# ENDBERICHT

| | | | |
|---|---|---|---|
| FFG Projektnummer | 860138 | FörderungsnehmerIn | Österreichische Bautechnik Vereinigung |
| Bericht Nr. | 1 | Berichtszeitraum | 01.02.2017 - 08.07.2021 |
| Bericht erstellt von | Dipl.-Ing. Wolfgang Bachofner<br>Dipl.-Ing. Dr.-techn. Ph. D. Dominik Suza<br>o.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.-Ing. Johann Kollegger<br>Dipl.-Ing. Michael Pauser | | |

**Richtwert für den Umfang: 10-20 Seiten**

## 1 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 Temperaturausdehnungskoeffizienten 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 angestrebten Ziele erreicht werden konnten.

# 2 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.

**Tab. 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 | 07/21 | Die Projektabwicklung wurde ordnungsgemäß durchgeführt. |
| 2 | Wissenschaftliche Leitung | 100% | 02/17 | 01/20 | 02/17 | 07/21 | 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.<br>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 | 08/17 | 07/21 | Bei den großformatigen Versuchskörpern wurde ein kontinuierliches Monitoringsystem mit Schwingsaitensensoren 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 | 07/21 | 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 | 07/21 | Es wurde ein neues Upgrade des EC 1992-1-1 und MC2010 Kriechmodells, Schwindmodells und Modells des Ausdehnungskoeffizienten vorgestellt, welches die Entwicklung unter dem Einfluss der Veränderung der Umgebungsbedingungen realitätsnah beschreibt. |
| 9 | Empfehlungen | 100% | 02/19 | 01/20 | 02/19 | 07/21 | Die erreichten Erkenntnisse führten zu den Empfehlungen, die während der Planungsphase angewendet werden können, um die Konstruktionen besser zu approximieren |

**Meilensteine**
Es wurden keine Meilensteine im Projekt definiert.

## 2.2 Beschreibung der im Berichtszeitraum durchgeführten Arbeiten

### 2.2.1 Arbeitspaket 1: Projektmanagement

Die Abwicklung des Projekts wurde kontrolliert und dokumentiert.

### 2.2.2 Arbeitspaket 2: Wissenschaftliche Leitung

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

### 2.2.3 Arbeitspaket 3: Recherche zur Herkunft der derzeitigen Kennwerte im Eurocode

AP 3 wurde erfolgreich im Jahr 2018 abgeschlossen. Eine detaillierte Beschreibung von AP 3 ist im Endbericht von 2018 zu finden.

### 2.2.4 Arbeitspaket 4: Herstellung der Probekörper und Frischbetonuntersuchungen

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

### 2.2.5 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.

### 2.2.6 Arbeitspaket 6: Experimentelle Bestimmung der Betonmaterialeigenschaften

**Messung der Schwingsaitensensoren und des Setzdehnungsmessers**
Um alle maßgebenden Stauchungsänderungen des Betons der großformatigen Prismen infolge von Vorspannung, rheologischen Prozessen und Umwelteinflüssen zu überwachen wurden Schwingsaitensensoren in den Versuchskörpern einbetoniert. Ein wesentlicher Vorteil der Messung mit Schwingsaitensensoren ist, dass die Entwicklung der Stauchungen ab dem Zeitpunkt Null, dem Betonieren der Versuchskörper, kontinuierlich (ein Messwert pro Minute)

aufgezeichnet werden kann. Diese Messinstrumente sind temperaturkompensiert und messen auch die Temperatur im Betonkörper. Für die Messung der Stauchungsdifferenzen an der Oberfläche der Versuchskörper wurden Messmarken auf die Probekörper geklebt. Die Messung der Stauchungen erfolgt mit einem Setzdehnungsmesser mit einer Messlänge von 500 mm, wobei Verformungsdifferenzen bis zu 0,001 mm gemessen werden können. Die Messung der Stauchungsdifferenzen an der Oberfläche der Versuchskörper dienen auch als unabhängige Vergleichsmessungen zu den Werten, die mit den Schwingsaitensensoren festgestellt werden konnten. Abb. 1 bis Abb. 4 zeigen die Gegenüberstellung der kontinuierlichen Messungen der Schwingsaitensensoren mit den Messungen mit den Setzdehnungsmesser der Versuchsserien S1 und S4. Bei den Kriechkörpern der Versuchsserien S1 und S4 stimmen die Messungen der Schwingsaitensensoren mit den Messungen des Setzdehnungsmessers sehr gut überein (siehe Abb. 1 und Abb. 3). Bei den Schwindkörpern bilden die Messungen des Setzdehnungsmessers den Trend der Messungen der Schwingsaitensensoren bei den mittleren und kleinen Schwindkörpern gut ab (siehe Abb. 2 und Abb. 4). Bei den großen Schwindkörper stimmt der Trend der Messungen des Setzdehnungsmessers nicht mit dem der Schwingsaitensensoren überein (siehe Abb. 2 und Abb. 4). Eine mögliche Ursache für diesen Umstand ist die Tatsache, dass mit dem Setzdehnungsmesser die Schwindverzerrungen an der Oberfläche gemessen werden und die Schwingsaitensensoren die Schwindverzerrungen im Schwindkörper messen.

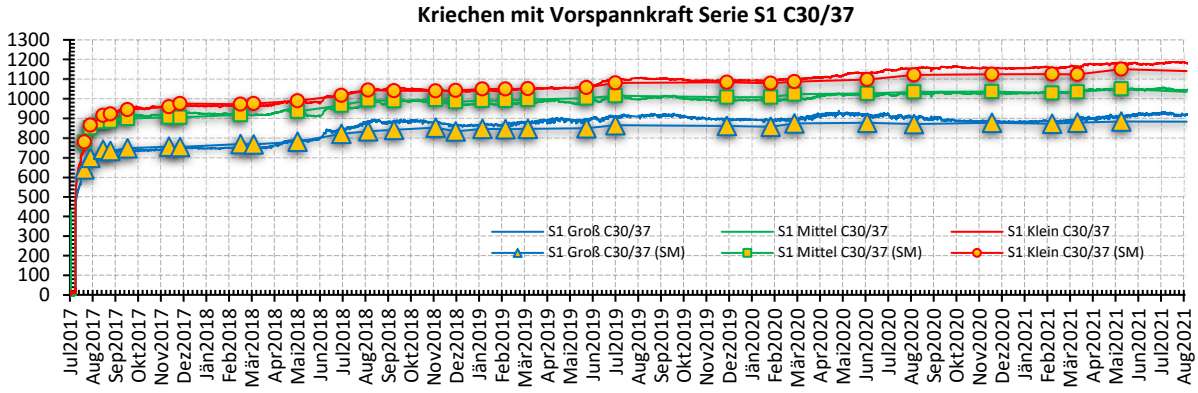



**Abb. 1:** Gegenüberstellung der gemessene Kriechstauchungen anhand der Schwingsaitensensoren und dem Setzdehnungsmesser Versuchsserie S1

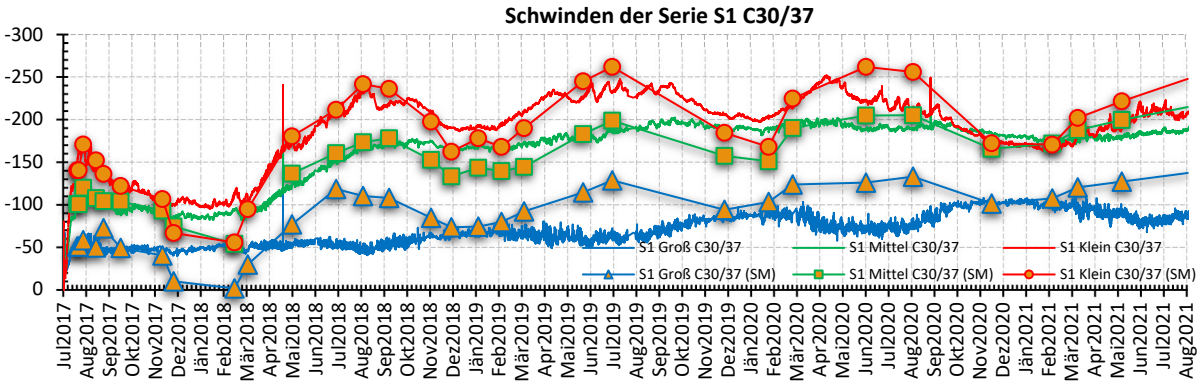



**Abb. 2:** Gegenüberstellung der gemessene Schwindstauchungen anhand der Schwingsaitensensoren und dem Setzdehnungsmesser Versuchsserie S1

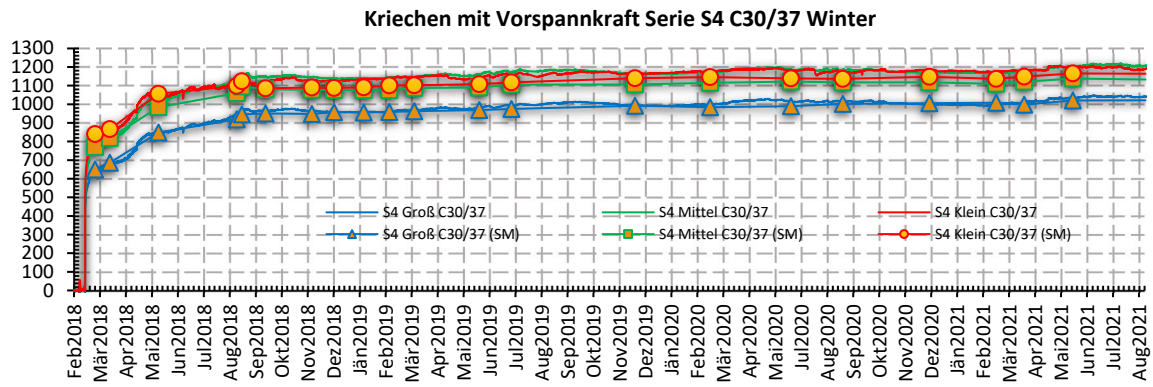



**Abb. 3:** Gegenüberstellung der gemessene Kriechstauchungen anhand der Schwingsaitensensoren und dem Setzdehnungsmesser Versuchsserie S4

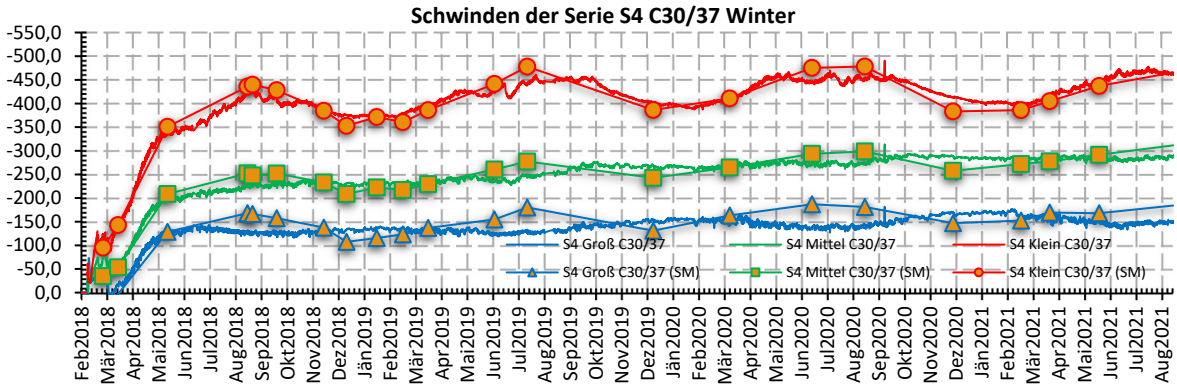



**Abb. 4:** Gegenüberstellung der gemessene Schwindstauchungen anhand der Schwingsaitensensoren und dem Setzdehnungsmesser Versuchsserie S4

**Temperaturausdehnungskoeffizienten anhand Labormessungen**

Im Sommer 2020 wurden acht Zylinderprobekörper (A1, A2, B1, B2, C1, C2, D1 und D2) nach Karlsruhe transportiert, um mittels Labormessungen den Temperaturausdehnungskoeffizienten bei verschiedenen Umgebungstemperaturen und konstanter Luftfeuchtigkeit zu ermitteln. Das Prüfprotokoll wurde von Mitarbeitern der Prüfanstalt im KIT vorgegeben und ist in Tabelle 2 ersichtlich.

**Tab. 2:** Prüfprotokoll

| Datum | Temperatur [°C] |
|---|---|
| 23.07.2020 | 40 |
| 30.07.2020 | 20 |
| 17.08.2020 | 20 |
| 03.09.2020 | 20 |
| 07.09.2020 | 10 |
| 08.09.2020 | 20 |
| 09.09.2020 | 30 |
| 10.09.2020 | 40 |
| 11.09.2020 | 50 |
| 14.09.2020 | 40 |
| 15.09.2020 | 20 |

Anhand der gemessenen Längenänderungen wurde der Temperaturausdehnungskoeffizient $\alpha_T$ anhand Gleichung (1) berechnet.

$$\alpha_T(T) = \frac{l(T) - l_0}{l_0} \cdot \frac{1}{T - T_0} \quad (1)$$

| | |
|---|---|
| $\alpha_T(T)$ | Wärmeausdehnungskoeffizient zur betrachteten Temperatur |
| $l(T)$ | Länge des Prüfzylinder zur betrachteten Temperatur |
| $l_0$ | Referenzlänge des Prüfzylinder am 03.09.2020 bei einer Temperatur von 20°C |
| $T$ | Temperatur zum betrachteten Zeitpunkt |
| $T_0$ | Referenztemperatur am 03.09.2020 ($T_0 = 20°C$) |

Die Berechnungsergebnisse aus den Labormessungen sind in Abb. 5 ersichtlich.

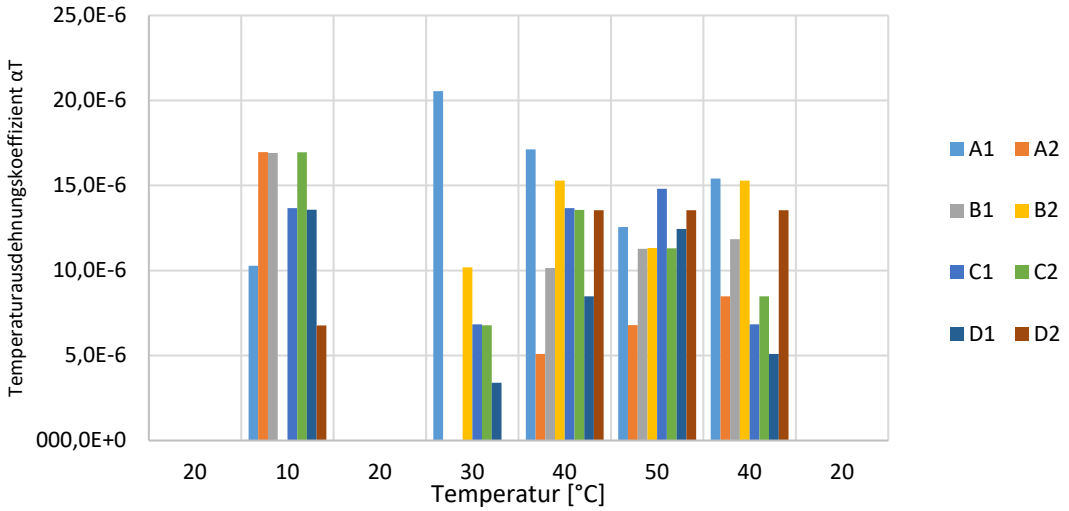
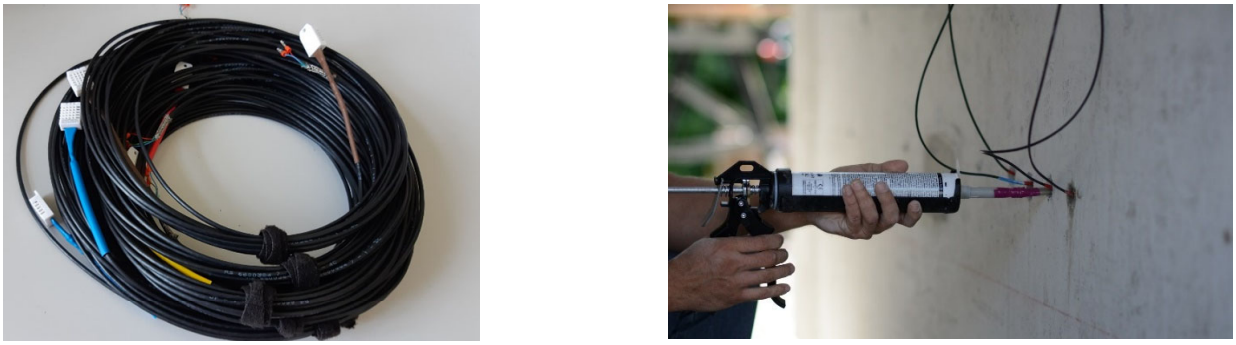



**Abb. 5:** Ermittelter Temperaturausdehnungskoeffizient $\alpha_T$ für die acht Zylinderprobekörper in Abhängigkeit der Umgebungstemperatur

Aus den Temperaturausdehnungskoeffizienten, welche im Labor ermittelt wurden, konnte kein aussagekräftiger Zusammenhang des Temperaturausdehnungskoeffizienten und der Temperatur ermittelt werden.

**Bestimmung der Feuchtigkeitsverteilung in großformatigen Probekörpern**

Die installierten Feuchtigkeits- und Temperatursensoren (siehe Abb. 6), welche in den Betonkörpern verbaut wurden konnten die Feuchtigkeitsverteilung in den Betonkörpern nicht erfassen. Nach wenigen Tagen betrug die gemessene relative Luftfeuchtigkeit im Betonkörper 100% und änderte sich nicht mehr.



(a) (b)

**Abb. 6:** a) Temperatur- Fechtigkeitssensoren DHT 22 b) Versiegelung der eingebauten Sensoren

Deshalb wurde eine manuelle Messung der Betonfeuchtigkeit mit Materialfeuchtegeräten begonnen, um Informationen über die Betonfeuchtigkeit in den großformatigen Probekörpern zu bekommen. Für

die Messung wurde zum einen ein Materialfeuchtegerät Trotec T610 und ein Materialfeuchtemessgerät Trotec BM31WP verwendet. Bei der Auswahl der Messgeräte wurde darauf geachtet, dass sich die Messgeräte sowohl beim physikalischen Messprinzip als auch bei der Eindringtiefe des Messbereichs unterscheiden. Die Messwerte (Digits) beider Geräte sind als relative Feuchtigkeitswerte zu interpretieren. Das physikalische Messprinzip des Materialfeuchtegeräts Trotec T610 beruht auf einem Mikrowellensensor, welcher eine zerstörungsfreie Eindringtiefen bis zu etwa 30 cm ermöglicht. Das Materialfeuchtemessgerät Trotec BM31WP dient zur ungefähren Bestimmung des Materialfeuchtegehalts nach dem Dielektrizitätsprinzip. Die Eindringtiefe des Messgeräts beträgt bis zu 4 cm. Abb. 7 stellt die Messergebnisse für die Versuchsserie S1 und S4 dar.

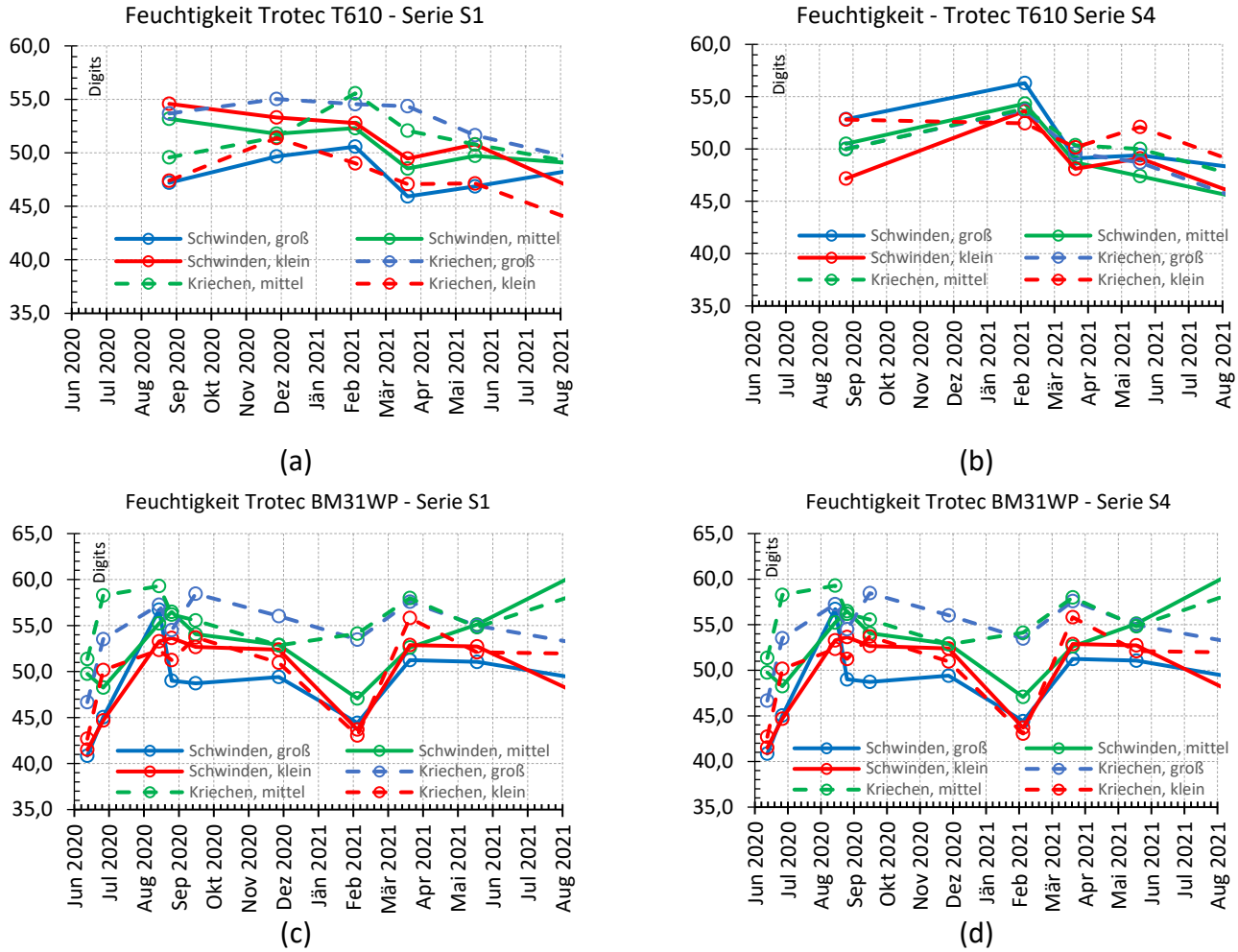



**Abb. 7:** a) Messergebnisse S1 Trotec T610 b) Messergebnisse S4 Trotec T610 c) Messergebnisse S1 Trotec BM31WP d) Messergebnisse S4 Trotec BM31WP

Die Gegenüberstellung der Messergebnisse in Abb. 7 zeigt, dass die Messergebnisse des Materialfeuchtemessgeräts Trotec BM31WP sehr stark über den Messzeitraum variieren. Grund dafür kann die geringe Messtiefe von 4 cm darstellen. Die Messungen mit dem Materialfeuchtemessgeräts Trotec T610 werden weitergeführt, um einen etwaigen Zusammenhang der Feuchteverteilung und den Umgebungseinflüssen zu überwachen.

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

Die theoretische Funktion zur Beschreibung des Kriechens ist eine glatte Funktion mit abnehmendem Gradienten. Der Gradient der gemessenen Kriechstauchungen ändert sich während der Messperiode. Dieser kann abnehmen, aber auch steigen, in Abhängigkeit von den Veränderungen der Umgebungsbedingungen. Aus diesem Grund ist am Anfang, als die Probekörper

in der Halle der Firma Franz Oberndorfer GmbH & Co KG gelagert waren, ein sehr guter Einklang der gemessenen Kriechstauchungen mit den theoretischen Modellen (siehe Abb. 8 und Abb. 9) zu beobachten. Die Halle hatte Laborbedingungen simuliert. Das Modell des MC2010 weist größere Stauchungen am Anfang nach der Belastung der Betonkörper auf. Dies beschreibt die Messergebnisse besser, als es bei dem Modell des EC 1992-1-1 der Fall ist (siehe Abb. 8).

In der kalten Winterperiode sind die Gradienten der gemessenen Kriechstauchungen und der theoretischen Modelle unterschiedlich. Die theoretischen und gemessenen Endwerte des Kriechens bei der Versuchsserie S1 verhalten sich jedoch über die ganze Messperiode kongruent (siehe Abb. 8). Die Versuchsserie S4 weist größere Kriechstauchungen auf, als die Versuchsserie S1. Die realen Kriechstauchungen werden bei der Serie S4 von beiden theoretischen Modellen unterschätzt (siehe Abb. 9). Die größten Abweichungen zwischen den theoretischen und realen Kriechstauchungen finden ab Ende März 2018 statt. Zu diesem Zeitpunkt begannen die Kriechstauchungen, gleichzeitig mit dem Übergang der Winter- zur Sommerperiode, rasch anzusteigen.

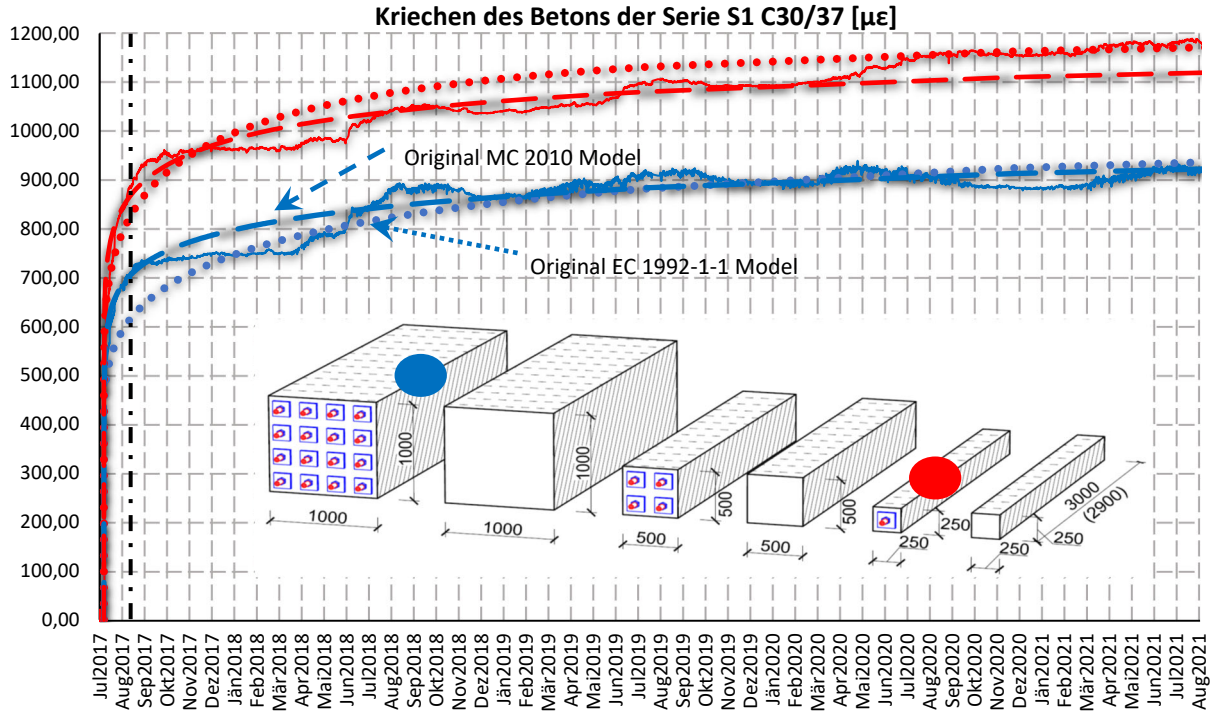



**Abb. 8:** Gemessene und theoretische Kriechstauchungen der großformatigen Betonkörper der Versuchsserie S1

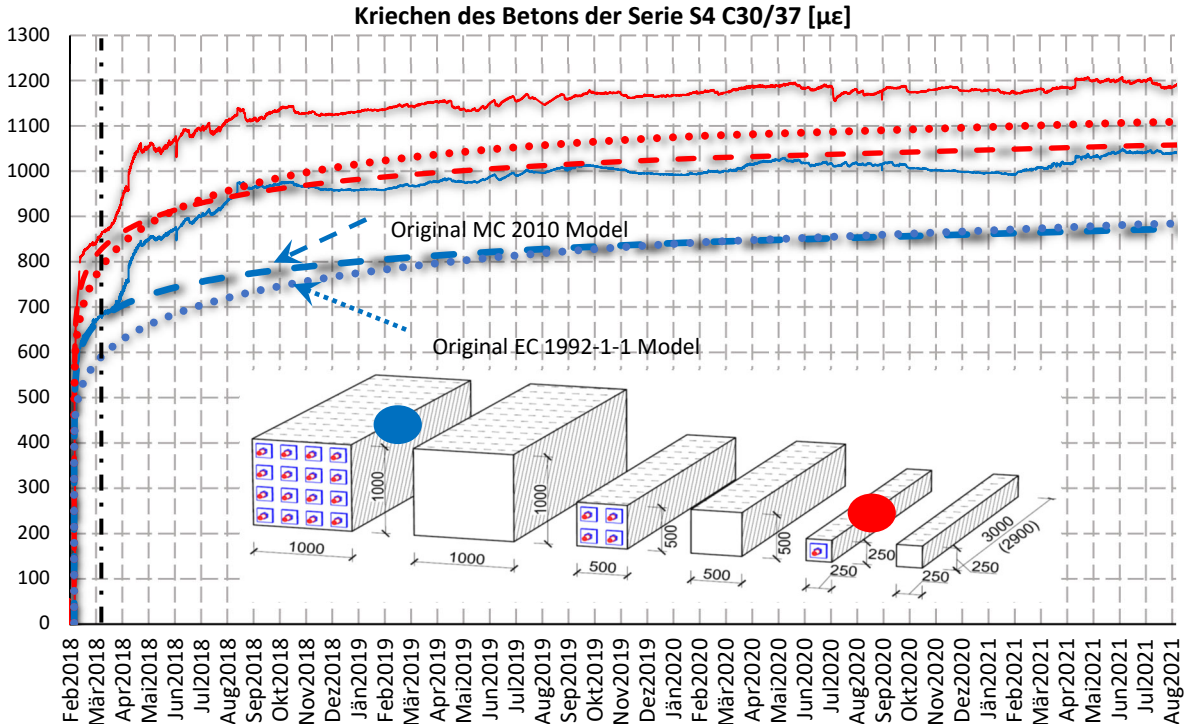



**Abb. 9:** Gemessene und theoretische Kriechstauchungen der großformatigen Betonkörper der Versuchsserie S4

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 Abb. 10 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 Tage 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 Abb. 10). Damit ein besserer Einklang zwischen den gemessenen Daten und dem theoretischen Modell erzielt wird, muss der Einfluss der Umgebungsbedingungen in das Modell implementiert werden [3] (siehe AP 8, Schwinden - Quellentheorie).

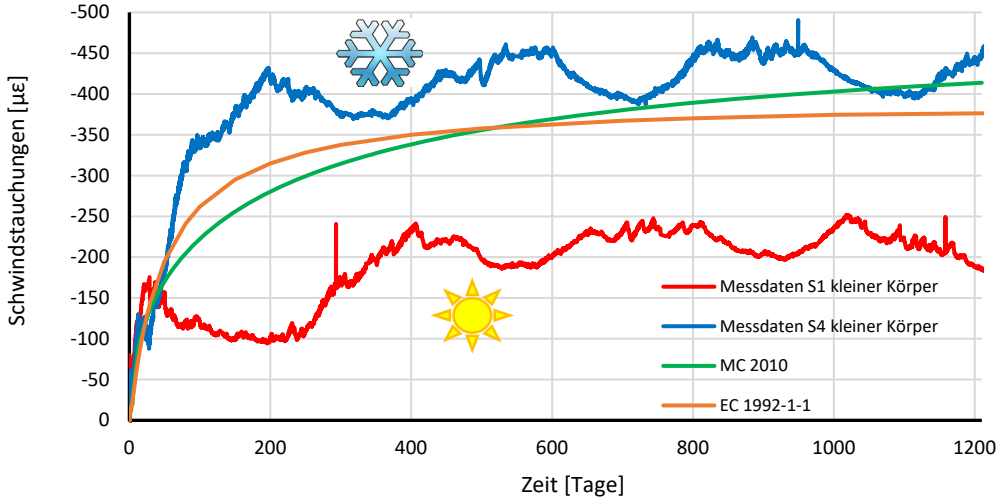
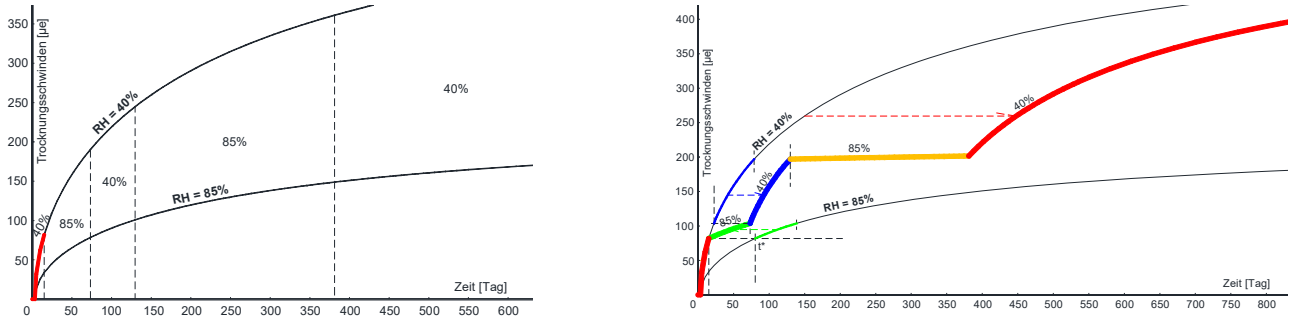



**Abb. 10:** Vergleich des Schwindens der Versuchsserien S1 und S4 mit dem theoretischen Modell des MC 2010

### 2.2.8 Arbeitspaket 8: Entwicklung von geeigneten Betonmaterialmodellen zur Beschreibung des Kriechens und Schwindens sowie für $E_c$ und $\alpha_T$ von in Österreich verwendeten Betonen

**Modellansatz- Proportionalität des Trocknungsschwinden und der inneren Körperfeuchtigkeit**

Die veränderlichen Umgebungsbedingungen spielen eine wichtige Rolle für die Entwicklung der Schwindstauchungen (siehe Abb. 10). 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 Abb. 11 a) dargestellt und zeigt eine theoretische Situation, in der sich die Umgebungsbedingungen mit mehrmaliger Wiederholung von 40% relativer Luftfeuchtigkeit zu 85% rasch ändern.




(a) (b)

**Abb. 11:** a) Problemstellung - die wechselnde Umgebungsfeuchtigkeit zwischen 40% und 85%. b) Modellansatz- die Proportionalität des Trocknungsschwinden und der inneren Körperfeuchtigkeit [3]

Im 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 (2) beschrieben.

$$\varepsilon_{cds}(t,t_s) = \varepsilon_{cds}(f_{cm}) \cdot \beta_{RH}(RH) \cdot \beta_{ds}(t - t_s) \quad (2)$$

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

Der erste Term $\varepsilon_{cds}(f_{cm})$ der Gleichung (2) beschreibt die Struktur des Betons und bleibt über die ganze Berechnung konstant. Der zweite Term $\beta_{RH}(RH)$ beschreibt den Einfluss der Umgebungsbedingungen auf das Trocknungsschwinden. Der dritte Term $\beta_{ds}(t\text{-}t_s)$ kommt aus der Diffusionstheorie und fand bereits seinen Einsatz im Modellansatz der Diffusionstheorie (zweiter Modellansatz siehe [3] und [4]). In diesem Modellansatz wird dieser Term gleich eins gesetzt, entsprechend der Situation des zu hundertprozentig abgeschlossenen Trocknungsschwinden. Aus diesem Grund ist der Term $\varepsilon_{cds}(t,t_s)$ der Gleichung (2) zeitunabhängig ($\beta_{ds}(t\text{-}t_s) = 1$) und zeigt nur den Wert des maximalen Trocknungsschwindens für den gegebenen Beton $f_{cm}$ und für die gegebene Umgebungsfeuchte RH an [3].
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 Abb. 12 und [3]).

**Die Quellentheorie**

Die Annahme der Proportionalität zwischen Trocknungsschwinddehnung und der inneren Betonfeuchtigkeit (siehe Abb. 11 (b)) ermöglicht die Modellierung und Berechnung der Entwicklung der Schwindstauchungen unter veränderlichen Umgebungsbedingungen (Luftfeuchtigkeit) auf physikalischer Ebene. In diesem Modell wird angenommen, dass eine Proportionalität zwischen der Trocknungsschwinddehnung und der inneren Betonfeuchte besteht. Aus der Größe der Trocknungsschwinddehnung ist es möglich, die innere Feuchtigkeit im Betonkörper rückzurechnen. Die Entwicklung des Trocknungsschwindens laut [2] wird mit Gleichung (2) beschrieben. Der erste Term $\varepsilon_{cds}(f_{cm})$ aus Gleichung (2) beschreibt die Struktur des Betons und bleibt über die ganze Berechnung konstant. Der zweite Term $\beta_{RH}(RH)$ beschreibt den Einfluss der Umgebungsbedingungen auf das Trocknungsschwinden. Der dritte Term $\beta_{ds}(t\text{-}t_s)$ kommt aus der Diffusionstheorie. In diesem Modellansatz wird dieser Term, entsprechend der Situation des zu hundert Prozent abgeschlossenen Trocknungsschwindens, gleich eins gesetzt. In diesem Fall ist der Term $\varepsilon_{cds}(t,t_s)$ der Gleichung (2) zeitunabhängig ($\beta_{ds}(t - t_s) = 1$) und zeigt nur den Wert des maximalen Trocknungsschwindens für den gegebenen Beton $f_{cm}$ und für die gegebene Umgebungsfeuchte *RH* an. Die verschiedenen $\varepsilon_{cds}(t,t_s)$ sind in Abb. 12 als rote Feuchtehöhenlinien dargestellt. Der Trocknungsschwinddehnungsverlauf und die dazugehörige durchschnittliche Feuchtigkeit im Betonkörper $\rho_{RH}$ über 800 Tage können der Abb. 12 entnommen werden. Die Annahme der Proportionalität zwischen Trocknungsschwinddehnung und der inneren Betonfeuchtigkeit ermöglicht die Verbindung der Schwindfunktionen auf einer physikalischen Ebene. In Wirklichkeit werden die Schwindfunktionen in horizontaler Richtung verbunden, weil die roten Höhenlinien der Feuchtigkeit (siehe Abb. 12) horizontal sind. Bei diesem Modellansatz wird mit einer virtuellen Zeit t* gerechnet. Die neue virtuelle Zeit wird für das MC 2010 Modell abgeleitet (siehe Gleichung (3)). Der grafische Ablauf der Berechnung ist in Abb. 12 dargestellt.

$$t* = \frac{\left(\frac{\varepsilon_{cds}(t,t_s)}{\varepsilon_{cds0}(f_{cm})\cdot\beta(RH)}\right)^2 \cdot 0{,}035 \cdot h^2}{1-\left(\frac{\varepsilon_{cds}(t,t_s)}{\varepsilon_{cds0}(f_{cm})\cdot\beta(RH)}\right)^2} + t_s \qquad (3)$$

*t** virtuelle Zeit

Zu beachten ist jedoch, dass die Steuerungsfunktionen in der Gleichung (2) nur empirisch sind, was als Nachteil zu sehen ist.

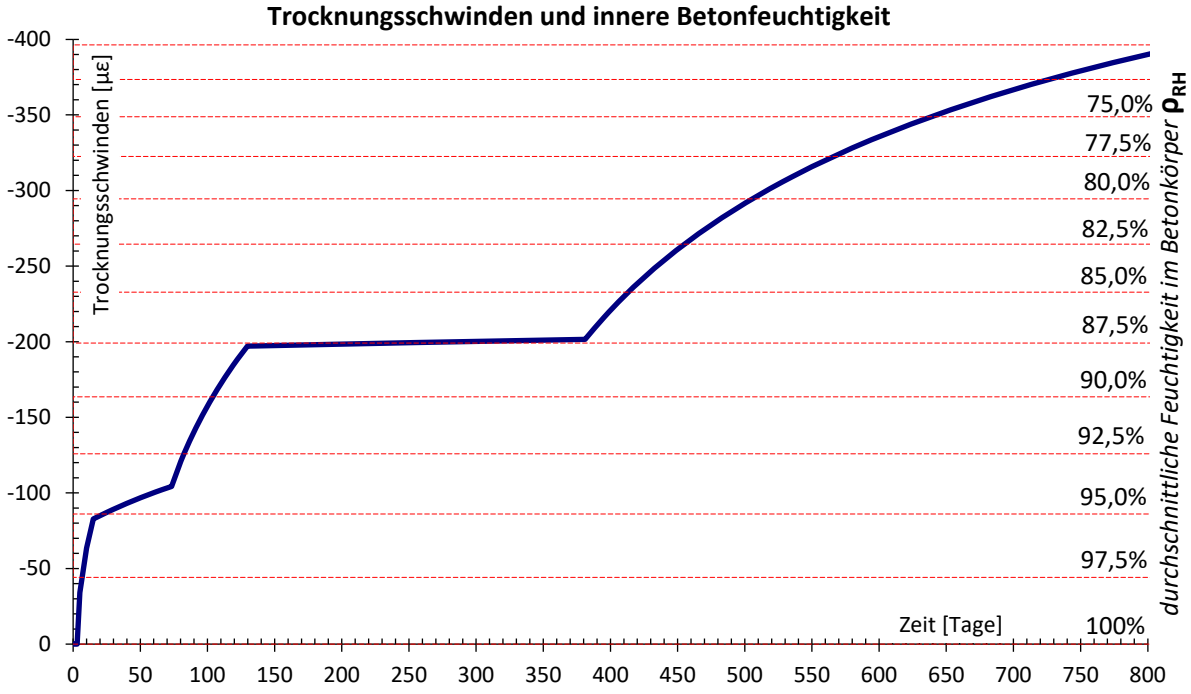



**Abb. 12:** Darstellung der Trocknungsschwinddehnung und der entsprechenden inneren Betonfeuchtigkeit

- Grundlagen der Schwindtheorie

Schwinden des Betons besteht aus zwei unterschiedlichen Schwindanteilen, aus dem Grundschwinden und dem Trocknungsschwinden, wobei beide laut der bestehenden Theorien (EC 1992-1-1 [1], MC 2010[2]) lastunabhängig sind. Als Grundschwinden versteht man die Volumenverminderung des Betons verursacht durch chemische Prozesse. Beim Trocknungsschwinden hingegen kommt es zu einer Volumenverminderung aufgrund der reduzierten Feuchtigkeit in dem Betonquerschnitt. Für normale Betonfestigkeitsklassen ist der Grundschwindanteil viel kleiner als der des Trocknungsschwindens. Das Model des EC 1992-1-1 [1] besagt, dass der Anteil des Grundschwindens am Gesamtschwinden in einem Bereich von 2,5 % bis 25 % liegt. Im Gegensatz dazu ist das Grundschwinden maßgebend bei hochfesten Betonen.

Das Trocknungsschwinden wird in den bestehenden Normen mittels der Diffusionstheorie gemäß dem zweiten Fickschen Gesetz beschrieben - siehe Gleichung (4).

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D\frac{\partial^2 c}{\partial x^2} \qquad (4)$$

*c* Stoffmengenkonzentration
*D* Diffusionskoeffizient
*t* Zeit
*x* Länge

Gleichung (4) kann analytisch mit einer Taylorreihe gelöst werden. Der erste Term der Lösung der Taylorreihe wird dann für die Zeitentwicklung des Trocknungsschwindens (siehe Gleichung (5)) in [1] und [2] genutzt.

$$\beta_{ds}(t) = \left(\frac{t}{D \cdot h^2 + t}\right)^{0,5} \tag{5}$$

| | |
|---|---|
| $\beta_{ds}(t)$ | Funktion zur Beschreibung des Verlaufs des Trocknungsschwindens |
| $D$ | Diffusionskoeffizient |
| $h$ | wirksame Bauteildicke |

Die Ergebnisse der Gleichung (5) befindet sich im Bereich zwischen Null (kein Feuchtigkeitsaustausch) und Eins (abgeschlossene Austrocknung), wenn die Umgebungsfeuchte die innere Feuchtigkeit des Betonkörpers ausgleicht.

- Verteilung der Feuchtigkeit im Betonkörper

Laut dem analytischen Diffusionsmodell (Bažant) wie auch des nummerischen Lösungsansatzes von Suza [3] existiert ein typischer Austrocknungsverlauf. Dies wird in Abb. 13 anhand des Austrocknungsverlaufes einer theoretischen Wand dargestellt. Die Breite des Körpers stellt einen Parameter dar, der durch seine Abhängigkeit von der Zeit, die zugehörige Zeitachse bildet. Der Verlauf der relativen Luftfeuchtigkeit im Inneren des Betonkörpers ermöglicht die Berechnung der durchschnittlichen Feuchtigkeit $\rho_{RH}$ (siehe Gleichung (6)). Das in der Gleichung (6) dargestellte Integral bezeichnet die Fläche unter der berechneten Feuchtigkeitskurve.

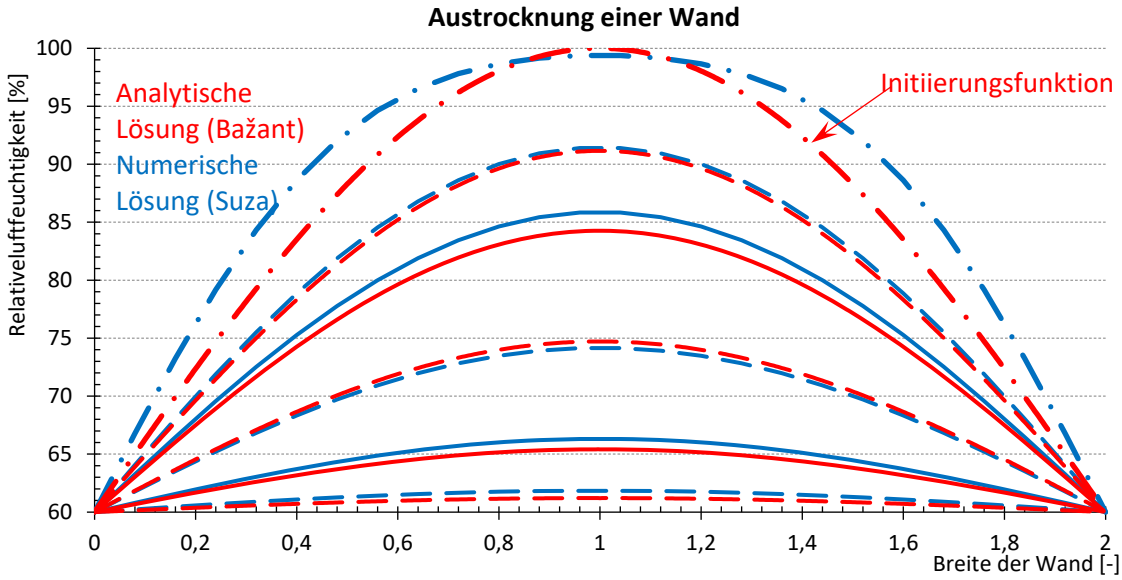



**Abb. 13:** Austrocknungsverlauf einer Wand laut dem analytischen Modell von Bažant und dem numerischen Modell von Suza [3]

$$\rho_{RH} = \frac{\int_{x=0}^{b} RH(x)dx}{b} \approx \frac{A_{RH}}{b} \tag{6}$$

| | |
|---|---|
| $\rho_{RH}$ | durchschnittliche Feuchtigkeit im Körper [%] |
| $RH(x)$ | relative Luftfeuchtigkeit im Inneren des Betonkörpers an der Stelle x |
| $b$ | Breite des Körpers |
| $A_{RH}$ | Fläche unter der berechneten Funktion/Kurve |

Die Theorie der Proportionalität des Trocknungsschwindens und der inneren Körperfeuchtigkeit erlaubt es nun die durchschnittliche Feuchtigkeit im Inneren des Betonkörpers $\rho_{RH}$ zu berechnen (siehe Gleichung (7)).

$$\rho_{RH} = \left(1 - \frac{\left|\frac{\varepsilon_{cds}(t,t_s)}{\varepsilon_{cds}(f_{cm})}\right|}{1{,}55}\right)^{1/3} \cdot 100 \tag{7}$$

$\varepsilon_{cds}(t,t_s)$ Trocknungsschwinden des Betons zum Zeitpunkt t
$\varepsilon_{cds}(f_{cm})$ Koeffizient der die Größe des Trocknungsschwindens in Abhängigkeit von der Betongüte berücksichtigt
$\rho_{RH}$ durchschnittliche Feuchtigkeit im Betonkörper [%]

Die durchschnittliche Feuchtigkeit $\rho_{RH}$ ist abhängig von der Verteilung der Feuchtigkeit über die Querschnittsbreite. Mit einer konstanten Wandbreite *b* und einer durchschnittlichen Feuchtigkeit $\rho_{RH}$, kann unter der Annahme einer symmetrischen trapezförmigen Verteilung der Feuchtigkeit über die Querschnittsbreite *b* und einer Randfeuchte gleich der Luftfeuchtigkeit *RH*, die Geometrie der Verteilung der Feuchtigkeit beschrieben werden. Die Feuchtigkeit über die Breite des Querschnitts *b* wird in drei Bereiche geteilt. Der erste Teil verläuft vom Rand, wo die Körperfeuchtigkeit der Umgebungsfeuchtigkeit (*RH*) gleicht, bis zu der Stelle, an der die Feuchtigkeit im Betonkörper die durchschnittliche Körperfeuchtigkeit erreicht. Diese Breite kann mittels Gleichung (8) berechnet werden und wird mit $b_{\rho RH}$ bezeichnet (siehe Abb. 18). In Abb. 14 bis Abb. 16 zeichnet sich diese Breite von dem Rand des Querschnitts bis zum Treffpunkt der blauen und roten Linie ab.

$$b_{\rho_{RH}} = \frac{b \cdot (100 - \rho_{RH})(\rho_{RH} - RH)}{(100 - RH)^2} \tag{8}$$

$\rho_{RH}$ durchschnittliche Feuchtigkeit im Betonkörper [%]
*RH* relative Luftfeuchtigkeit
*b* Breite des Körpers / der Wand
$b_{\rho RH}$ Randbreite der Wand in der die innere Körperfeuchtigkeit kleiner als $\rho_{RH}$ (siehe Abb. 18) ist

Die Feuchtigkeit steigt in dem zweiten Bereich ($b_\Delta$) weiter mit dem Gradienten des ersten Bereichs bis zum Erreichen des maximalen Feuchtigkeitsniveaus (Initiationsfeuchtigkeit). In Bezug auf das Schwinden liegt dies bei 100% (volle Sättigung) (siehe Abb. 14 und Abb. 15). Gleicht oder überschreitet die Breite $b_{\rho RH}$ ein Viertel der Wandbreite (*b/4*), ändert sich die Verteilung der Feuchtigkeit von trapezförmig zu dreiecksförmig und die Feuchtigkeit steigt linear bis zur Wandmitte (*b/2*) an (siehe Abb. 16).

$$b_\Delta = \frac{b - b_{RH,int}}{2} \tag{9}$$

*b* Breite des Körpers / der Wand
$b_{RH,int}$ Breite des Körpers / der Wand die vollständig saturiert ist
$b_\Delta$ Randbreite des Körpers / der Wand die nicht vollständig saturiert ist

Der letzte Bereich, mit einer konstanten maximalen Feuchtigkeit (100%), ist vorhanden so lange die Breite $b_{\rho RH}$ nicht den Viertelpunkt der Wand (*b/4*) überschreitet (siehe Abb. 14 und Abb. 15). Dieser Bereich ($b_{RH,int}$) wird mittels Gleichung (10) berechnet.

$$b_{RH,int} = \frac{b \cdot (2 \cdot \rho_{RH} - RH - 100)}{100 - RH} \tag{10}$$

$b_{RH,int}$ Breite des Körpers / der Wand die vollständig saturiert ist
$\rho_{RH}$ durchscnittliche Feuchtigkeit im Betonkörper [%]
b die Breite des Körpers / Wand
RH relative Luftfeuchtigkeit [%]

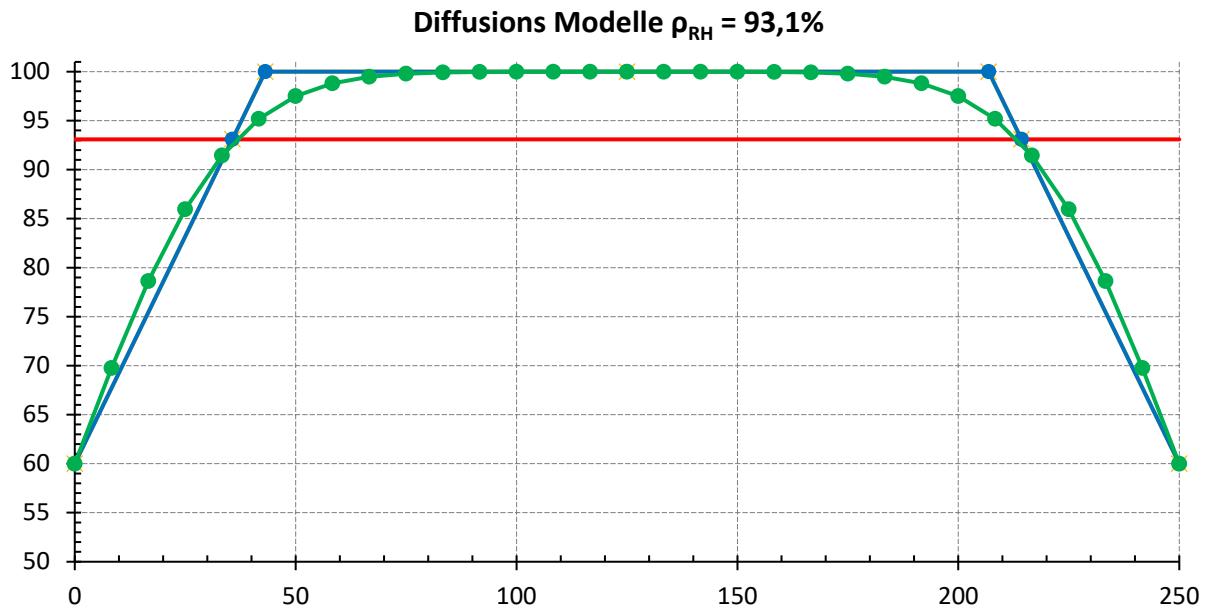



**Abb. 14:** Die Verteilung der Feuchtigkeit über die Breite des Querschnitts *b*. Die rote Linie repräsentiert die durchschnittliche Feuchtigkeit im Betonkörper ($\rho_{RH}$ = 93,4%), die grüne Linie das numerische Modell (Suza) [3] und die blaue Linie die trapezförmige Verteilung der Feuchtigkeit über die Querschnittsbreite *b*. Es wird von einer Umgebungsfeuchte RH = 60% ausgegangen

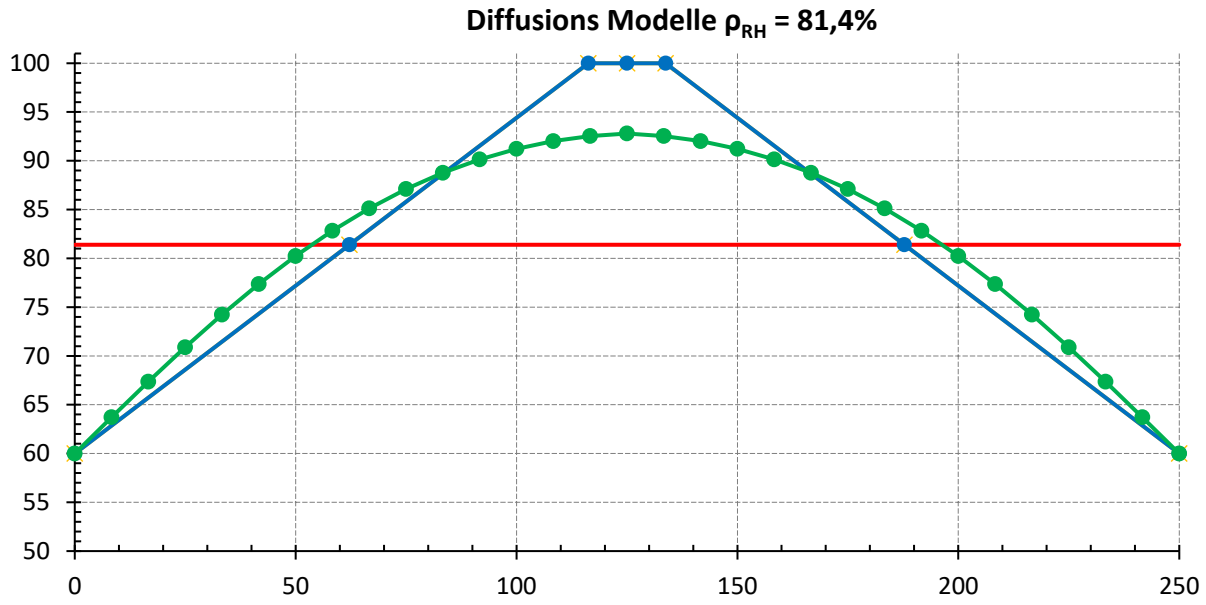



**Abb. 15:** Die Verteilung der Feuchtigkeit über die Breite des Querschnitts *b*. Die rote Linie repräsentiert die durchschnittliche Feuchtigkeit im Betonkörper ($\rho_{RH}$ = 81,4%), die grüne Linie das numerische Modell (Suza) [3] und die blaue Linie die trapezförmige Verteilung der Feuchtigkeit über die Querschnittsbreite *b*. Es wird von einer Umgebungsfeuchte RH = 60% ausgegangen

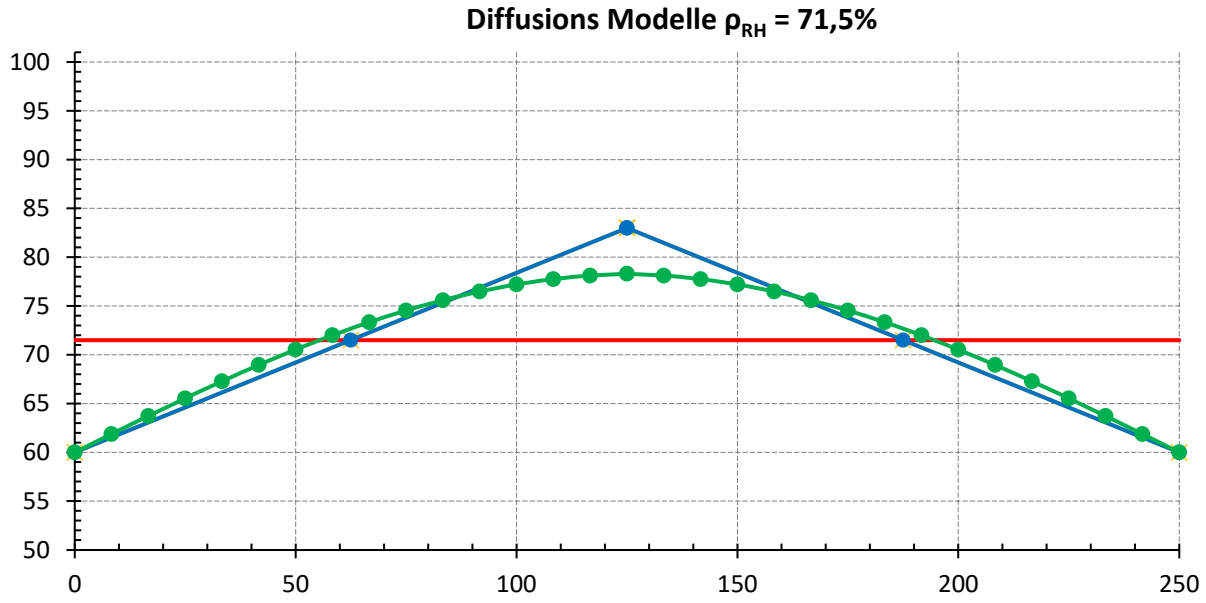



**Abb. 16:** Die Verteilung der Feuchtigkeit über die Breite des Querschnitts *b*. Die rote Linie repräsentiert die durchschnittliche Feuchtigkeit im Betonkörper ($\rho_{RH}$ = 71,5%), die grüne Linie das numerische Modell (Suza) [3] und die blaue Linie die trapezförmige Verteilung der Feuchtigkeit über die Querschnittsbreite *b*. Es wird von einer Umgebungsfeuchte RH = 60% ausgegangen

Den Abb. 14 bis Abb. 16 ist zu entnehmen, dass die trapezförmige Verteilung der Feuchtigkeit ähnlich der des numerischen Modells von Suza (bzw. analytischen Modelsl von Bažant) ist. Dieses vereinfachte trapezförmige Modell ist im Stande die Verteilung der Feuchtigkeit am Rand über die Wandbreite $b_{\rho RH}$ zu beschreiben.

- Zur Quellentheorie

Die innere Feuchtigkeit der Betonkörper beträgt nach der Betonage 100%, was dem Wert einer vollen Sättigung entspricht. Die Modelle des EC 1992-1-1 [1] und MC 2010 [2] behaupten, dass solange der Betonkörper in der Schalung ist, kein Feuchteaustausch stattfindet und erst mit dem Ausschalen der Trocknungsprozess beginnt. Sobald der Körper ausgeschalt ist, sinkt die Feuchtigkeit am Rand und gleicht sich mit der Umgebungsfeuchtigkeit *RH* aus. Vom Rand aus beginnt dann der Betonkörper auszutrocknen, wobei die Feuchtigkeit nach außen strömt, bis zu dem Moment (Zeitpunkt $t_\infty$) in dem eine gleiche Feuchtigkeit *RH* im ganzen Querschnitt herrscht.

Wenn sich während der Austrocknung (Schwinden) die Umgebungsfeuchtigkeit *RH* erhöht (siehe rote Linie in Abb. 17), wird der Quellprozess initiiert. Diese Situation wird in Abb. 17, mit einem Anstieg der Luftfeuchtigkeit *RH* von 60% auf 85% kurz bevor die durchschnittliche Feuchtigkeit (rote Linie $\rho_{RH}$ = 90,9%) den ursprünglichen RH-Wert erreicht, dargestellt. In der klassischen Schwindtheorie sollte der Betonkörper weiter schwinden, da die durchschnittliche Feuchtigkeit die der Umgebung überschreitet. In Wirklichkeit wird jedoch der Quellprozess aktiviert und die Feuchtigkeit beginnt von außen nach innen zu strömen während gleichzeitig der Schwindprozess (Austrocknung) fortfährt. Laut der Theorie der Proportionalität des Trocknungsschwindens und der inneren Körperfeuchtigkeit strömt die Feuchtigkeit nun weiter von innen nach außen (siehe blaue Linie in Abb. 17) jedoch mit einer geänderten (verkleinerten) Geschwindigkeit.

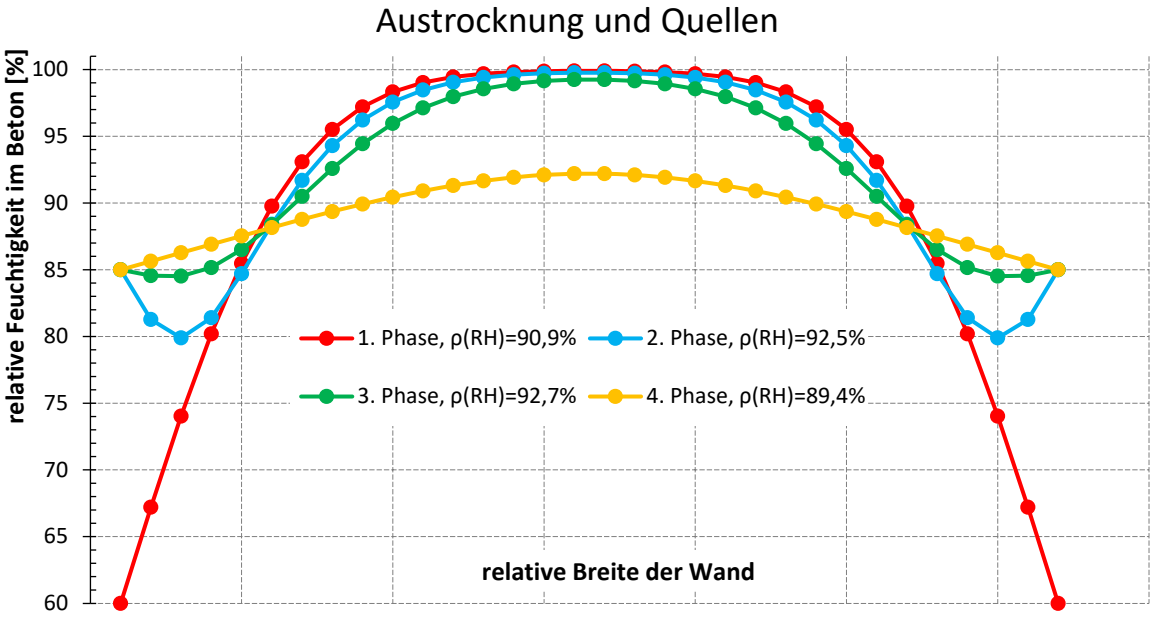



**Abb. 17:** Austrocknung einer theoretischen Wand bei einer relativen Luftfeuchtigkeit RH von 60% mit nachträglicher Erhöhung auf 85%

Der Anstieg der durchschnittlichen Feuchtigkeit aufgrund des Anstieges der relativen Luftfeuchtigkeit ist in Abb. 17 klar ersichtlich. Die durchschnittliche Feuchtigkeit im Beton steigt von 90,9% in der 1. Phase auf 92,5% in der 2. Phase. Ein Anstieg der Feuchtigkeit am Rand mit einem gleichzeitigen Sinken in Bauteilmitte ist im Vergleich von der 2. Phase und 3. Phase zu sehen. Theoretisch ist in der 3. Phase das Quellen abgeschlossen. In der 4. Phase (gelbe Linie) ist zu sehen, dass nach dem Beenden des Quellprozesses die Feuchtigkeit am Rand immer noch nach oben steigt. Dieser Feuchtigkeitsanstieg ist jedoch nicht auf das Quellen sondern auf die Austrocknung zurück zu führen, da die Restfeuchtigkeit von innen nach außen geführt werden muss damit sich die natürliche Feuchteverteilung einstellt.

- Mathematisches Modell des Quellens

Das oben angeführte Beispiel (Abb. 17) zeigt, dass Quellen häufig nur an den Rändern des Betonquerschnitts stattfindet, weswegen die Verteilung der Feuchtigkeit stets berücksichtigt werden muss. Numerische Modelle sind im Stande realitätsgetreue Ergebnisse von beliebigen Querschnitten zu liefern. Der nötige Rechenaufwand ist für eine Anwendung in der Praxis zu kompliziert und kostenintensiv. Das vorgestellte trapezförmigen Modell ist im Stande die Verteilung der Feuchtigkeit am Rand (bis zu der durchschnittlichen Feuchtigkeit im Betonkörper $\rho_{RH}$) mit Ergebnissen nahe denen des numerischen Modells zu berechnen. Gleichzeitig kann es auch sehr gut für die Darstellung des Quellprozesses angewendet werden. Gleichung (8) für die Berechnung der Geometrie des trapezförmigen Modells kann in eine allgemeinere Form umgeschrieben werden, in der statt dem fixen Wert der Initiierungsfeuchtigkeit von 100% ein allgemeiner Wert $RH_{int}$ verwendet wird (siehe Gleichung (11)).

$$b_{\rho_{RH}} = \frac{b \cdot (RH_{int} - \rho_{RH})(\rho_{RH} - RH)}{(RH_{int} - RH)^2} \tag{11}$$

| | |
|---|---|
| $\rho_{RH}$ | durchschnittliche Feuchtigkeit im Betonkörper [%] |
| $RH$ | relative Luftfeuchtigkeit |
| $RH_{int}$ | Anfangsfeuchtigkeit im Betonkörper |
| $b$ | Breite des Körpers / der Wand |

$b_{\rho RH}$ Randbreite der Wand in der die innere Körperfeuchtigkeit kleiner als $\rho_{RH}$ (siehe Abb. 18) ist

Das analytische Modell (Bažant) wie auch das numerische Modell (Suza) (siehe Abb. 13) berücksichtigen den Verlauf der Feuchtigkeit. Die Darstellung in Bezug auf Quellen ähnelt der des Schwindens, mit der Unterscheidung, dass sie gespiegelt und linear zum normalen Austrocknungsverlauf skaliert wird. Durch die unterschiedlichen Diffusionskoeffizienten der Feuchtigkeitsaufnahme und Feuchtigkeitsabgabe kommt es zu einer Anpassung der Zeitachse. Um diesen Effekt zu beschreiben, kommt es zur Anwendung einer reversiblen Diffusionsgleichung (Gleichung (12)), die eine Abwandlung der klassischen Diffusionsgleichung laut EC 1992-1-1 [1] und MC 2010 [2] ist und somit einen ähnlichen Verlauf der Zeitfunktion liefert. Die Gleichung (12) ist durch den Diffusionskoeffizient $D_Q$ gesteuert und verzögert, da der Koeffizient $D_Q$ ca. das Zehnfache des schwindbezogenen Koeffizienten ist. Der Zeitpunkt $t_Q$ repräsentiert den Zeitpunkt ab dem Quellen stattfindet.

$$\beta'_{c,Q}(t,t_Q) = 1 - \left(\frac{t - t_Q}{D_Q \cdot h^2 + (t - t_Q)}\right)^{0,5} \tag{12}$$

$D_Q$ Diffusionskoeffizient des Quellens
$h$ wirksame Bauteildicke
$t$ Zeitpunkt der Analyse
$t_Q$ Zeitpunkt der Aktivierung des Quellens
$\beta'_{c,Q}(t,t_Q)$ reversible Diffusionsgleichung des Quellens

- Quellverfahren

Solange die Umgebungsfeuchtigkeit konstant ist oder sinkt, kommt es zu einem Schwinden des Betons. Steigt die Umgebungsfeuchtigkeit an, kann ein Quellen festgestellt werden. Die Feuchtigkeitsverteilung beim niedrigsten Feuchtigkeitsniveau wird festgehalten, damit der Effekt des Quellens rechtzeitig deaktiviert werden kann (siehe grüne Linie in Abb. 17). Die Variablen, die zum Zeitpunkt Aktivierung des Quellens bekannt sein müssen, belaufen sich auf: die Feuchtigkeit bei der das Quellen aktiviert wurde ($RH_{min}$); die Feuchtigkeit, die zum aktuellen Zeitpunkt $RH_{akt}(t)$ vorhanden ist; Trocknungsschwinden zum Zeitpunkt Aktivierung des Quellens $\varepsilon_{cds}(t_Q,t_s)$; Zeitpunkt der Aktivierung des Quellens $t_Q$ und die durchschnittliche Feuchtigkeit $\rho_{RH,start,Q}$, die der Querschnitt kurz bevor das Quellen aktiviert wurde, besitzt (siehe Gleichung (13)).

$$\rho_{RH,start,Q} = \left(1 - \frac{\left|\frac{\varepsilon_{cds}(t_Q,t_s)}{\varepsilon_{cds0}(f_{cm})}\right|}{1,55}\right)^{1/3} \cdot 100 \tag{13}$$

Unter der Aktivierungsphase für das Modell versteht man den Zeitpunkt, in dem sich die Umgebungsfeuchtigkeit erhöht und das Quellen aktiviert wird. Damit der Quellprozess richtig berechnet werden kann, muss der Feuchtigkeitsverteilungszustand (kurz bevor das Quellen aktiviert wurde) festgehalten werden. Die durchschnittliche Feuchtigkeit im Beton $\rho_{RH}$ wird laut der Theorie der Proportionalität des Trocknungsschwinden und der inneren Körperfeuchtigkeit berechnet (siehe Gleichung (7)). Die Geometrie der trapezförmigen Verteilung der Feuchtigkeit im Querschnitt wird mit den Gleichungen ((8), (9) und (10)) berechnet (siehe Abb. 18). Damit die maximale Größe des Quellens $\Delta\varepsilon_{Quellen}$ bestimmt werden kann, muss die theoretisch maximale Schwindstauchung $\varepsilon_{cds,RH_min}$ bei der minimalen Luftfeuchtigkeit $RH_{min}$ berechnet werden. Der erste Grenzwert $\varepsilon_{cds,RH_min}$ ist mit den Gleichungen (14) und (15) zu berechnen.

$$\beta_{RH,min,Quel} = -1{,}55 \cdot \left(1 - \left(\frac{RH_{min}}{100}\right)^3\right) \tag{14}$$

$RH_{min}$ minimale Luftfeuchtigkeit

$\beta_{RH,min,Quel}$ Beiwert zur Berücksichtigung der relativen Luftfeuchtigkeit $RH_{min}$ auf die Größe des Trocknungsschwinden

$$\varepsilon_{cds,RH_min} = \beta_{RH,min,Quel} \cdot \varepsilon_{cds0}(f_{cm}) \tag{15}$$

$\varepsilon_{cds}(f_{cm})$ Koeffizient der die Größe des Trocknungsschwindens in Abhängigkeit von der Betongüte berücksichtigt

$\varepsilon_{cds,RH_min}$ Endwert des Trocknungsschwinden bei $RH_{min}$

Für die Berechnung des Quellens muss die maximale Dehnung infolge Quellen $\Delta\varepsilon_{Quellen}$ definiert werden. Die vorgestellte Lösung basiert auf der Theorie der Proportionalität des Trocknungsschwinden und der inneren Körperfeuchtigkeit. Die maximale Größe des Quellens $\Delta\varepsilon_{Quellen}$ (siehe Gleichung (16)) ist die Differenz der Schwinddehnung zum Zeitpunkt $t_\infty$ bei der minimalen Luftfeuchtigkeit $RH_{min}$, bei der das Quellen angefangen hat $\varepsilon_{cds,RH_min}$ (siehe Gleichung (15)) und der Schwinddehnung bei der aktuellen (erhöhten) Luftfeuchtigkeit (*RH)* $\varepsilon_{cds,RH}$ zum Zeitpunkt $t_\infty$ (siehe Gleichung (17)).

$$\Delta\varepsilon_{Quellen} = \varepsilon_{cds,RH_min} - \varepsilon_{cds,RH} \tag{16}$$

$\Delta\varepsilon_{Quellen}$ die maximale Größe des Quellens

$\varepsilon_{cds,RH}$ Endwert des Trocknungsschwinden mit der Luftfeuchte RH

$\varepsilon_{cds,RHmin}$ Endwert des Trocknungsschwinden mit der Luftfeuchte RHmin

$$\varepsilon_{cds,RH} = \beta_{RH} \cdot \varepsilon_{cds0}(f_{cm}) \tag{17}$$

$\beta_{RH}$ Beiwert zur Berücksichtigung der relativen Luftfeuchte RH auf die Größe des Trocknungsschwinden

$$\beta_{RH} = -1{,}55 \cdot \left(1 - \left(\frac{RH}{100}\right)^3\right) \tag{18}$$

Abb. 18 stellt die gleiche Problemstellung, die bereits in Abb. 17 zu sehen ist, mit einer trapezförmigen Verteilung der Feuchtigkeit dar. Der Querschnitt wird in dem Fall bei einer konstanten Umgebungsfeuchtigkeit von RH = 60% gehalten bis die durchschnittliche Feuchtigkeit im Querschnitt auf $\rho_{RH}$ = 91% sinkt (siehe dicke schwarze Linie in Abb. 18). Ist diese Feuchtigkeit erreicht, erhöht sich die Umgebungsfeuchtigkeit auf 85%. Zu diesem Zeitpunkt aktiviert sich das Quellen und verursacht eine gespiegelte trapezförmige Verteilung der Feuchtigkeit (siehe dicke rote Linie in Abb. 18) mit einer Mindestfeuchtigkeit $RH_{int} = RH_{min}$ und einer Obergrenze von $RH_{akt}$. Da in diesem Beispiel die niedrigste Feuchtigkeit mit RH = 60% definiert wurde, handelt es sich um die minimale Feuchtigkeit $RH_{min}$, die gleichzeitig die Initiierungsfeuchtigkeit des Quellens $RH_{int}$ repräsentiert.

Damit die Geschwindigkeit der Interaktion des Schwindens und Quellens richtig berechnet werden kann, muss eine durchschnittliche Feuchtigkeit des Querschnitts für die beiden rheologischen Effekte ($\rho_{RH,Schwinden}$, $\rho_{RH,Quellen}$) festgestellt werden. Sobald die durchschnittliche Feuchtigkeit bekannt ist, kann die gesamte Geometrie der Feuchtigkeitsverteilung über den Querschnitt berechnet werden.

Zu beachten ist, dass sobald die Umgebungsfeuchtigkeit *RH* steigt, die neu berechnete theoretische Feuchtigkeitsverteilung der Austrocknung unter Berücksichtigung der aktuellen Umgebungsfeuchtigkeit $RH_{akt}$ und der durchschnittlichen Feuchtigkeit des Betonquerschnitts $\rho_{RH}$, nicht der realen Feuchtigkeitsverteilung entspricht, da es zu einer Interaktion zwischen

Schwinden und Quellen kommt. Eine derartig berechnete Feuchtigkeitsverteilung ist für ältere Betonkörper geeignet, die der ursprünglichen oder neuen Feuchtigkeit von Anfang an exponiert wurden (siehe dünne strichlierte grüne Linie in Abb. 18).

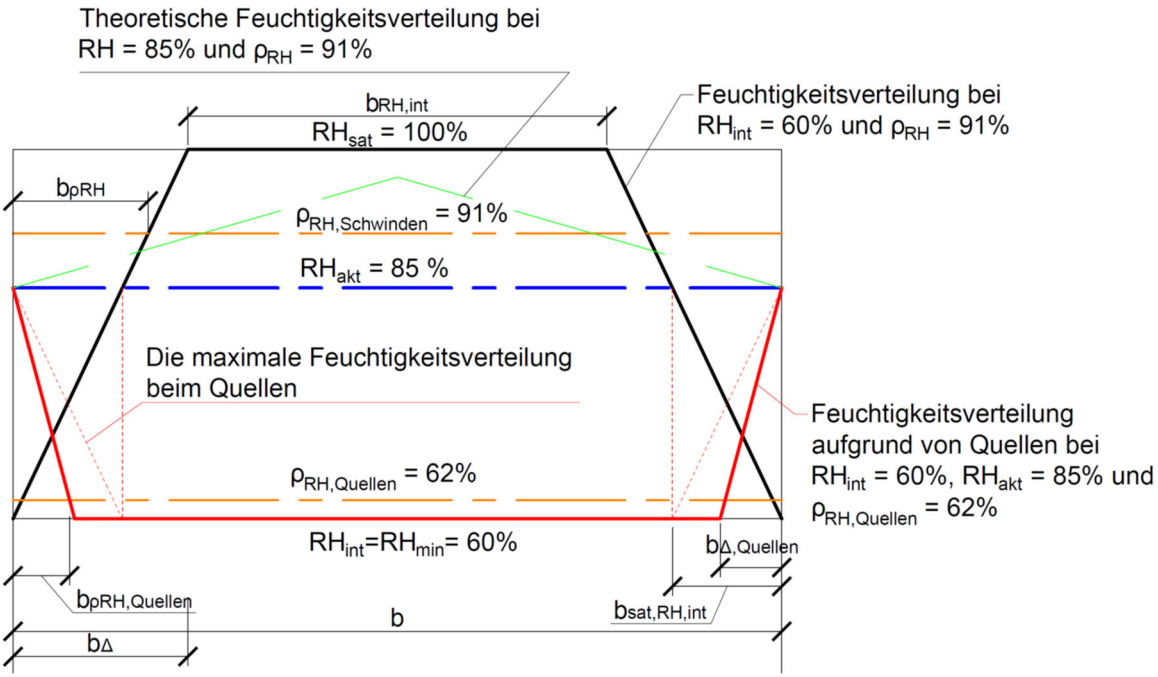



**Abb. 18:** Die trapezförmige Verteilung der Feuchtigkeit über die Wandbreite *b* unter Berücksichtigung der Interaktion von Schwinden und Quellen. Der Betonkörper wird bei einer Umgebungsfeuchtigkeit von RH = 60% bis zum Erreichen einer durchschnittlichen Feuchtigkeit von 91% gelagert, bevor die Feuchtigkeit auf 85% erhöht wird, um Quellen zu aktivieren.

Das Quellen ist abgeschlossen, sobald der ausgetrocknete Randbereich die neue Umgebungsfeuchte RH erreicht (siehe Abb. 17– grüne Linie). In der trapezförmigen Verteilung der Feuchtigkeit ist dieser Zeitpunkt erreicht, wenn die Breite der Verteilungsfeuchte des Quellens $b_{\Delta,Quellen}$ (siehe Abb. 18) gleich oder größer ist, wie die Breite $b_{sat,RH,int}$ der Verteilungsfeuchte des Schwinden (kurz bevor das Quellen angefangen hatte) mit der aktuellen Umgebungsfeuchtigkeit $RH_{akt}$ (siehe Abb. 19).

Auf der linken Seite der Abb. 19 ist mit blauer Schraffur die Feuchtigkeitsverteilung des Schwindens und Quellens dargestellt. Das Feuchtigkeitsniveau, das sich unter der dicken schwarzen Schwindlinie befindet, ist „saturierter“ Beton. Alles was sich oberhalb der Schwindlinie befindet wird als „ausgetrockneter“ Beton angesehen. Bei der roten Linie handelt es sich um die gespiegelte Feuchtigkeitsverteilung des Quellens. Alles was sich darunter befindet wird als„saturiert“, alles was darüber als „ausgetrocknet“ angesehen. Der Bereich, der sich unter der Quell- und Schwindlinie bis zu $RH_{min}$ befindet wird als nichtreale Betonfeuchtigkeit von 200% der Betonfeuchtigkeit definiert. Der Bereich, der sich über den Linien bis zu $RH_{akt}$ befindet hingegen wird als ausgetrocknet angesehen und mit 0% Feuchtigkeit festgelegt. Ist die Breite $b_{\Delta,Quellen} = b_{sat,RH,int}$ so haben die Flächen der beiden Bereiche (200% und 0% Feuchtigkeit) die gleiche Größe, wodurch der saturierte Bereich des Betons, wie auf der rechten Hälfte von Abb. 19, dargestellt werden kann. Zu diesem Zeitpunkt ist die Umgebungsfeuchtigkeit und die des Randes des Betonkörpers im Gleichgewicht. Die erhöhte Umgebungsfeuchtigkeit beeinflusst nicht mehr die Struktur wodurch das Quellen abgeschlossen ist.

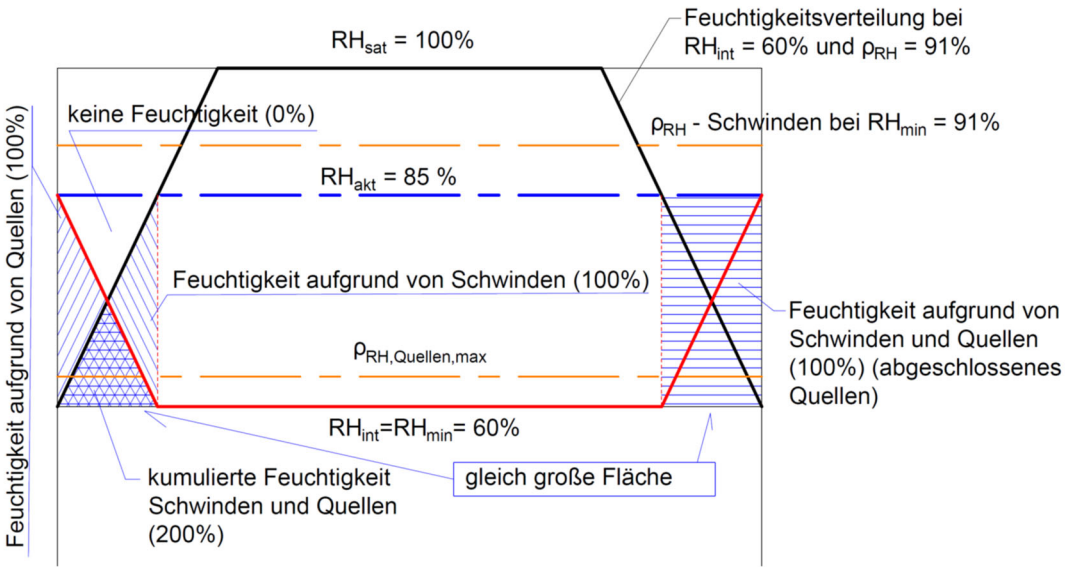



**Abb. 19:** Maximales Quellen. Die Randbereiche erreichen die Feuchtigkeit der aktuellen Umgebungsfeuchte ($RH_{akt}$ = 85%)

- Einfluss der Temperatur

Ähnlich wie beim Kriechmodell ist es möglich die Arrhenius Gleichung in das Schwindmodell zu implementieren (siehe Gleichung (19)). Im EC 1992-1-1 und MC 2010 ist die Aktivierungsenergie A gleich 4000. Umso höher die Aktivierungsenergie ist desto höher ist die Temperaturempfindlichkeit und umgekehrt. Die Empfindlichkeit durch die Aktivierungsenergie kann Betonabhängig gesteuert werden.

$$t_T = \sum_{i=1}^{n} \Delta t_i \cdot exp\left[\frac{\mathrm{A}}{293} - \frac{\mathrm{A}}{273 + T(\Delta t_i)}\right] \tag{19}$$

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

Mit der Arrhenius Gleichung wird die Zeitachse abhängig von der Temperatur skaliert, wodurch eine realitätsnähere Approximation der gemessenen Ergebnisse erzielt werden kann.

### 2.2.9 Arbeitspaket 9: Erarbeitung von Empfehlungen für die Annahmen von $E_c$ und $\alpha_T$ 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 Abhängigkeiten realitätsnah zu beschreiben. Die Kriechmodelle nach EC 1992-1-1 [1] und MC 2010 [2] beinhalten Gleichung (20) (mit $A = 4000$ und $C = 13{,}65$) 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 (20) wurde mittels der Arrhenius Gleichung, welche die Geschwindigkeit der physikalischen und chemischen Prozesse in Temperaturabhängigkeit beschreibt und durch die Aktivierungsenergie gesteuert wird, hergeleitet. In den Normmodellen wird Gleichung (20) nicht für die Kriechentwicklung nach der Belastung

berücksichtigt, da nur wenige Labor-Kriechexperimente, bei denen der Einfluss der Temperatur nach der Belastung auf die Kriechentwicklung untersucht wurde, vorhanden sind.
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 in ihre allgemeine Form umgeschrieben, siehe Gleichung (20). Mit der Vergrößerung der Aktivierungsenergie in Gleichung (20) kam es zu einer Steigerung der Empfindlichkeit des Betons in Bezug auf Temperaturveränderungen. Durch die Anwendung von Gleichung (20) kam es jedoch zu keiner Beeinflussung der maximalen Kriechstauchungen zum Zeitpunkt $t_\infty$, sondern nur zu einer Veränderung der Geschwindigkeit der durchgeführten Prozesse.
Die Berücksichtigung von Gleichung (20) 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 [3], [5].

$$t_T = \sum_{i=1}^{n} \Delta t_i \cdot exp\left[\mathrm{C} - \frac{\mathrm{A}}{273 + T(\Delta t_i)}\right] \tag{20}$$

| | |
|---|---|
| A | Aktivierungsenergie |
| C | Konstante - siehe Gleichung (21) |
| $t_T$ | das temperaturangepasste Betonalter |
| $\Delta t_i$ | die Anzahl der Tage, in denen die Temperatur T vorherrscht |
| $T(\Delta t_i)$ | die Temperatur in °C im Zeit-Intervall $\Delta t_i$ |

$$C = \frac{A}{293} \tag{21}$$

**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 Gradiente des Schwindens 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, 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 $\rho_{RH}$. Trotz der sehr realitätsnahen Beschreibung der Entwicklung des Schwindens der großformatigen Probekörper, können bei extremen Werten fehlerhafte Ergebnisse vorkommen [3]. 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 Abb. 11 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.
Anhand der Quellentheorie wurde die Möglichkeit präsentiert über den Querschnitt unterschiedliche Feuchtigkeitsverteilungen zu berücksichtigen. Die Annahme der Proportionalität zwischen Trocknungsschwinden und der inneren Betonfeuchtigkeit ermöglicht es die mittlere Feuchtigkeit im Betonkörper zu berechnen. Die präsentierte Theorie zeigt, wie ausgehend von der mittleren Feuchtigkeit im Betonkörper und der relativen Luftfeuchtigkeit der Umgebung eine lineare Approximation der Feuchtigkeitsverteilung im Betonkörper berechnet werden kann. Aufbauend auf dieser approximierten Feuchtigkeitsverteilung kann anhand der Quellentheorie die variable relative Luftfeuchtigkeit der Umgebung berücksichtigt werden und dadurch ein etwaiges Quellen der Betonkörper simuliert werden.

**Anwendung der weiterentwickelten Modelle des Kriechens und Schwindens in der Praxis**
Die vorgestellten weiterentwickelten Kriech- und Schwindmodelle brauchen zusätzliche Parameter wie die Angabe der genauen Temperatur- und Luftfeuchtigkeitsschwankungen, die den normalen Bauingenieuren in der Praxis nicht zu Verfügung stehen. In Österreich gibt es 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 dann als Vorhersagefunktion angewendet werden, siehe Abb. 20 für die Temperatur und Abb. 21 für die Luftfeuchtigkeit.

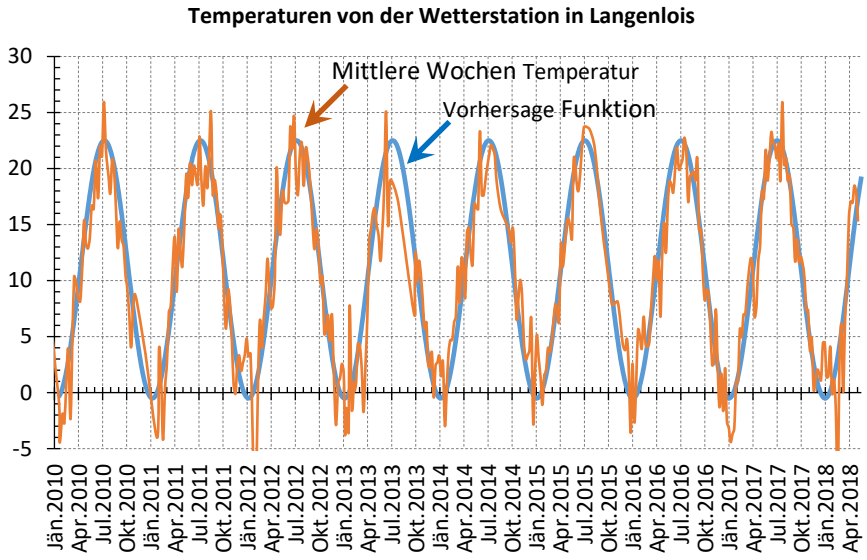



**Abb. 20:** Mittlere Wochentemperaturen und theoretische Temperaturvorhersagefunktion [3]

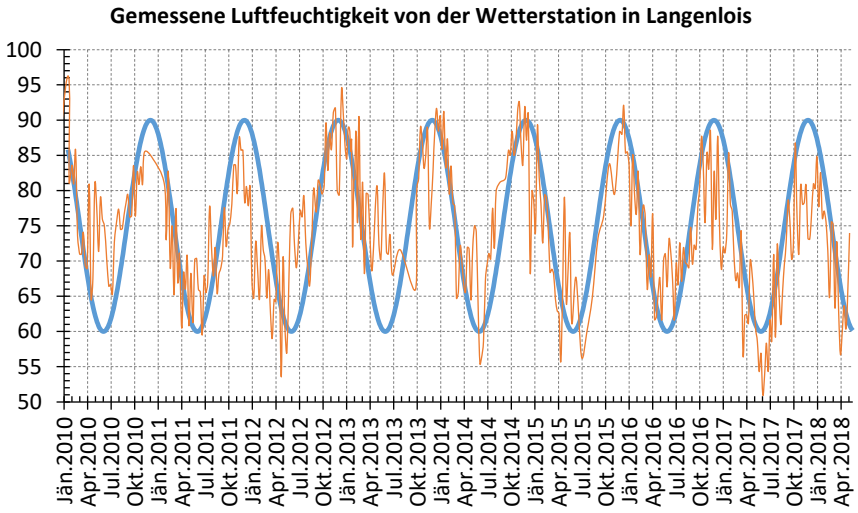



**Abb. 21:** Mittlere Wochen- Luftfeuchtigkeit und theoretische Luftfeuchtigkeitsvorhersagefunktion [3]

Für die Verwendung dieser vereinfachten Vorhersagefunktionen sind die mittlere Temperatur/Feuchtigkeit, der kälteste/trockenste Tag des Jahres, die Amplitude der Temperatur/Feuchtigkeit und das Datum, wann der Betonkörper betoniert wird, notwendig. Würden die Vorhersagefunktionen für Temperatur und der Luftfeuchtigkeit automatisch in ein Programm eingespielt werden, könnten Messungen aus einiger strategischen meteorologischen Messstationen ausgewertet werden, damit aufbauend auf diesen Messungen eine meteorologische Datenbank erstellt wird, welche alle benötigten Paramater beinhaltet. Abb. 22 zeigt ein Netz für Österreich, welches für die Erstellung solch einer Datenbank verwendet werden kann.

Mit diesem Ansatz ist es möglich ein benutzerfreundliches Berechnungsmodell zu erstellen, welches nur zwei neue Parameter erfordert: den Standort der Baustelle (GPS-Koordinaten) und den Baubeginn.

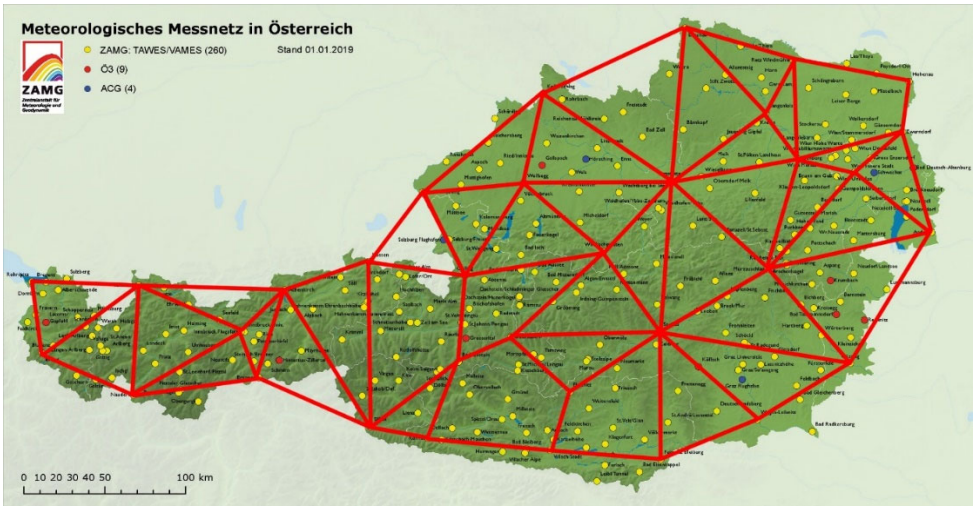



**Abb. 22:** Meteorologisches Messnetz in Österreich mit einem zusätzlichen Netz, welches für die Entwicklung einer Datenbank für die Vorhersagefunktionen der Temperatur und Luftfeuchtigkeit verwendet werden könnte [3]

### 2.2.10 Literatur

[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] Suza, D.: Einfluss des Maßstabseffekts und der Umgebungsbedingungen auf das Kriechen und Schwinden von Beton. Dissertation, Institut für Tragkonstruktionen, TU Wien, 2020.

[4] Suza, D., Kollegger, J., Müller, H.: Influence of changing environment conditions on the development of shrinkage strain and the expansion coefficient of large concrete specimens. Conference Proceedings, IABSE Congress New York, 2019, ISBN: 978-3-85748-165-9; S. 1955 - 1959.

[5] Suza, D., Kollegger, J., Müller, H.: Comparison of real and theoretical creep strains of large concrete specimens during changing environment conditions"; Conference Proceedings, *fib*-Symposium Krakow, 2019, ISBN: 978-2-940643-01-1; S. 237 - 238.

## 3 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 im Laufe des Projektes keine Änderungen bei der Arbeitsaufteilung, der Kostenstruktur und der Zielsetzung. Seit 27.10.2020 ist Herr Dipl.- Ing. Wolfgang Bachofner am Institut für Tragkonstruktionen angestellt und ist im Forschungsprojekt bei der Auswertung der experimentellen Daten und bei der Entwicklung von Materialmodellen tätig.

## 4 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?

**Publikationen**:

- Suza, D., Kollegger, J., Müller, H., Breiner, R.: *Comparison of creep and shrinkage of large concrete specimens with theoretical models*. Conference Proceedings, *fib*-Congress Melbourne, 2018.
- Suza, D., Kollegger, J., Müller, H.: *Comparison of real and theoretical creep strains of large concrete specimens during changing environment conditions.* Conference Proceedings, *fib*-Symposium Krakow, 2019.
- Suza, D., Kollegger, J., Müller, H.: *Influence of changing environment conditions on the development of shrinkage strain and the expansion coefficient of large concrete specimens*. Conference Proceedings, IABSE Congress New York, 2019.

- Bachofner, W., Kollegger, J., Suza, D.: *Long-term concrete strain measurements of large-scale experiments exposed to environmental effects*. IABSE Congress Prague, 2022, eingereicht.
- Bachofner, W., Kollegger, J.: *Comparison of long-term concrete strain measurements of large-scale experiments with modified calculation models*. *fib*-Symposium Oslo, 2022, in Ausarbeitung.

**Dissertation**:

- Suza, D.: *Einfluss des Maßstabseffekts und der Umgebungsbedingungen auf das Kriechen und Schwinden von Beton*. Institut für Tragkonstruktionen, TU Wien, 2020.
- Bachofner, W.: *Zeitabhängiges Materialverhalten von Beton- Gegenüberstellung von realen Langzeitmessungen mit numerischen Simulationen*. Institut für Tragkonstruktionen, TU Wien, in Ausarbeitung.

**Diplomarbeiten**:

- Bazár, E.: *Kriechen und Schwinden von großformatigen Betonkörpern*. Institut für Tragkonstruktionen, TU Wien, 2018.
- Máté, M.: *Untersuchungen von rheologischen Effekten an großformatigen Betonkörpern unter veränderlichen Umgebungsbedingungen*. Institut für Tragkonstruktionen, TU Wien, 2019.
- Altenburger, K.: *Analyse von klassischen und erweiterten Rechenmodelle für Kriech- und Schwindverformungen von Beton anhand von Laborproben und in situ Verformungen der Erlaufbrücke Nord*. Institut für Tragkonstruktionen, TU Wien, 2020.

## 5 Erläuterungen zu Kosten & Finanzierung

Es kam zu keinen Abweichungen vom Kostenplan.

## 6 Projektspezifische Sonderbedingungen und Auflagen

Die projektspezifischen Bedingungen und Auflagen wurden eingehalten.

## 7 Meldungspflichtige Ereignisse

Im gesamten Verlauf des Forschungsprojektes gab es keine meldepflichtigen Ereignisse.