charakterisierung der Gesteinskörnung aller Versuchsserien wurde durchgeführt.
6	Bestimmung Materialeigenschaften	100%	02/17	01/20	02/17	01/20	Bei den großformatigen Versuchskörpern wurde ein kontinuierliches Monitoringsystem mit Schwing-saitensensoren installiert. Damit können die Betonverzerrungen vom Zeitpunkt Null (Körperherstellung) an überwacht werden. Gleichzeitig wurden die Betonstauchungen mittels Setzdehnungsmessungen dokumentiert. Die aktuelle Vorspannkraft, die Temperatur der Versuchskörper, die Lufttemperatur und die relative Luftfeuchtigkeit wurden ebenfalls aufgezeichnet. Normgemäße Probekörper (Betonzylinder) wurden hergestellt und unter Laborbedingungen geprüft. Die Druckfestigkeit, die Elastizitätsmoduli und die Kriech- und Schwindverformungen wurden an den Laborversuchskörpern bestimmt.
7	Vergleich Materialkennwerte	100%	09/17	01/20	09/17	01/20	Die Messergebnisse der Dehnungsentwicklung an den Betonzylindern und an den großformatigen Betonprismen wurden mit den theoretischen Modellen des EC 1992-1-1 und MC2010 verglichen.
8	Entwicklung Materialmodelle	100%	02/18	01/20	02/18	01/20	Es wurde ein neues Upgrade des EC 1992-1-1 und MC2010 Kriechmodells, Schwindmodells und Modells des Ausdehnungs-

							koeffizienten vorgestellt, welches die Entwicklung unter dem Einfluss der Veränderung der Umgebungsbedingungen realitätsnah beschreibt.
9	Empfehlungen	100%	02/19	01/20	02/19	01/20	Die erreichten Erkenntnisse führten zu den Empfehlungen, die während der Planungsphase angewendet werden können, um die Konstruktionen besser zu approximieren

Tabelle 2: Meilensteine

Es wurden keine Meilensteine im Projekt definiert.

2.2 Beschreibung der im Berichtszeitraum durchgeführten Arbeiten

Arbeitspaket 1: Projektmanagement

Die Abwicklung des Projekts wurde kontrolliert und dokumentiert.

Arbeitspaket 2: Wissenschaftliche Leitung

Die wissenschaftliche Leitung wurde von Professor Kollegger (TU Wien) und Professor Müller (KIT) durchgeführt.

Arbeitspaket 3: Recherche zur Herkunft der derzeitigen Kennwerte im Eurocode

AP 3 wurde erfolgreich im Jahr 2018 abgeschlossen und im Endbericht von 2018 zusammengefasst.

Arbeitspaket 4: Herstellung der Probekörper und Frischbetonuntersuchungen

AP 4 wurde erfolgreich im Jahr 2018 abgeschlossen und in den Endberichten von 2017 und 2018 zusammengefasst.

Arbeitspaket 5: Charakterisierung und Bestimmung der Eigenschaften der Gesteinskörnungen

AP 5 wurde erfolgreich im Jahr 2018 abgeschlossen und in den Endberichten von 2017 und 2018 zusammengefasst.

Arbeitspaket 6: Experimentelle Bestimmung der Betonmaterialeigenschaften

Bestimmung des Ausdehnungskoeffizienten mittels der großformatigen Betonkörper

Der Ausdehnungskoeffizient des Betons α_c wird meistens in einem Labor, durch das Messen der Verformung zwischen zwei Temperaturzuständen des Versuchskörpers, bestimmt. Die im Projekt eingesetzte, hochgenaue Messtechnik hingegen erlaubte die Bestimmung des Ausdehnungskoeffizienten anhand der natürlichen Tagestemperaturschwankungen. Für die Analyse wurden nur jene Tage herangezogen, bei denen die Temperaturdifferenz ΔT im betrachteten Betonkörper mindestens 6 °C betrug. In Abbildung 1 ist zu beobachten, dass der Ausdehnungskoeffizient α_c kontinuierlich variiert. Die Veränderung des Ausdehnungskoeffizienten α_c über die Zeit, ist auf die Auswirkungen der Veränderungen der klimatischen Bedingungen zurückzuführen. Bei dem kleinsten Körper der Versuchsserie S1 variierte der Ausdehnungskoeffizient α_c zwischen $10,1 \cdot 10^{-6}$ (Winter) und $12,4 \cdot 10^{-6}$ [K⁻¹] (Sommer). Die Schwankung des Ausdehnungskoeffizienten α_c beträgt somit bei dem gewählten Beton unter den vorherrschenden klimatischen Bedingungen ca. 20% [4].

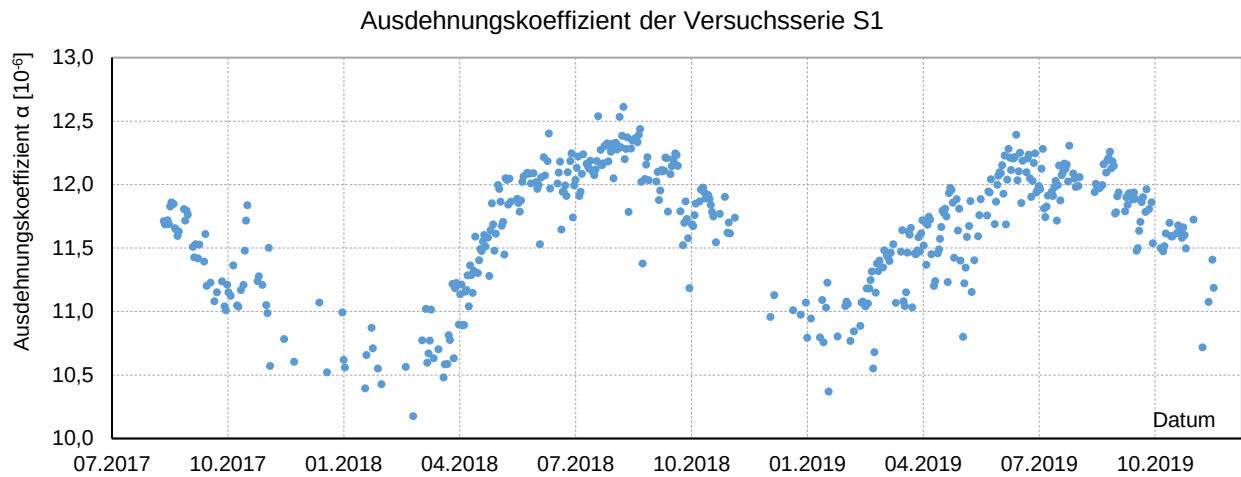


Abbildung 1 : Gemessene Ausdehnungskoeffizienten des kleinen Körpers der Versuchsserie S1 [4]

Reale Schwindstauchungen der großformatigen Probekörper

Um die realen Schwindstauchungen zu bestimmen, muss ein Modell für die Separation der Verzerrungen in Folge der Temperatur von den Messdaten der nicht vorgespannten Probekörper angewendet werden. Da der üblich angewendete Wert des Ausdehnungskoeffizienten des Betons ($\alpha_c = 10 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$) um ca. 25% von dem realen Wert (siehe AP 6 Bestimmung des Ausdehnungskoeffizienten mittels großformatiger Betonkörper) abweicht, wurde ein Modell für den Ausdehnungskoeffizienten entwickelt, das berücksichtigt, dass der Koeffizient selbst von der Temperatur abhängig ist (siehe AP8 Bestimmung des Ausdehnungskoeffizienten mittels der großformatigen Betonkörper). Für jede Versuchsserie wurde eine eigene lineare Funktion des Ausdehnungskoeffizienten berechnet. Dadurch wurde erzielt, dass der Einfluss der Temperatur in der Schwindkurve weniger als 5% beträgt [4].

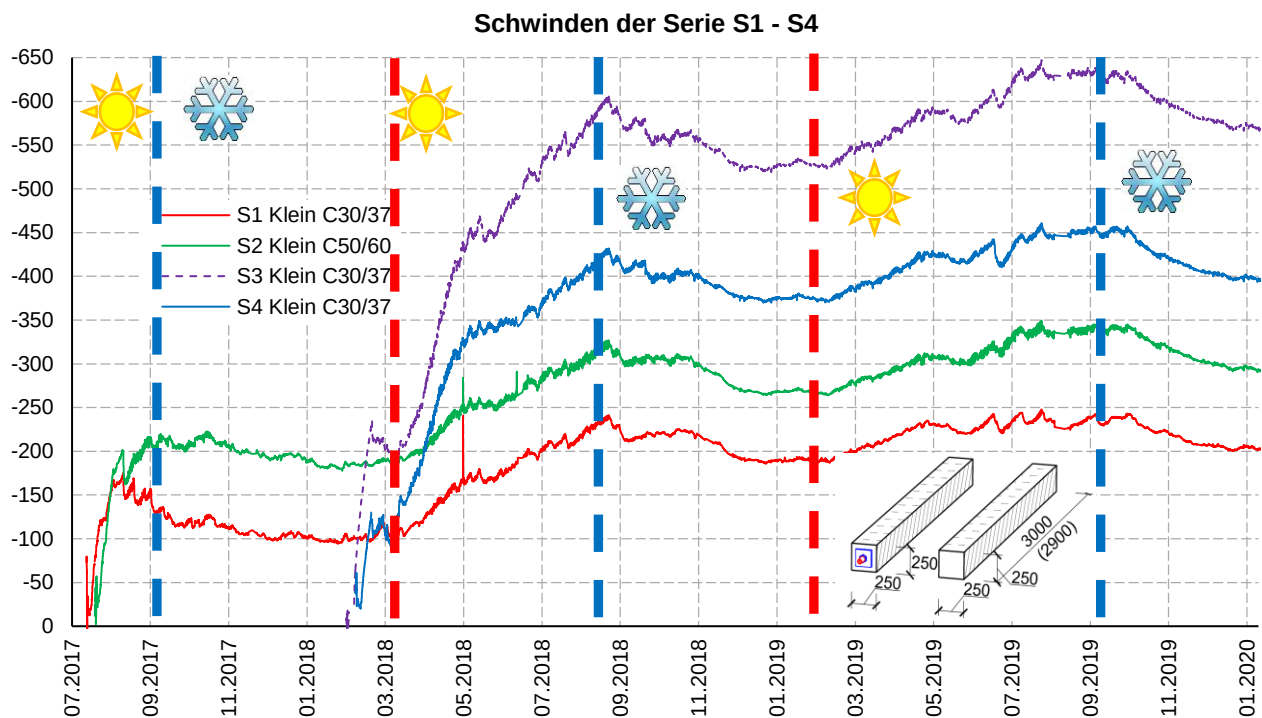


Abbildung 2 : Reale Schwindkurve der kleinen Probekörper von allen Versuchsserien. Die dicken vertikalen Linien verdeutlichen die Grenzen ab wann die Perioden mit erhöhten oder negativen Schwindgradienten beginnen [4].

Feuchtigkeitsmesssystem der großformatigen Probekörper

Die Modelle des EC 1992-1-1 [1] und des MC 2010 [2] für das Kriechen und Schwinden gehen von einer durchschnittlichen Feuchtigkeit des Querschnitts aus. Damit die Theorie der Modelle (AP 8, drei Modellansätze für die Veränderung der Umgebungsbedingungen beim Schwinden) überprüft werden kann, ist es notwendig die Feuchtigkeit im Beton zu messen. Bis dato wird der Feuchtigkeitsgehalt im Betonquerschnitt nicht berücksichtigt im speziellen dessen Verteilung im Betonquerschnitt.

Die marktüblichen Feuchtigkeits-Datalogger finden ihre Anwendung in Luftfeuchtigkeitsmessungen oder für die Messung der Feuchtigkeit an einer Oberfläche von Objekten. Fernando Acosta Urrea beschreibt in seiner Dissertation [7] die Anwendung von Luftfeuchtigkeitssensoren für die Messung der Feuchtigkeit von einem Betonkörper (Sensoren wurden in Löchern im Beton installiert). Für das Kriechen und Schwinden Projekt musste eine Outdoor Lösung entwickelt werden, die es ermöglichen würde mit vielen Sensoren gleichzeitig Messungen durchzuführen. Die gewünschten Anforderungen erfüllte ein programmierbarer Micro-Controller Arduino Mega, an den 11 Feuchtigkeit - Temperatur DHT 22 Sensoren (siehe Abbildung 3 b)), ein Micro SD Card Modul, ein Real Time Clock Modul und ein Display für die direkte Überwachung der Messdaten (siehe Abbildung 4) angehängt wurden. Die Messgenauigkeit der Sensoren wurde mit Testo 174H verglichen und als ausreichend bewertet.

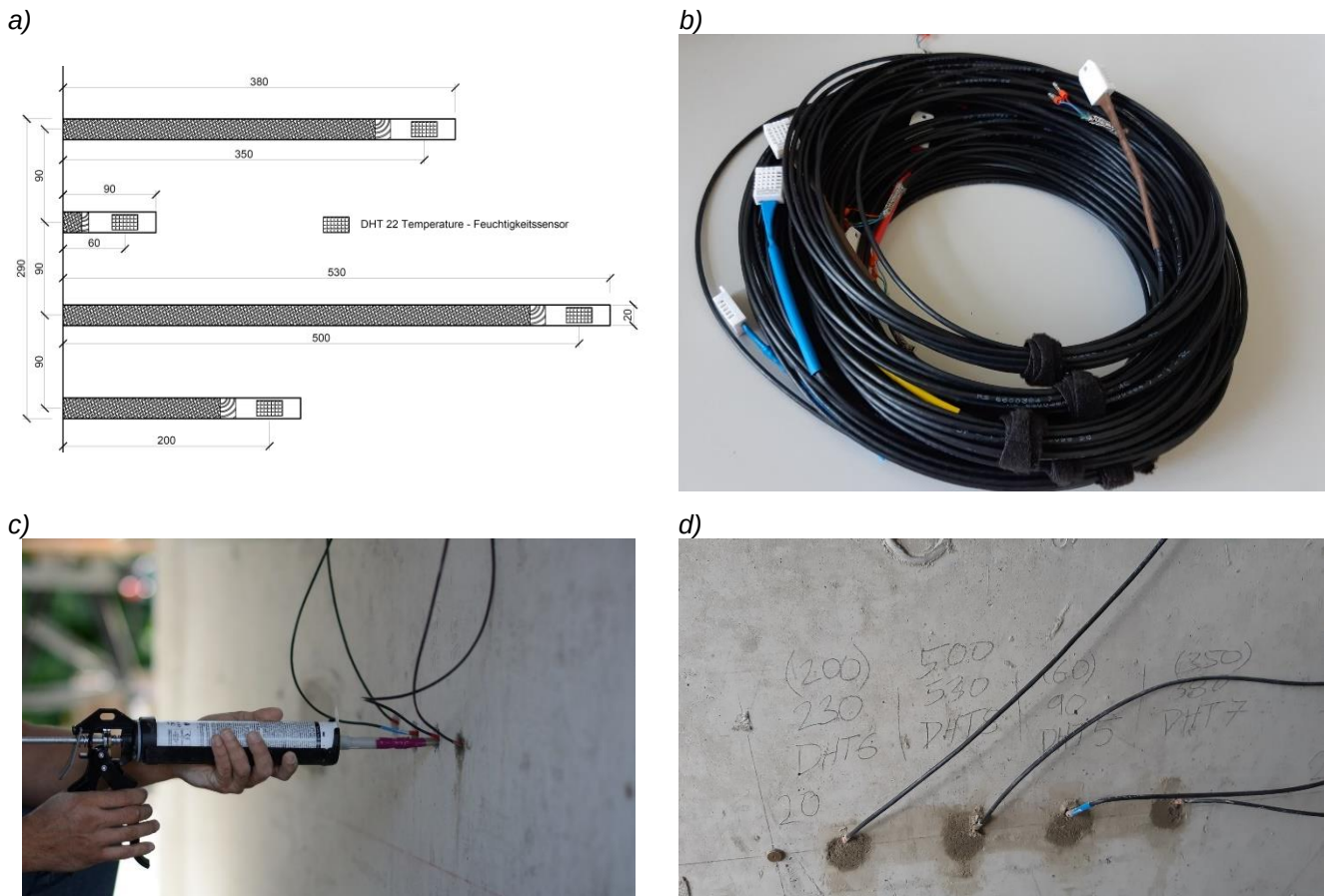


Abbildung 3 : a) Schema der eingebauten Sensoren in dem großen Probekörper der Serie S1 b) Die Temperatur - Feuchtigkeit Sensoren DHT 22. c) Versiegelung der eingebauten Sensoren d) Nach der Versiegelung der Sensoren.

In die großen Probekörpern der Versuchsserie S1 wurden vier Sensoren pro Körper eingebaut (siehe Abbildung 3 c) und d)), zwei Sensoren wurden in den nicht vorgespannten Kleinkörper der Serie S1 eingebaut und ein weiterer Sensor wurde zur Messung der Umgebungsbedingungen angebracht. Die Positionierung der Sensoren in dem großen Körper ist Abbildung 3 a) zu entnehmen. Das Loch hinter den Sensoren wurde mit Vergussmörtel PAGEL V1/10 versiegelt.

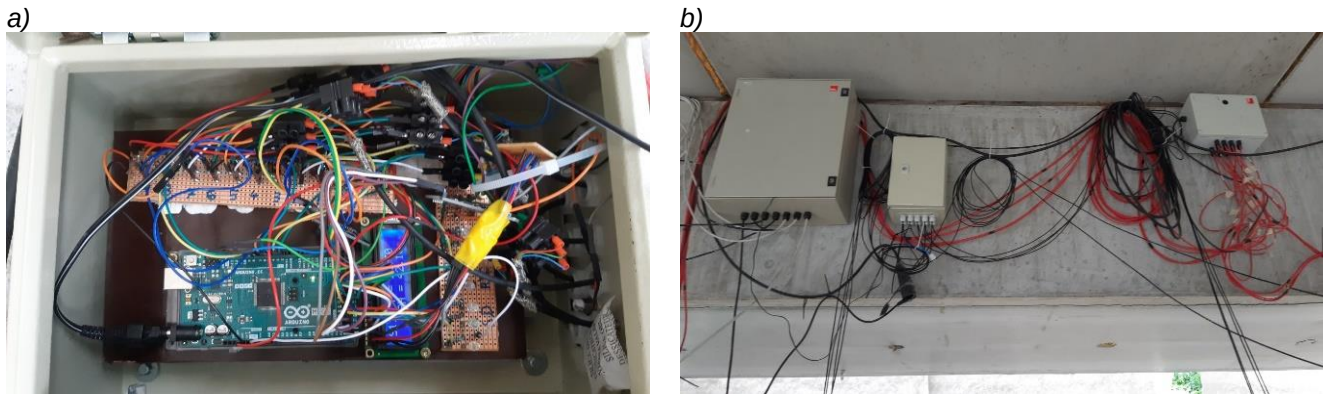


Abbildung 4 : a) Datalogger Arduino Mega nach der Verkabelung mit den Sensoren b) Befestigung des Dataloggers und der bestehenden Messtechnik an dem Träger der Überdachung.

Arbeitspaket 7: Vergleich der im Labor und im Freien gemessenen Materialkennwerte mit den Werten gemäß EC 2 und fib Model Code

Schwindmodell nach EC 1992-1-1 und MC 2010

Durch die Überwachung der großformatigen Probekörper, die im Freien gelagert wurden, konnten viele interessante Phänomene beobachtet werden. Es konnte gezeigt werden, dass die bestehenden gültigen Modelle den realen Verlauf der Schwindentwicklungen nur unzureichend beschreiben. Die Versuchsserie S1 wurde im Sommer 2017 betoniert ($f_{cm} = 41,4$ MPa). Theoretisch hätten sich die Versuchskörper der Versuchsserie S4 ($f_{cm} = 44,4$ MPa), nachdem sie in genau demselben Werk mit genau derselben Betonrezeptur (nur anstatt im Sommer, im Winter 2018) hergestellt wurden, identisch zu denen der Serie S1 verhalten sollen. In Abbildung 5, entspricht der Zeitpunkt Null dem Betonieren der Versuchskörper. Es ist der Abbildung klar zu entnehmen, dass der Verlauf des Schwindens und das maximale Schwindmaß sich sehr unterschiedlich entwickelten. Zweihundert Tagen nach Herstellung der Betonkörper wichen die Schwindstauchungen um mehr als 400% voneinander ab, obwohl es sich um theoretisch gleiche Versuchskörper handelte. Diese große Differenz der Messergebnisse kann nicht mit einer Schwindfunktion beschrieben werden (siehe die grüne Linie in der Abbildung 5). Damit ein besserer Einklang zwischen den gemessenen Daten und dem theoretischen Modell erzielt wird, muss der Einfluss der Umgebungsbedingungen in das Modell implementiert werden [4] (siehe AP 8, Schwinden - drei Modellansätze für die Veränderung der Umgebungsbedingungen beim Schwinden).

Schwinden der kleinen Körper der Versuchsserie S1 und S4

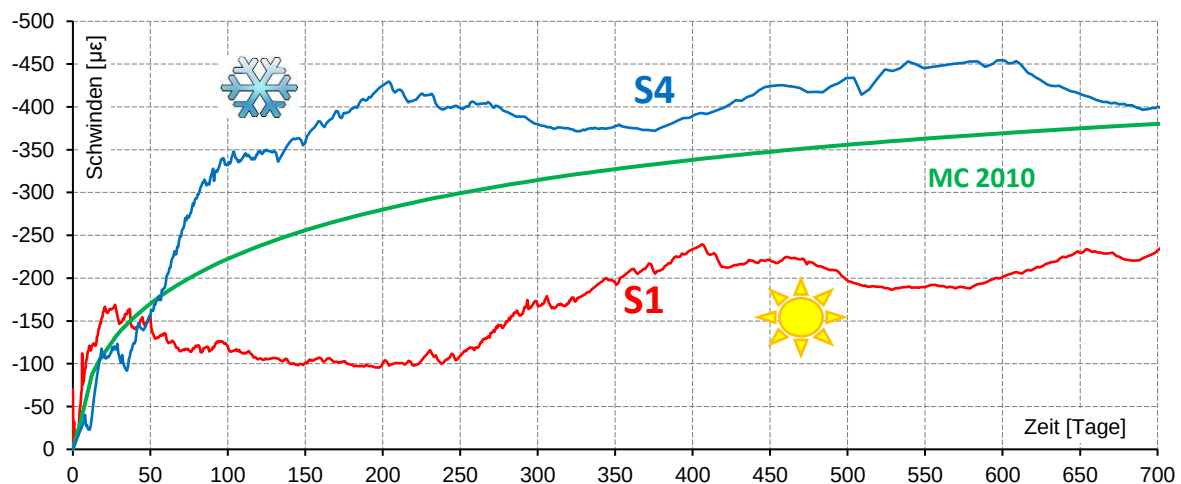


Abbildung 5 : Vergleich des Schwindens der Versuchsserien S1 und S4 mit dem theoretischen Modell des MC 2010 [2].

Arbeitspaket 8: Entwicklung von geeigneten Betonmaterialmodellen zur Beschreibung des Kriechens und Schwindens sowie für E_c und α_T von in Österreich verwendeten Betonen

Bestimmung des Ausdehnungskoeffizienten mittels der großformatigen Betonkörper

Abbildung 1 in AP6 verdeutlicht, dass der Ausdehnungskoeffizient von einem anderen Parameter, der sich periodisch während des Jahres ändert, abhängig ist. Während der Analyse der ausgewerteten Ausdehnungskoeffizienten von Temperaturschwankungen wurde festgestellt, dass der Ausdehnungskoeffizient stark von der Temperatur selbst abhängig ist. Die Abhängigkeit ist für die unterschiedlichen Jahrestemperaturen näherungsweise linear (siehe Abbildung 6) [4].

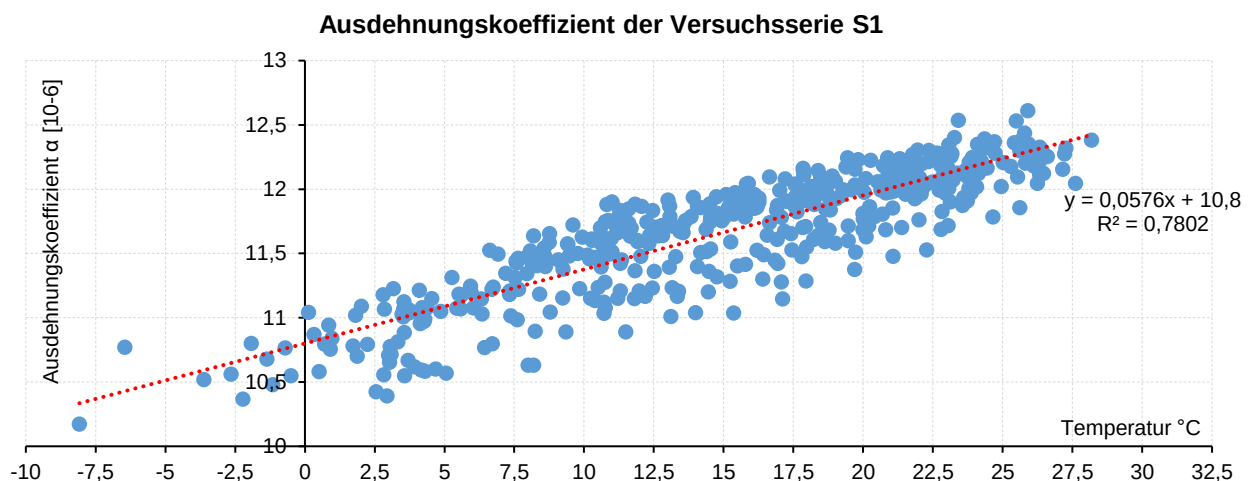


Abbildung 6 : Die gemessenen Ausdehnungskoeffizienten in Abhängigkeit der mittleren Betontemperatur des kleinen Betonkörpers der Versuchsserie S1 und eine lineare Approximation der Messergebnisse [4].

Drei Modellansätze für die Veränderung der Umgebungsbedingungen beim Schwinden

Die veränderlichen Umgebungsbedingungen spielen eine wichtige Rolle für die Entwicklung der Schwindstauchungen (siehe Abbildung 5). In den bestehenden Modellen des EC 1992-1-1 [1] und des MC 2010 [2] gibt es keine Theorie oder Erläuterung, die beschreibt wie man von einer Schwindfunktion mit einer vorgegebenen Luftfeuchtigkeit physikalisch korrekt zu einer neuen Schwindfunktion mit einer anderen Luftfeuchtigkeit übergeht. Diese Problemstellung ist in Abbildung 7 a) dargestellt und zeigt eine theoretische Situation, in der sich die Umgebungsbedingungen mit mehrmaliger Wiederholung von 40% relativer Luftfeuchtigkeit zu 85% rasch ändern. Die Aufgabe bestand darin die drei entwickelten Modellansätze zu prüfen und eine Lösung für eine realistische Beschreibung des physikalischen Verhaltens zu finden [4], [6].

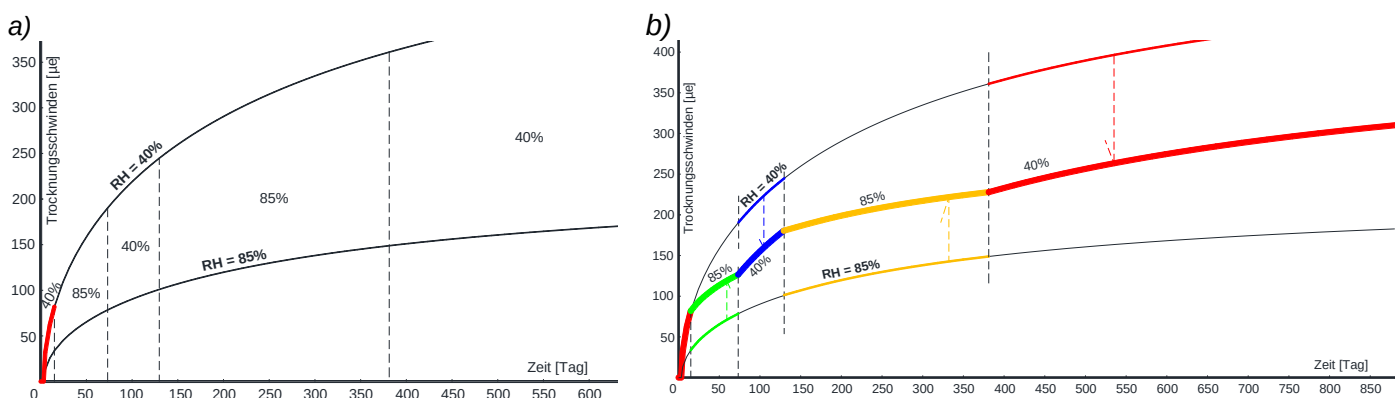


Abbildung 7 : a) Problemstellung - die wechselnde Umgebungsfeuchtigkeit zwischen 40% und 85%. b) Erster Modellansatz - Verbindung der Schwindfunktion in der vertikalen Richtung [4].

➤ Erster Modellansatz - Verbindung der Schwindfunktionen in der vertikalen Richtung

Die Verbindung der Schwindfunktionen in vertikaler Richtung ist die einfachste Möglichkeit für den Berechnungsprozess. Diese vereinfachte Annahme verändert die Gradienten des Schwindens (siehe Abbildung 7 b)). Dieser Modellansatz bildet eine durchschnittliche Lösung, die sich zwischen den Schwindfunktionen befindet. Obwohl die Lösung nicht als physikalisch korrekt angesehen werden kann, wird der Ansatz am häufigsten in der Praxis angewendet. Physikalisch betrachtet besagt dieser Ansatz, dass das Schwinden nur vom Alter eines Betonkörpers und der Umgebungsfeuchte abhängig ist. Laut diesem Modell würde die Betonprobe weiter schwinden, auch wenn die Feuchtigkeit innerhalb des Betons kleiner wäre als die Umgebungsfeuchtigkeit, ein Zustand der eigentlich zu einem Quellen der Struktur führt. Dieser Modellansatz kann somit nicht für die Schwindanalyse von Beton empfohlen werden [4], [6].

➤ Zweiter Modellansatz - die Diffusionstheorie

Der zweite Modellansatz - die Diffusionstheorie (siehe Abbildung 8 a)), ermöglicht es, basierend auf physikalischen Gleichungen, die Veränderung der Umgebungsfeuchte zu beschreiben. Die benutzten Gleichungen wurden vom zweiten Fickschen Gesetz abgeleitet und nützen die durchschnittliche mittlere Feuchtigkeit der Probekörper für einen physikalisch begründbaren Übergang zwischen den Schwindfunktionen. Obwohl diese Theorie sehr realitätsnah die Entwicklung des Schwindens der großformatigen Probekörper beschreibt, kann sie bei extremen Werten zu fehlerhaften Ergebnissen führen. Dieses Problem wurde mittels dem dritten Modellansatz gelöst. Die umfassende Beschreibung des zweiten Modellansatzes ist in [4], [6] zu finden.

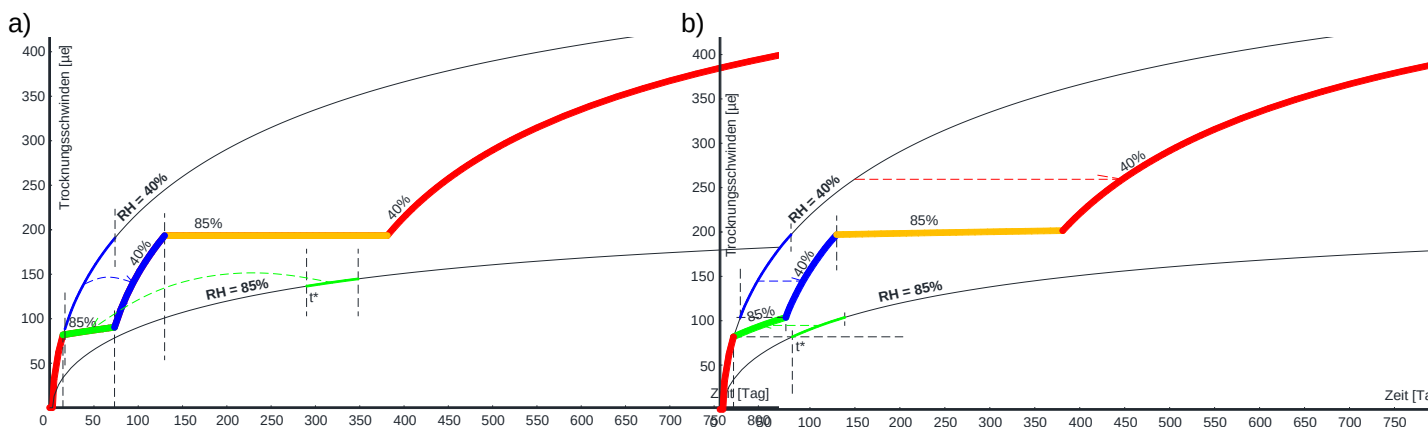


Abbildung 8 : Grafisch dargestellter Berechnungsprozess a) Zweiter Modellansatz - Diffusionstheorie b) Dritter Modellansatz - die Proportionalität des Trocknungsschwindens und der inneren Körperfeuchtigkeit.

➤ Dritter Modellansatz - die Proportionalität des Trocknungsschwindens und der inneren Körperfeuchtigkeit

Im dritten Modellansatz wird angenommen, dass es eine Proportionalität zwischen der Trocknungsschwinddehnung und der inneren Betonfeuchtigkeit gibt. Aus der Größe der Trocknungsschwinddehnung ist es möglich, die innere Feuchtigkeit im Betonkörper rückzurechnen. Die Entwicklung des Trocknungsschwindens laut MC 2010 [2] wird mit der Gleichung (1) beschrieben.

$$\varepsilon_{cds}(t, t_s) = \varepsilon_{cds}(f_{cm}) \cdot \beta_{RH}(RH) \cdot \beta_{ds}(t - t_s) \quad (1)$$

$\beta_{ds}(t-t_s)$	Funktion zur Beschreibung des Verlaufs des Trocknungsschwindens
$\varepsilon_{cds}(f_{cm})$	Koeffizient, der die Größe des Trocknungsschwindens in Abhängigkeit von der Betongüte berücksichtigt
$\beta_{RH}(RH)$	Koeffizient, der den Einfluss der Luftfeuchtigkeit auf die Größe des Trocknungsschwindens beschreibt
$\varepsilon_{cds}(t, t_s)$	Trocknungsschwinden des Betons zum Zeitpunkt „t“
t	das Betonalter zum betrachteten Zeitpunkt in Tagen
t_s	das Betonalter in Tagen am Beginn der Trocknungsphase

Der erste Term $\varepsilon_{\text{cds}}(f_{\text{cm}})$ der Gleichung (1) beschreibt die Struktur des Betons und bleibt über die ganze Berechnung konstant. Der zweite Term $\beta_{\text{RH}}(\text{RH})$ beschreibt den Einfluss der Umgebungsbedingungen auf das Trocknungsschwinden. Der dritte Term $\beta_{\text{ds}}(t-t_{\text{s}})$ kommt aus der Diffusionstheorie und fand bereits seinen Einsatz im zweiten Modellansatz (siehe [4] und [6]). Im dritten Modellansatz wird dieser Term gleich eins gesetzt, entsprechend der Situation des zu hundertprozentig abgeschlossenen Trocknungsschwindens. In diesem Fall ist der Term $\varepsilon_{\text{cds}}(t, t_{\text{s}})$ der Gleichung (1) zeitunabhängig ($\beta_{\text{ds}}(t-t_{\text{s}}) = 1$) und zeigt nur den Wert des maximalen Trocknungsschwindens für den gegebenen Beton f_{cm} und für die gegebene Umgebungsfeuchte RH an [4].

Die Annahme der Proportionalität zwischen Trocknungsschwinddehnung und der inneren Betonfeuchtigkeit ermöglicht die Verbindung der Schwindfunktionen auf der physikalischen Ebene. In Wirklichkeit werden die Schwindfunktionen in horizontaler Richtung verbunden, weil die Feuchtigkeitslinien horizontal verlaufen (siehe Abbildung 8 b) und [4]).

Maßstabseffekt der großformatigen Betonkörper mit dem weiterentwickelten MC 2010 Modell

Die Messungen an den Probekörpern von allen vier Serien wurden mit den Berechnungen mittels des weiterentwickelten Modells MC 2010 [2] (dritter Modellansatz) verglichen. In Abbildung 9 ist der Vergleich des weiterentwickelten Modells mit den Messdaten der Versuchsserie S1 - S4 dargestellt.

Bei dem kleinen Körper der Versuchsserie S1 ist ein starker Effekt des Quellens zu erkennen (siehe rote durchgezogene Linie). Das Quellen bewirkt, dass das Schwinden von dieser Serie stark reduziert wurde und bei den Berechnungen mit allen theoretischen Modellen überschätzt wird. Das reale Schwinden von dem großen Körper (siehe blaue durchgezogene Linie) ist bei dieser Serie so klein, dass es nur dem Anteil des Grundswindens entsprechen würde [4].

Bei der Versuchsserie S2 (siehe Abbildung 9) ist ein guter Einklang der Messdaten und des weiterentwickelten Modells (MC 2010 [2]) des kleinen Körpers sichtbar. Auch bei dieser Serie kann man den Einfluss des Quellens beobachten (die rote Linie ab Tag 60 bis Tag 180). Das weiterentwickelte Modell ermöglicht eine realitätsnahe Beschreibung der Bereiche mit einer beschleunigten oder reduzierten Schwindgeschwindigkeit. Überraschenderweise sind die gemessenen Daten des Schwindens der mittleren und großen Körper sehr ähnlich (grüne und blaue durchgezogene Linie). Bei der Analyse der Rohdaten ist zu sehen, dass ein am Rand des mittleren Versuchskörpers angeordneter Schwingsaitensensor viel kleinere Schwindstauchungen aufzeichnete, als die anderen zwei. Die Ursache dafür ist unklar [4].

Bei der Herstellung der Versuchsserie S3 hatte das Baustellenlabor zu spät erfahren, dass die Konsistenz des Betons zu flüssig war. Zu diesem Zeitpunkt waren die großen Probekörper schon betoniert. Der Beton hatte trotz der zu flüssigen Konsistenz die richtige Festigkeit ($f_{\text{cm},\text{S3}} = 42,1 \text{ MPa}$), ähnlich der der Versuchsserien S1 ($f_{\text{cm},\text{S1}} = 41,4 \text{ MPa}$) und S4 ($f_{\text{cm},\text{S4}} = 44,4 \text{ MPa}$), und einen ähnlichen E-Modul ($E_{\text{cm},\text{S1},6\text{Tag}} = 28,3 \text{ GPa}$, $E_{\text{cm},\text{S3},6\text{Tag}} = 28,4 \text{ GPa}$, $E_{\text{cm},\text{S4},6\text{Tag}} = 27,3 \text{ GPa}$). Bedingt durch die schlechte technologische Zusammenstellung des Betons, wies der Beton jedoch große Kriech- und Schwindverformungen auf. Um diese Tatsache zu berücksichtigen, wurde das weiterentwickelte Modell des MC 2010 [2] mit einem Multiplikator von 1,8 versehen, damit der Einklang zwischen dem Modell und den Messdaten in den Gradienten erreicht werden konnte. In Abbildung 9 (S3) ist ebenfalls zu erkennen, dass das originale Vorhersagemodell ohne Multiplikator für den großen Probekörper sehr gut mit den Messdaten übereinstimmt [4].

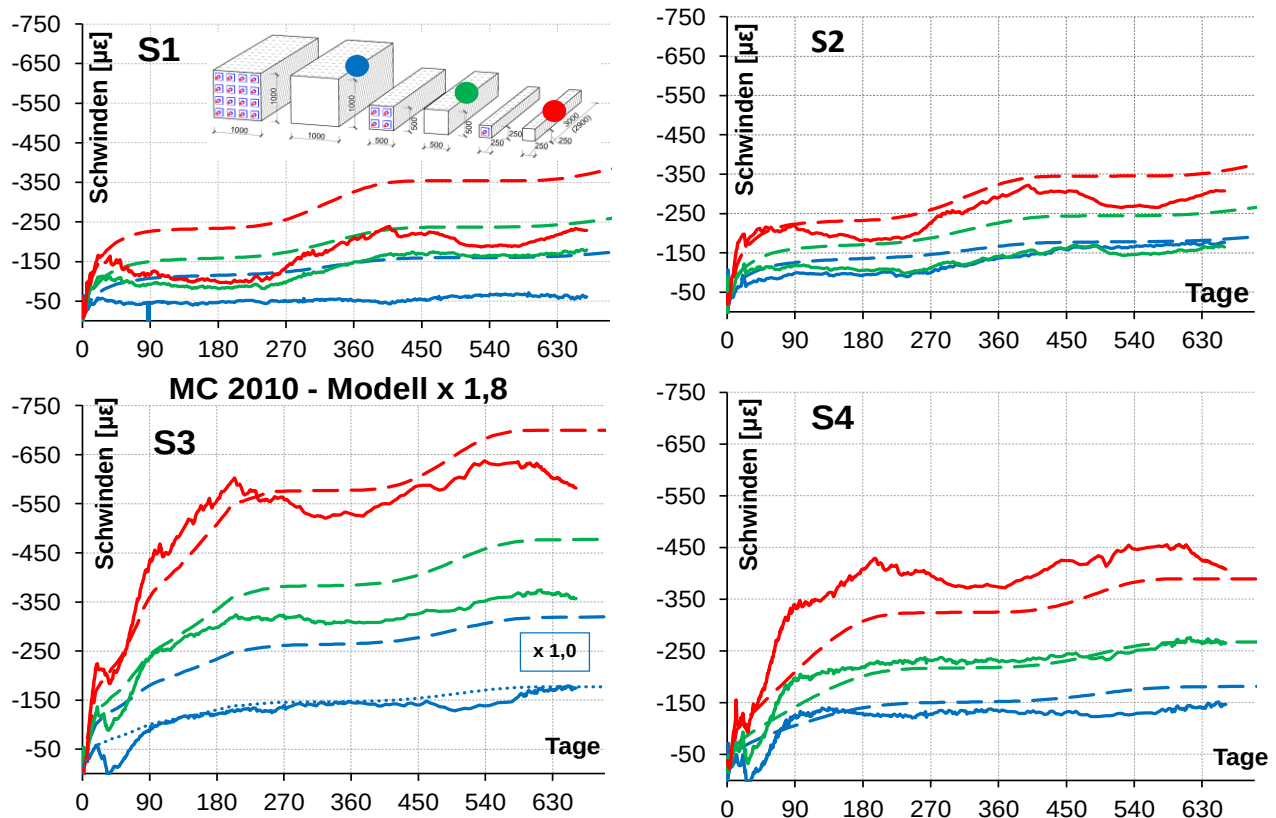


Abbildung 9 : Maßstabseffekt des Schwindens der Versuchsserien S1 - S4 [4].

Versuchsserie S4 wies größere Schwindestauchungen auf als die Versuchsserien S1 und S2 (siehe Abbildung 9). Wie bereits in den vorherigen Versuchsserien, waren auch bei dieser Versuchsserie die Effekte des Quellens zu beobachten. Der Effekt ist klar ablesbar ab Tag 12 nachdem die Probekörper von der Halle ins Freie transportiert wurden (Februar 2018) und zusätzlich ab ca. Tag 200, mit dem Anfang der nächsten feuchten und kalten Periode. Bei der Winterserie ist der Effekt des Quellens nicht so stark ersichtlich wie bei den Sommerserien. Die Sommerserien waren nur zwei Monate der starken Hitze ausgesetzt, um sich dann für eine längere Zeit in der Kälteperiode auszuruhen. Die Winterserien waren weniger als zwei Monate durch die Winterzeit beeinflusst um dann der ganzen Sommerperiode exponiert zu sein, was höchstwahrscheinlich zu den größeren Schwindestauchungen im Vergleich zu den Sommerserien führte [4].

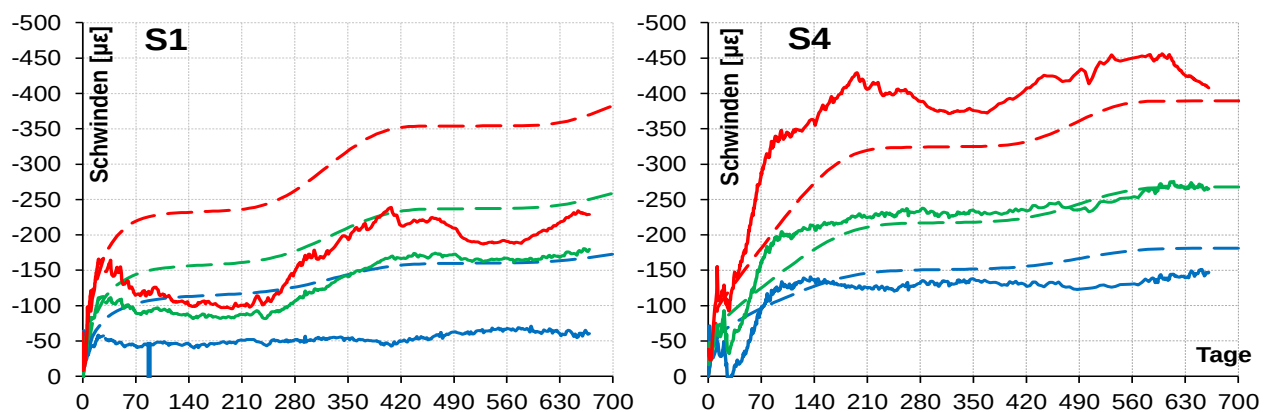


Abbildung 10 : Schwinden der Versuchsserie S1 und S4. [4]

Nur mit der Veränderung des Datums in dem weiterentwickelten Vorhersagemodell des Schwindens, verändert sich der vorhergesagte Wert des Schwindens um bis zu 42% zum Zeitpunkt 210 Tage ($\epsilon_{sc,S1} = 225 \mu\epsilon$, $\epsilon_{sc,S4} = 320 \mu\epsilon$) und auch dadurch approximiert das weiterentwickelte Vorhersagemodell die Messdaten besser (siehe Abbildung 10) als das originale Modell siehe (Abbildung 5) [4].

Diffusions- und Wahrscheinlichkeitssimulation

Die beschriebenen Kriech- und Schwindmodelle arbeiten mit einer durchschnittlichen Feuchtigkeit des Betonquerschnitts. Um ein besseres Verständnis von Austrocknung des Betonquerschnitts und der Diffusionstheorie zu erhalten, wurde ein einfaches numerisches Programm der Diffusionssimulation entwickelt. In der Berechnung wird der Betonquerschnitt durch ein orthogonales Netz beschrieben. Die Feinheit des Netzes stellt die Feinheit der Berechnung und gleichzeitig die Zeitachse ein. Die Zeitachse wurde durch den Diffusionskoeffizienten C_1 laut [3] ermittelt [4].

Die numerische Wahrscheinlichkeitssimulation

Die numerische Wahrscheinlichkeitssimulation analysiert den Transport der Wassermoleküle und bestimmt, mit welcher Wahrscheinlichkeit ein theoretisches Wassermolekül seine Position von der analysierten mittleren Zelle des Netzes (3×3) (siehe Abbildung 11 a)) zu einer bestimmten Nachbarzelle des Netzes im Zeitabschnitt t_{num} (siehe Abbildung 11 b)) verändert. Bei der Simulation wurden insgesamt 23×10^6 Moleküle generiert. Die Startkoordinaten jedes Moleküls wurden von Microsoft Excel Random Nummer Generator generiert. Jedem Molekül wurde eine zufällige Richtung und Länge zugeordnet. Die Maschenweite l_{Masch} ist die maximale Länge, die die Moleküle zurücklegen können. Nachdem alle Moleküle ihre neue Position erreicht hatten (siehe Abbildung 11 b)), wurden sie in den einzelnen Zellen des Netzes (3×3) aufsummiert wodurch eine prozentuelle Wahrscheinlichkeit, wo sich die Moleküle nach dem Zeitschritt t_{num} befinden, bestimmt werden konnte. Die Ergebnisse der Analyse sind in Tabelle 3 dargestellt.

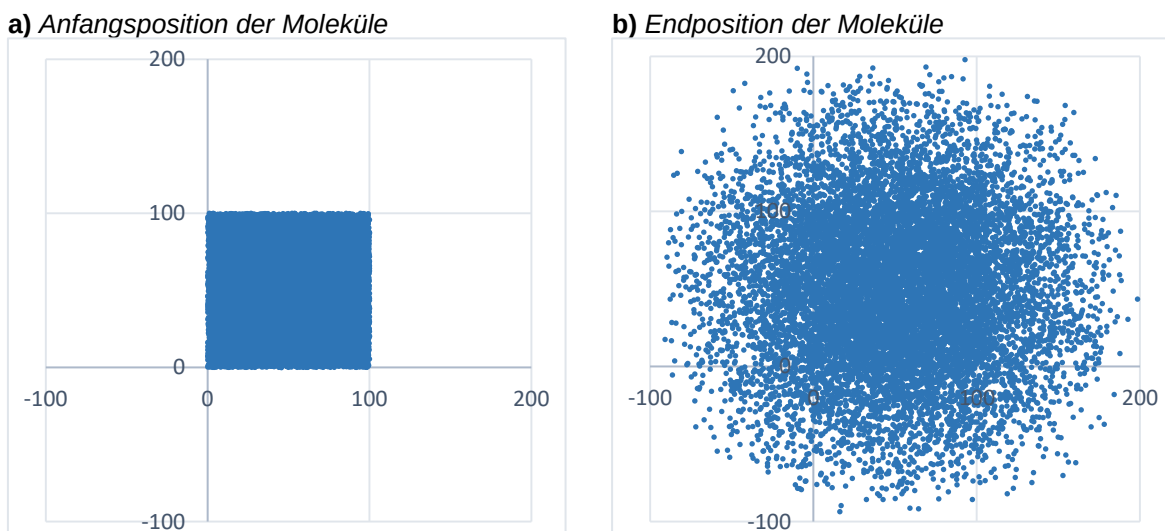


Abbildung 11 : Die Wahrscheinlichkeitstheorie a) Die Anfangsposition - in der mittleren Zelle wurde 23×10^6 Wassermoleküle generiert (am Bild sind nur 12 000 dargestellt). b) die Endposition der Wassermoleküle nach einem Zeitabschnitt t_{num} . [4]

Tabelle 3: Die Wahrscheinlichkeit, der Veränderung der Position eines Wassermoleküls ausgehend vom zentralen grauen Feld, innerhalb eines Zeitschrittes t_{num}

2,654 %	10,614 %	2,654 %
10,614 %	46,928 %	10,614 %
2,654 %	10,614 %	2,654 %

Um die numerische Diffusionssimulation zu verifizieren, wurde die Ergebnisse mit dem analytischen Modell von Bažant [3] verglichen. Es wurde die Austrocknung einer unendlich langen Wand simuliert. Im analytischen Modell musste eine Initiierungsfunktion (Sinusfunktion) angegeben werden. In der Diffusionssimulation wurde die Wand beginnend mit einer vollen Sättigung analysiert. Ab dem Zeitpunkt, an dem die Wand eine ähnliche Feuchtigkeitsverteilung wie die Initiierungsfunktion des analytischen Modells erreichte hatte, wurden die Modelle gegenübergestellt (siehe strichpunktierte Linien in Abbildung 12).

Beide Modelle, mit deren Ergebnissen dargestellt in Abbildung 12, zeigen den gleichen Verlauf der relativen Luftfeuchtigkeit über die Wandbreite während der Austrocknung auf (analytische Lösung - rot, numerische Lösung - blau). Die Breite der Wand ist in beiden Modellen ein virtueller Parameter, der nur über die Zeitachse mit realen Dimensionen verbunden ist [4].

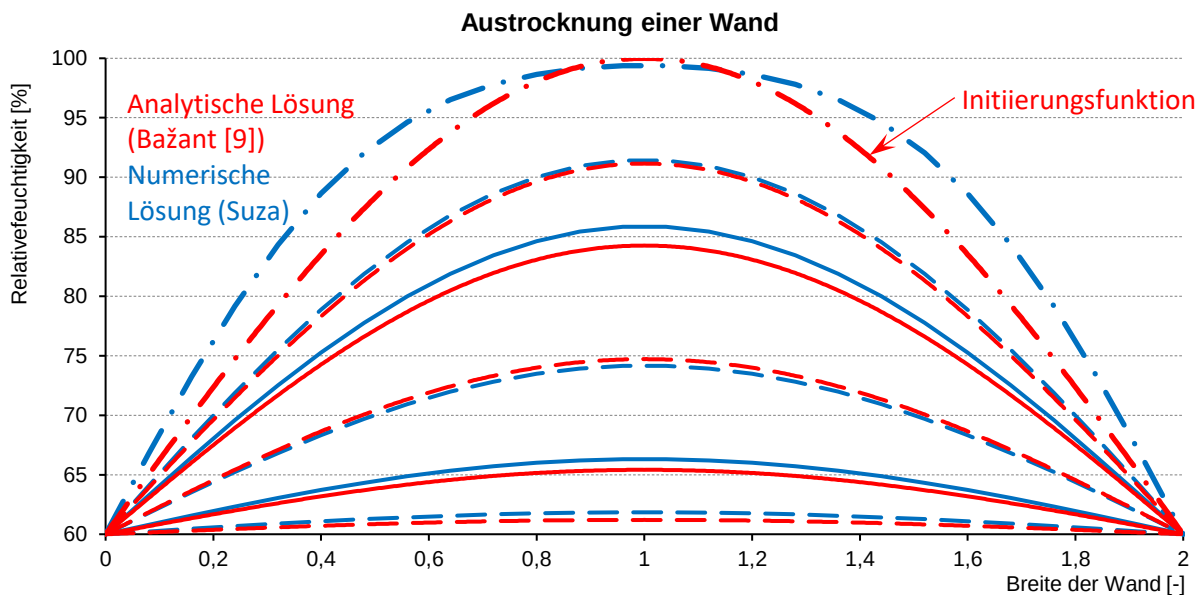


Abbildung 12 : Austrocknung einer Wand bei konstanten Umgebungsbedingungen. Vergleich des analytischen (Bažant [9]) und numerischen (Suza) Modells [4].

Arbeitspaket 9: Erarbeitung von Empfehlungen für die Annahmen von E_c und α_T sowie für die zeitliche Entwicklung der Schwind- und Kriechverformungen bei der Planung von Bauwerken

Einfluss der veränderlichen Umgebungstemperatur auf das Kriechen und Schwinden

Kriech- und Schwindstauchungen sind abhängig von den Umgebungsbedingungen. Nichtsdestotrotz sind bestehende Modelle nicht in der Lage diese Tatsache realitätsnah zu beschreiben. Die Kriechmodelle nach EC 1992-1-1 [1] und MC 2010 [2] beinhalten eine Gleichung (2) zur Berücksichtigung der Veränderung der Temperatur vor der Belastung für das Kriechen, die besagt, dass das Betonalter durch die Temperatur, die auf den Betonkörper wirkt, beeinflusst wird. Gleichung (2) wurde mittels der Arrhenius Gleichung, die die Geschwindigkeit der physikalischen und chemischen Prozesse in Temperaturabhängigkeit beschreibt und durch die Aktivierungsenergie gesteuert wird, hergeleitet. In den Normmodellen wird Gleichung (2) nicht für die Kriechentwicklung nach der Belastung berücksichtigt, da nur wenige Labor-Kriech-Experimente, bei denen der Einfluss der Temperatur nach der Belastung auf die Kriechentwicklung untersucht wurde, vorhanden sind.

$$t_T = \sum_{i=1}^n \Delta t_i \cdot \exp \left[13,65 - \frac{4000}{273 + T(\Delta t_i)} \right] \quad (2)$$

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

Bei der Arrhenius Gleichung ist die Aktivierungsenergie ein wichtiger Steuerparameter. Die Aktivierungsenergie hängt von der Rezeptur des Betons ab, wobei der Wert variieren kann. Aus diesem Grund wurde für die Forschungsarbeit die originale Gleichung (2) in ihre allgemeine Form umgeschrieben (Gleichung (3)). Mit der Vergrößerung der Aktivierungsenergie in Gleichung (3) kam es zu einer Steigerung der Empfindlichkeit des Betons in Bezug auf Temperaturveränderungen. Durch die Anwendung von Gleichung (2) bzw. Gleichung (3) kam es jedoch zu keiner Beeinflussung der maximalen Kriechstauchungen zum Zeitpunkt t_∞ , sondern nur zu einer Veränderung der Geschwindigkeit der durchgeführten Prozesse.

Die Berücksichtigung von Gleichung (2) bzw. Gleichung (3) ermöglicht eine Anpassung der Gradienten der

Vorhersagemodelle (EC 1992-1-1 [1] und MC 2010 [2]) wodurch ein Einklang mit den Messdaten, hauptsächlich in den ersten Lebensjahren der Konstruktion, in denen der Winterkriechstillstand am markantesten wirkt, zustande kommt [4], [5].

$$t_T = \sum_{i=1}^n \Delta t_i \cdot \exp \left[C - \frac{A}{273 + T(\Delta t_i)} \right] \quad (3)$$

A	Aktivierungsenergie
C	Konstante - siehe Gleichung (4))
t_T	das temperaturangepasste Betonalter
Δt_i	die Anzahl der Tage, in denen die Temperatur T vorherrscht
$T(\Delta t_i)$	die Temperatur in °C im Zeit-Intervall Δt_i

$$C = \frac{A}{293} \quad (4)$$

Schwinden - Veränderung der Luftfeuchtigkeit

Die veränderlichen Umgebungsbedingungen spielen eine wichtige Rolle in der Entwicklung der Schwindstauchungen. In den bestehenden Modellen des EC 1992-1-1 [1] und des MC 2010 [2] gibt es keine Theorie oder Erläuterung, die die Möglichkeit beschreibt von einer Schwindfunktion mit einer vorgegebenen Luftfeuchtigkeit zu einer neuen Schwindfunktion mit einer anderen Luftfeuchtigkeit physikalisch korrekt überzugehen. Im Zuge dieses Projekts wurden drei Modellansätze für eine realistische Beschreibung des physikalischen Verhaltens des Schwindens während der Veränderung der relativen Luftfeuchtigkeit RH vorgestellt.

Bei dem ersten Modellansatz wurden die Schwindfunktionen in der vertikalen Richtung verbunden. Diese vereinfachte Annahme verändert die Gradienten des Schwindens (siehe Abbildung 7 b) und bildet eine durchschnittliche Lösung zwischen den Schwindfunktionen. Zu beachten ist jedoch, dass der Ansatz nicht physikalisch korrekt ist, obwohl er in der Praxis die häufigste Anwendung findet.

Der zweite Modellansatz, basierend auf der Diffusionstheorie (siehe Abbildung 8 a)), und somit auf physikalischen Gleichungen, ermöglicht es die Veränderung der Umgebungsfeuchte zu beschreiben. Abgeleitet vom zweiten Fickschen Gesetz ermöglichen die gewählten Gleichungen den Übergang zwischen der Schwindfunktionen unter Verwendung der durchschnittlichen Luftfeuchtigkeit im Betonkörper p_{RH} . Trotz der sehr realitätsnahen Beschreibung der Entwicklung des Schwindens der großformatigen Probekörper, können bei extremen Werten fehlerhafte Ergebnisse vorkommen [4]. Dieses Problem wurde mittels dem dritten Modellansatz gelöst.

Der dritte Modellansatz ermöglicht eine realitätstreue Modellierung der Entwicklung der Schwindstauchungen unter veränderlichen Umgebungsbedingungen (Luftfeuchtigkeit) auf einer physikalischen Basis (siehe Abbildung 8 b)). Die zusätzliche Annahme der Proportionalität zwischen Trocknungsschwinden und der inneren Betonfeuchtigkeit erlauben die Schwindfunktionen in der horizontalen Richtung zu verbinden und die Behebung der physikalischen Fehler des zweiten Modellansatzes. Obwohl der zweite und dritte Modellansatz von komplett unterschiedlichen Theorien abstammen, liefern sie ähnliche Ergebnisse. Zu beachten ist jedoch, dass die Steuerungsfunktionen des dritten Modellansatzes nur empirisch sind, was gewissermaßen als Nachteil zu sehen ist.

Analyse des Maßstabeffekts

Die weiterentwickelten Vorhersagemodelle des MC 2010 [2], basierend auf der Diffusionstheorie, liefern eine gute Beschreibung der Entwicklung der Kriech- und Schwindstauchungen und des Maßstabeffektes. Für die sofortige Implementierung einer neuen Theorie streuen die gemessenen Ergebnisse der Schwindstauchungen jedoch noch zu stark. Die Messperiode für die großen Probekörper ist noch zu kurz und die Menge der Probekörper nicht zahlreich genug, um eine eindeutige Empfehlung für die Weiterentwicklung des Modells des Maßstabeffekts zu verfassen.

Bestimmung des E-Moduls an den großformatigen Betonkörpern

Im Labor können die Probekörper bei der Bestimmung des E-Moduls des Betons relativ rasch belastet werden. Die Vorgaben der Normen wurden so getroffen, damit der Einfluss des Kriechens minimiert wird. Bei einer realen Baukonstruktion kann das Aufbringen der Belastung im Zuge der Bauphasen Minuten, Stunden oder sogar Tage dauern. Um den E-Modul des Betons von den Kriechanteilen zu trennen, kann eine numerische Analyse des Belastungsprozesses durchgeführt werden. Die Analyse ermöglicht es, den Kriechanteil aus den Messdaten zu separieren und im gleichen Atemzug den tatsächlichen E-Modul, der dann mit den Normwerten beziehungsweise mit den im Labor bestimmten Werten vergleichbar ist, zu bestimmen.

Der höchste E-Modul, vergleicht man nur die großformatigen Prüfkörper, konnte bei den großen Prüfkörper und der geringste E-Modul bei den kleinsten Prüfkörpern festgestellt werden. Eine Abhängigkeit des E-Moduls von den Abmessungen eines Probekörpers ist weder in den Normen noch in der sonstigen Literatur beschrieben. Als Erklärung kann der Einfluss der entwickelten Hydratationswärme angenommen werden. Diese unterschiedlichen Randbedingungen werden ähnliche Auswirkungen auf die Betoneigenschaften haben, wie eine Wärmebehandlung in einem Betonfertigteilwerk [4].

Bestimmung des Ausdehnungskoeffizienten an den großformatigen Betonkörpern

Das Einbauen von hochgenauer Messtechnik in die einzelnen großformatigen Betonkörper erlaubte die Bestimmung des Ausdehnungskoeffizienten anhand der natürlichen Tagestemperaturschwankungen. Abbildung 1 ist zu entnehmen, dass der Ausdehnungskoeffizient kontinuierlich variiert. Die Schwankungen des Ausdehnungskoeffizienten, ist auf die Auswirkungen der Veränderungen der klimatischen Bedingungen zurückzuführen. Der Ausdehnungskoeffizient des kleinsten Körpers der Versuchsserie S1 pendelte zwischen $10,5 \cdot 10^{-6} [K^{-1}]$ (Winter) und $12,5 \cdot 10^{-6} [K^{-1}]$ (Sommer).

Während der Analyse wurde festgestellt, dass der Ausdehnungskoeffizient stark von der Temperatur selbst abhängig ist. Die Abhängigkeit ist für die normalen Jahrestemperaturen linear (siehe Abbildung 6). Die Ergebnisse der Analyse zeigen, dass bei einer Annahme des Ausdehnungskoeffizienten laut EC 1992-1-1 [1] und MC 2010 [2] bei der angewendeten Betonrezeptur mit einer Abweichung von bis zu 25% gerechnet werden muss. Wird anstatt dem Wert aus den Normen der Mittelwert aus den Versuchen verwendet verkleinert sich die Abweichung zu 10%. Dieser Annahmefehler kann weiter durch die Anwendung einer linearen Gleichung, die von der Temperatur abhängig ist, auf 5% verringert werden. Eine lineare Funktion zur Berechnung des Ausdehnungskoeffizienten ist auch in der Praxis realisierbar. Basierend auf den experimentellen Ergebnissen aller vier Versuchsserien stammt ein einfaches lineares temperaturabhängiges Modell des Ausdehnungskoeffizienten (siehe Gleichung (5)), das für normale Konstruktionen angewendet werden kann [4].

$$\alpha_c = 11 + 0,05 \cdot T \quad (5)$$

α_c Ausdehnungskoeffizient des Betons bei aktueller Temperatur T [$\cdot 10^{-6} K^{-1}$]
 T die aktuelle Temperatur des Betonkörpers [$^{\circ}C$]

Anwendung der weiterentwickelten Modelle des Kriechens und Schwindens in der Praxis

Die vorgestellten weiterentwickelten Kriech- und Schwindmodelle brauchen zusätzliche Parameter, Angaben der genauen Temperatur- und Luftfeuchtigkeitsschwankungen, die den normalen Bauingenieuren in der Praxis nicht zu Verfügung stehen. In Österreich sind viele meteorologische Messstationen, die es ermöglichen Temperaturverläufe mit dazugehöriger Luftfeuchtigkeit für gewünschte Zeiträume herunterzuladen. Diese Messdaten können mit einer guten Genauigkeit mit einer einfachen Wettervorhersagefunktion (Sinusfunktion) approximiert werden und nachträglich als Vorhersagefunktion angewendet werden. Würde die Vorhersagefunktionen für Temperatur und der Luftfeuchtigkeit automatisch in die Programme eingespeist werden, so würden für die Anwendung der weiterentwickelten Modelle nur noch zwei zusätzliche Parameter erforderlich sein; der Standort der Baustelle (GPS Koordinaten) und der Baubeginn, danach könnten alle erforderlichen Angaben für die Modelle automatisch importiert werden [4].

- [1] Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken, Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau, ÖNORM EN 1992-1-1, 01.07.2009
- [2] fib Model Code 2010, International Federation for Structural Concrete (fib), Lausanne, Schweiz, 2013
- [3] BAŽANT, Z. und Jirásek M.: Creep and Hygrothermal Effects in Concrete Structures, Springer, ISBN 978-94-024-1136-2, 2018
- [4] SUZA, D.: „Einfluss des Maßstabeffekts und der Umgebungsbedingungen auf das Kriechen und Schwinden von Beton“; Dissertation. –TU Wien, 2020.
- [5] SUZA, D., Kollegger J. und Müller H.: "Comparison of real and theoretical creep strains of large concrete specimens during changing environment conditions"; fib Symposium 2019 CONCRETE Innovations in Materials, Design and Structures, Kraków, Poland, 2019, ISBN: 978-2-940643-01-1; S. 237 - 238.
- [6] SUZA, D., Kollegger J. und Müller H.: "Influence of changing environment conditions on the development of shrinkage strain and the expansion coefficient of large concrete specimens"; CONGRESS OF IABSE New York City 2019, 2019, ISBN: 978-3-85748-165-9; S. 1955 - 1959.
- [7] URREA, Fernando Acosta. "Influence of elevated temperatures up to 100 °C on the mechanical properties of concrete"; KIT, ISBN 978-3-7315-0795-6, 2017

• Projektteam und Kooperationen

- Gibt es wesentliche Veränderungen im Projektteam (interne SchlüsselmitarbeiterInnen und externe Partner/Drittleister)?
- Gehen Sie auf Änderungen in der Arbeitsaufteilung ein.
Gibt es Auswirkungen auf die Kosten- / Finanzierungsstruktur und die Zielsetzung?

Es gab in Laufe des Projektes keine Änderungen im Projektteam, der Arbeitsaufteilung, der Kostenstruktur noch der Zielsetzung.

• Wirtschaftliche und wissenschaftliche Verwertung

- Beschreiben Sie die bisherigen Verwertungs- und / bzw. Weiterverbreitungsaktivitäten.
Ist eine Verwertung möglich?
- Listen Sie Publikationen, Dissertationen, Diplomarbeiten sowie etwaige Patentmeldungen, die aus dem Projekt entstanden sind, auf.
- Welche weiterführenden F&E-Aktivitäten sind geplant?
- Wie werden die im Projekt geschaffenen Prototypen weiter verwendet?

Herr Eduard Bazár hat seine Diplomarbeit: „Kriechen und Schwinden von großformatigen Betonkörpern“, in welcher die Ergebnisse der ersten beiden Versuchsserien aufgezeigt werden, mit der Note: Sehr gut abgeschlossen.

Herr Márk Máté hat seine Diplomarbeit: „Untersuchungen von rheologischen Effekten an großformatigen Betonkörpern unter veränderlichen Umgebungsbedingungen“ in welcher die Ergebnisse der beiden Winterserien aufgezeigt werden, erfolgreich abgeschlossen.

Herr Dominik Suza, Ph. D. hat seine Dissertation: „Einfluss des Maßstabeffekts und der Umgebungsbedingungen auf das Kriechen und Schwinden von Beton“ über diese Problematik fertiggestellt und das Rigorosum wird noch im Jahr 2020 stattfinden.

Der Artikel „Comparison of creep and shrinkage of large concrete specimens with theoretical models“ von Suza, Kollegger, Müller, Breiner wurde am fib-Kongress in Melbourne im Oktober 2018 veröffentlicht und dem wissenschaftlichen Publikum vorgestellt. Der Vortrag führte zu einer positiven und produktiven Diskussion innerhalb der Zuhörer.

Der Artikel „Comparison of real and theoretical creep strains of large concrete specimens during changing

environment conditions" wurde bei dem *fib*-Symposium in Krakow 2019 dem wissenschaftlichen Publikum vorgestellt.

Der Artikel „Influence of changing environment conditions on the development of shrinkage strain and the expansion coefficient of large concrete specimens" wurde bei dem 2019 IABSE Congress in New York City dem wissenschaftlichen Publikum vorgestellt. Der Vortrag wurde positiv aufgefasst und der Herr Suza wurde im Nachhinein mehrmals darauf angesprochen.

Frau Konstanze Altenburger verfasst zurzeit eine Diplomarbeit über die Anwendung von originalen und weiterentwickelten Modellen des Kriechens und Schwindens an einer realen Brücke.

• Erläuterungen zu Kosten & Finanzierung

Es kam zu keinen Abweichungen vom Kostenplan.

• Projektspezifische Sonderbedingungen und Auflagen

Die projektspezifischen Bedingungen und Auflagen wurden eingehalten.

• Meldungspflichtige Ereignisse

In den drei Forschungsjahren gab es keine meldepflichtigen Ereignisse.