

Zielsichere Herstellung von Bauteilen mit temperatur- und CO2-optimierten Betonen

1. Zielerreichung und Projektstatus	1
2. Durchgeführte Arbeiten im Berichtszeitraum	1
2.1. Projektleitung	1
2.2. wissenschaftliche Leitung	1
2.3. Analyse Baustellenmessungen.....	2
2.4. Langzeitmonitoring	3
2.5. Materialmodelle für die Simulation	7
2.6. Berechnungsmodelle und Validierung	9
2.7. Parameterstudie	10
3. Erläuterung von wesentlichen Änderungen bei den Kosten	11
4. Beitrag der Projektergebnisse zur Nachhaltigkeit	11

1. Zielerreichung und Projektstatus

Die für das erste Forschungsjahr gesteckten Ziele des Vorhabens wurden erreicht. Die globalen Ziele des Vorhabens sind damit realistisch. Im ersten Forschungsjahr wurde insbesondere mit der Entwicklung eines Auswertungsalgorithmus für faseroptische Temperatur- und Dehnungsmonitorings im erhärtenden Beton in AP 4 und der Materialmodellentwicklung zur diskreten Simulation des Trocknungsschwindens in der Randzone in AP 5 wissenschaftliches Neuland betreten. Da beide Punkte erfolgreich abgeschlossen wurden ist die Basis für das weitere Vorgehen im zweiten Forschungsjahr geschaffen.

2. Durchgeführte Arbeiten im Berichtszeitraum

2.1. Projektleitung

Neben der Vertretung gegenüber der FFG wurden während der Projektlaufzeit die terminliche und kaufmännische Projektkoordination, die Organisation von Projektmeetings, die Koordination der Kommunikation zwischen den ProjektpartnerInnen, die Partnerkommunikation (Wirtschaft und Wissenschaft) sowie das Vertrags- und Kostenmanagement abgewickelt.

Die Arbeitsschritte konnten gemäß Plan erarbeitet werden.

Es gab keine wesentlichen Abweichungen oder Veränderungen.

Der Projektfortschritt liegt mit 33% im Plan, bezogen auf die Gesamtprojektlaufzeit.

2.2. wissenschaftliche Leitung

Im AP2 wurde ein Kick-off-Meeting zur Projekteröffnung sowie zwei weitere Treffen zur Besprechung des Zwischenstands (nach 6 Monaten) und des Endstands (nach 12 Monaten) vorbereitet und abgehalten.

Ein weiterer Fokus lag auf der Integration des jüngsten Wissensstands zur rechnerischen Vorhersage der erhärtungsbedingten Zwangbeanspruchung von Betonbauteilen. Hierzu wurden insbesondere die Arbeitstreffen des RILM TC 287 (Early age and long-term crack width analysis in RC Structures) genutzt. Der Wissensaustausch und die Fachdiskussion konzentrierten sich hierbei insbesondere auf die rechnerische Erfassung der Verformungsbehinderung über den sogenannten Behinderungsgrad. Jüngste Entwicklungen aus internationalen Fachkreisen hatten hier eine Lösung erarbeitet, die eine Reduktion des Behinderungsgrads mit einsetzender Rissbildung vorsahen. Im Hinblick auf die infolge der Rissbildung abnehmenden Steifigkeit des behinderten Bauteils ist eine derartige Beurteilung aber mechanisch inkonsistent, sodass der bisherige Wissensstands manifestiert wurde.

Darüber hinaus erfolgte eine enge Interaktion mit dem aktuellen Forschungsprojekt „Upycling von Fahrbahnwegen“ von Univ.-Prof. Konrad Bergmeister – BOKU Wien, bei dem der breite Einsatz von CO2-reduzierten Betonen auf Basis von rezyklierten Aggregaten erforscht wird. Der Austausch konzentrierte sich dabei vor allem auf die Rezepturentwicklung im genannten Forschungsprojekt.

Unter der wissenschaftlichen Leitung konnte in den nachfolgenden Arbeitspaketen der folgende Projektstand festgestellt werden:

1. Wissenschaftlicher Projektstart (100 %)
2. Update nationaler und internationaler Wissenstand (70 %)
3. Systematische Analyse vorhandener Bauwerksmessungen (60 %)
4. Langzeitmonitoring installiert und Messungen in Betrieb (80 %)
- 5.a) Verfügbarkeit von Materialmodellen für die Simulation (100 %)
- 5.b) Erweiterung Thermomechanisches Berechnungsmodell (100 %)
6. Berechnungsmodelle und Validierung (66 %)
7. Parameterstudie (5 %)

Die Arbeitsschritte konnten damit gemäß Plan erarbeitet werden.

Es gab keine wesentlichen Abweichungen oder Veränderungen.

Der Fertigstellungsgrad des Arbeitspakets liegt mit 33% im Plan, bezogen auf die Gesamtprojektlaufzeit.

2.3. Analyse Baustellenmessungen

In diesem Arbeitspaket werden die erhobenen Messdaten aus diversen Bauvorhaben zusammengetragen und systematisch ausgewertet. Im Vordergrund steht hierbei der Einfluss der klimatischen Randbedingungen auf den Zusammenhang von Frischbetontemperatur und maximaler Bauteiltemperatur je nach Bauteiltyp und Bauteildicke. Die zu schaffende Datenbank wird grundsätzlich aus den Bauwerksmessungen an den Vorhaben Koralmbahn Baulos 3.1, Silltaltunnel und S7 gespeist. Hinzu wurden weitere Messungen aus früheren Forschungsprojekten des Forschungsnehmers inkludiert. Dabei handelt es sich um die Kraftwerksbodenplatte Boxberg, die Schifffahrtsschleusen Wusterwitz, Sülfeld, Rothensee und den Kühlturm Kraftwerk Westfalen. Im weiteren Projektverlauf wird diese Datenbank laufend ergänzt.

Bei den Messergebnissen handelt es sich überwiegend um reine Temperaturmessungen, die für sich allein nicht ausreichend sind, um die erhärtungsbedingte Verformung und Zwangbeanspruchung zu quantifizieren. Allerdings resultiert die Geschichte der erhärtungsbedingten Verformungen und Zwangbeanspruchungen nicht allein aus dem Materialverhalten, sondern auch sehr stark aus dem Zusammenspiel von Frischbetontemperatur und Umgebungstemperatur, welches aus den Temperaturmessungen vorliegt. Dieses Zusammenspiel ist jedoch nicht fundiert erforscht und wird oftmals mit Erfahrungswerten abgeschätzt. Aus der geschaffenen Datenbasis werden die in weiterer Folge im Zuge der Parameterstudie in AP7 (zweites Forschungsjahr) ermittelten Zusammenhänge für den Einfluss des Zusammenspiels von Frischbetontemperatur und Umgebungstemperatur auf die Rissgefahr untermauert. Unter Zuhilfenahme der geschaffenen Datenbank liegt damit am Ende des zweiten Forschungsjahres ein umfassendes Verständnis zum Zusammenspiel von klimatischen Randbedingungen und Frischbetontemperatur im Hinblick auf die zu erwartende Rissgefahr für verschiedene Rezepturen und Bauteildicken vor.

Ungeachtet der tatsächlichen thermomechanischen Zusammenhänge der erhärtungsbedingten Rissgefahr von Betonbauteilen wird in der Baupraxis oftmals die maximale Bauteiltemperatur als Parameter der Qualitätsüberwachung hinsichtlich erhärtungsbedingter Risskontrolle eingesetzt. Für sich allein ist die maximale Bauteiltemperatur als Kontrollgröße zwar nur als pragmatischer Ansatz ohne physikalische Basis zu verstehen; wird die maximale Bauteiltemperatur aber in Zusammenhang mit Frischbetontemperatur und Umgebungstemperatur gesetzt, so lassen sich hieraus wesentliche Schlüsse für etwaige Maßnahmen zur Rissvermeidung ziehen, die in AP8 (drittes Forschungsjahr) ausgearbeitet werden. Unter Zuhilfenahme der geschaffenen Datenbank liegt damit am Ende des Forschungsvorhabens auch ein umfassendes Verständnis zur Verwendung der maximalen Bauteiltemperatur zur Qualitätskontrolle - und im Falle von Maßnahmensteuerung auch zur Qualitätssicherung vor.

Die Arbeitsschritte konnten insgesamt gemäß Plan erarbeitet werden.

Es gab keine wesentlichen Abweichungen oder Veränderungen.

Der Fertigstellungsgrad des Arbeitspakets liegt beträgt 80%.

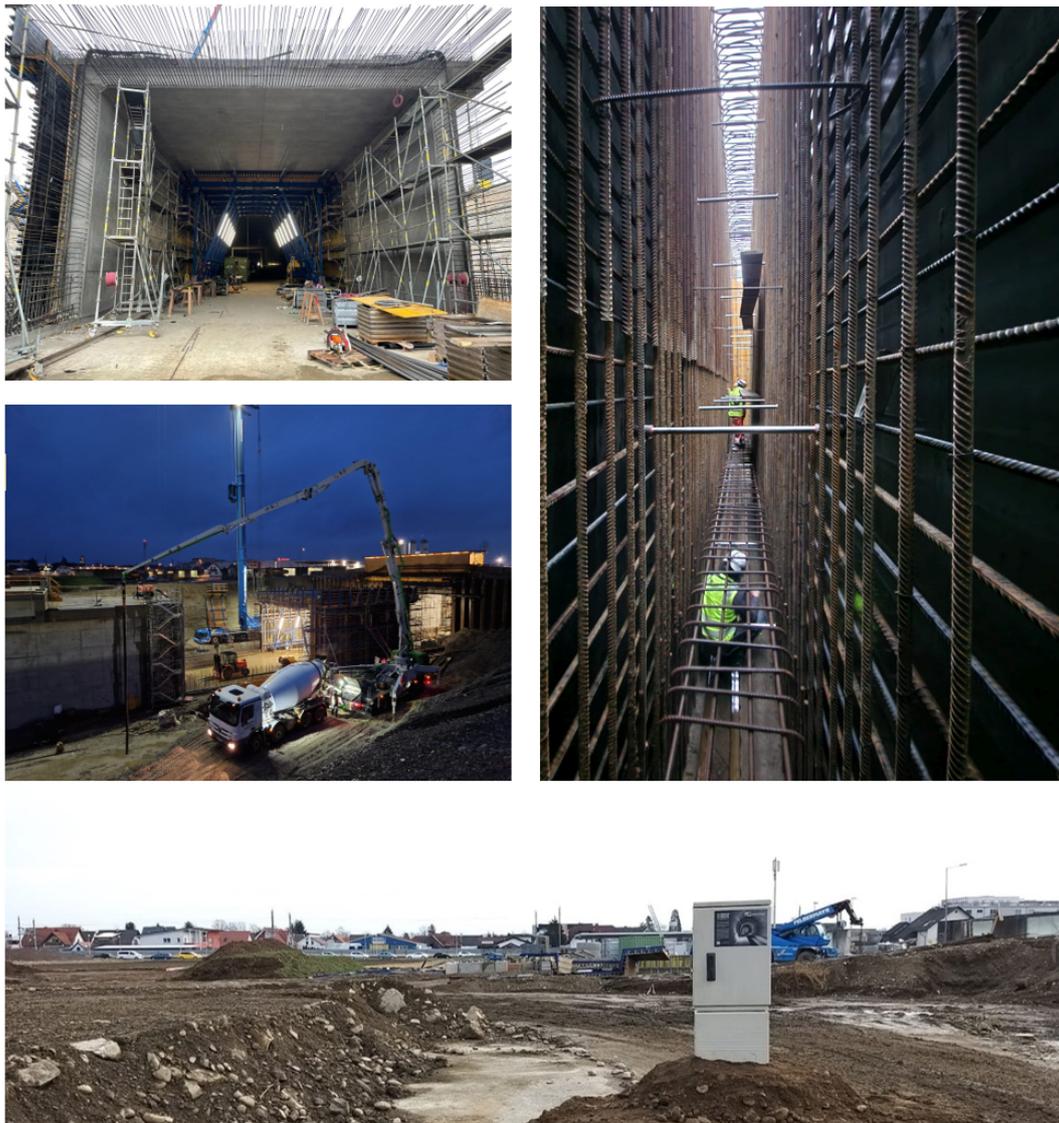


Abbildung 2.4.2: Installation FOS-Langzeitmonitoring Koralmbahn Baulos 3.1

Als Messdaten werden in diesem Monitoring je Messpunkt Temperaturen und Dehnungen aufgezeichnet. Während die Temperaturergebnisse direkt verwendet werden können, müssen die Dehnungen unter Berücksichtigung des Messverfahrens aufbereitet werden. Der Einsatz von verteilten faseroptischen Messmethoden ist bei der Erfassung von erhärtungsbedingten Zwangdehnungen und Zwangspannungen jedoch nicht endgültig erforscht. Im Forschungsprojekt wurden daher umfassende Überlegungen angestellt und ein Auswertungsalgorithmus erstellt. Die Hintergründe hierzu und die Funktionsweise des Auswertungsalgorithmus werden derzeit in einem Fachbeitrag zusammengefasst und der Fachöffentlichkeit zugänglich gemacht.

Für einen Einblick in die Messergebnisse zeigt Abbildung 2.4.3 die erfassten Temperaturentwicklungen über die Zeit und Abbildung 2.4.4 die dazugehörigen Dehnungsverteilungen als Rohdaten bzw. in aufbereiteter Form.

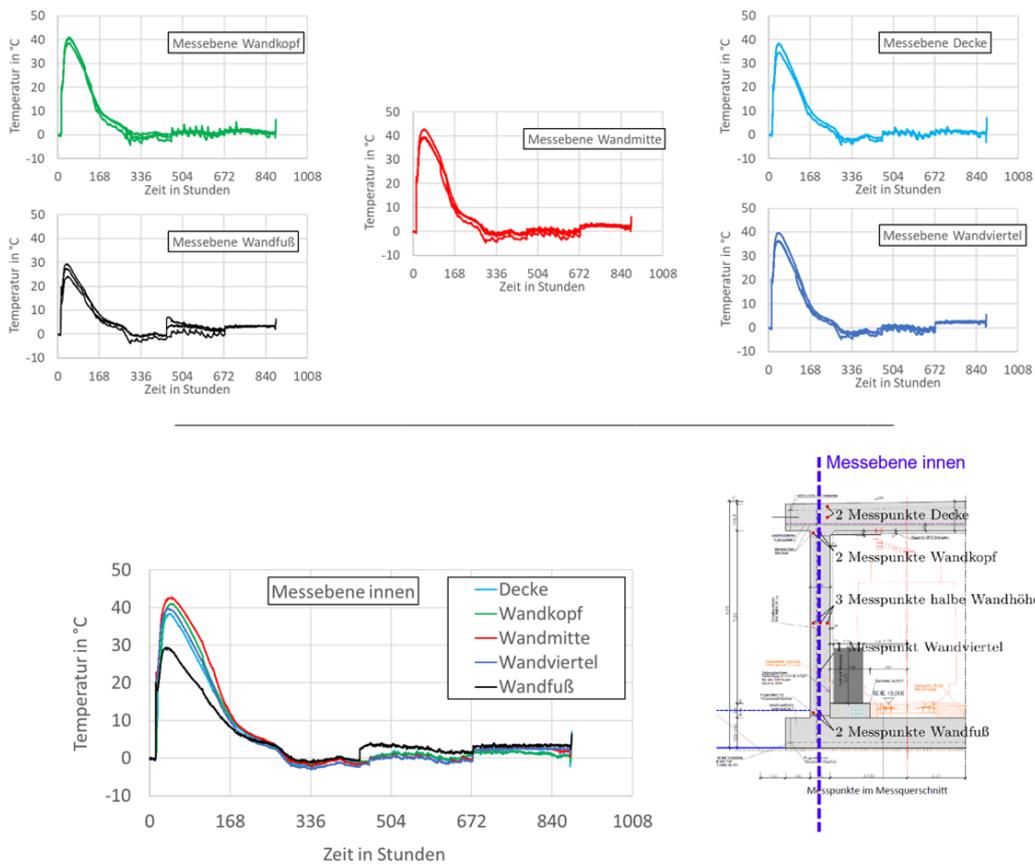
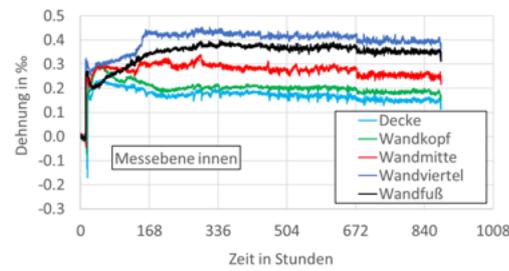


Abbildung 2.4.3: Temperaturentwicklungen Langzeitmonitoring Koralmbahn Baulos 3.1

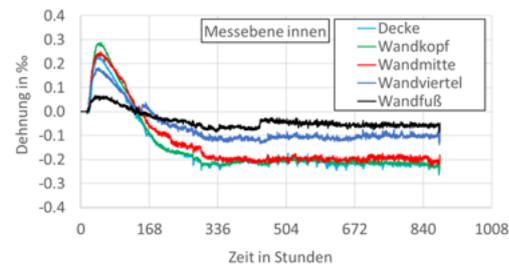
▪ Messdaten – Was wird gemessen?

– Dehnungsmessung



▪ Auswertung der Messdaten: tatsächliche Dehnung

$$\epsilon_{\text{real}} = \epsilon_{\text{mess}} + \alpha_T \cdot \Delta T$$



▪ Auswertung der Messdaten: Zwangspannung

$$\sigma_{c, \text{ela}}(t) = \int_0^t (\Delta \epsilon_{\text{mess}}(t) - \Delta \epsilon_{cs}(t)) \cdot E(t) dt$$

$$\sigma_{c, \text{visc}}(t) = \int_0^t (\Delta \epsilon_{\text{mess}}(t) - \Delta \epsilon_{cs}(t) - \Delta \epsilon_{cc}(t)) \cdot E(t) dt$$

abhängig von der Spannungsgeschichte

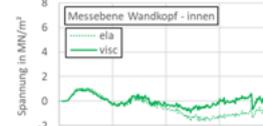
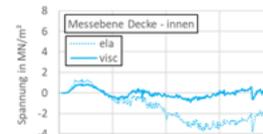
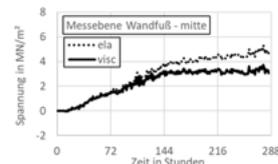


Abbildung 2.4.4: Dehnungs- und Spannungsentwicklungen Langzeitmonitoring Koralmbahn Baulos 3.1

Die Arbeitsschritte konnten insgesamt gemäß Plan erarbeitet werden.

Es gab keine wesentlichen Abweichungen von den geplanten Arbeiten. In Ergänzung zu dem geplanten Messvorhaben Koralmbahn Baulos 3.1 wurde aber vom Projektpartner ÖBB in Abstimmung mit diesem Forschungsprojekt ein weiteres Bauvorhaben (Sohle Semmering Basistunnel) um verteilte faseroptische Messungen ergänzt und messtechnisch erfasst. Einen ersten Einblick in dieses Vorhaben gibt Abbildung 2.4.5. Die Messergebnisse lagen allerdings im ersten Forschungsjahr nicht mehr rechtzeitig vor und werden daher im zweiten Forschungsjahr ausgewertet.

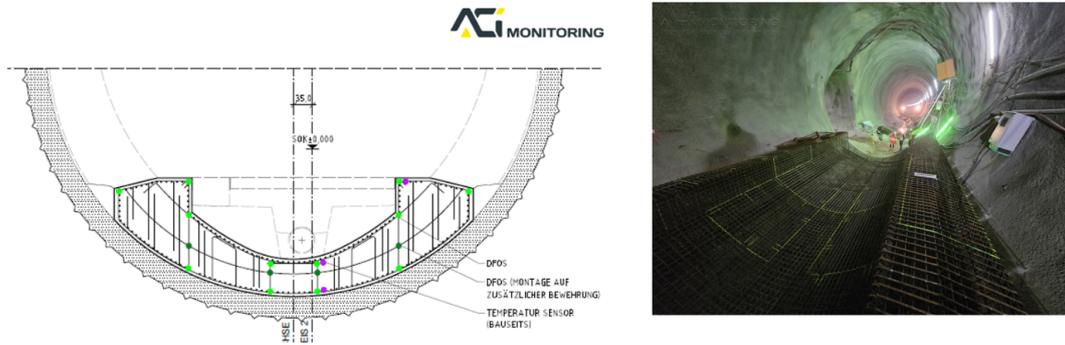


Abbildung 2.4.5: FOS Langzeitmonitoring Sohle Semmering Basistunnel

Der Fertigstellungsgrad des Arbeitspakets liegt mit 80% im Plan, bezogen auf die Gesamtprojektlaufzeit.

2.5. Materialmodelle für die Simulation

Für die thermomechanische Simulation werden gekoppelte thermomechanische Materialmodelle an vorhandene Materialuntersuchungen angepasst. Dies beinhaltet grundsätzlich die Wärmeentwicklung infolge der Hydratation sowie die Steifigkeits- und Zugfestigkeitsentwicklung - und sofern verfügbar auch Anpassungen an Messwerte zum Grund- und Trocknungsschwinden sowie zum Grundkriechen. Messdaten zum Schwinden und Kriechen sind jedoch in den seltensten Fällen verfügbar und werden daher oftmals durch die Materialmodelle aus der Norm Eurocode2 abgeschätzt, wie auch im vorliegenden Fall. Zur Veranschaulichung zeigen Abbildung 2.5.1 und Abbildung 2.5.2 die Anpassungen des Materialmodells an die Rezepturen Koralmbahn Baulos 3.1 und Tunnel Silltal.

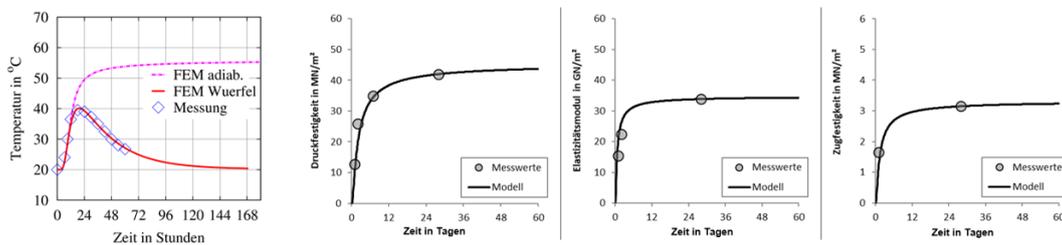
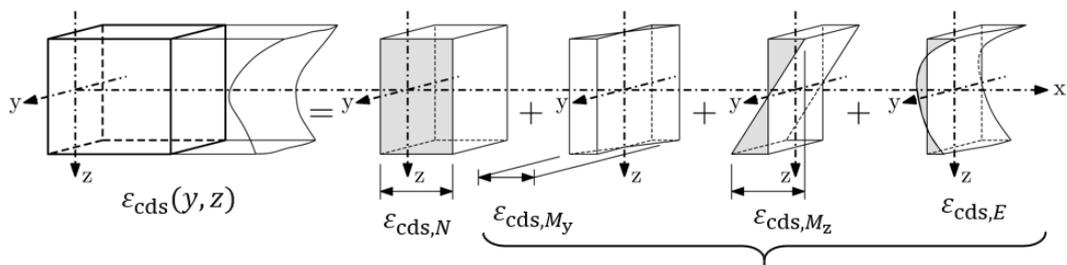


Abbildung 2.5.1: Anpassung Materialmodell zur Temperatur- und Festigkeitsentwicklung Silltal



nicht im EC2 ausgewiesen

Abbildung 2.5.2: Anteile des Verformungsfelds aus dem Trocknungsschwinden

Eine zentrale Forschungsfrage im vorliegenden Arbeitspaket ist die Erweiterung des bestehenden Materialmodells hinsichtlich des Trocknungsschwindens. Hierbei sollen sämtliche Spannungsanteile infolge des Trocknungsschwindens berücksichtigt werden.

Im Allgemeinen ist die Verformungseinwirkung aus dem Trocknungsschwinden gemäß den Feuchtfeldänderungen über den Querschnitt nichtlinear verteilt, wie in Abbildung 8 links gezeigt. Dieses Verformungsfeld kann in gleichmäßig im Querschnitt verteilte, linear über Breite und Höhe verlaufende sowie nichtlinear verteilte Anteile zerlegt werden, wie in Abbildung 2.5.3 rechts gezeigt.

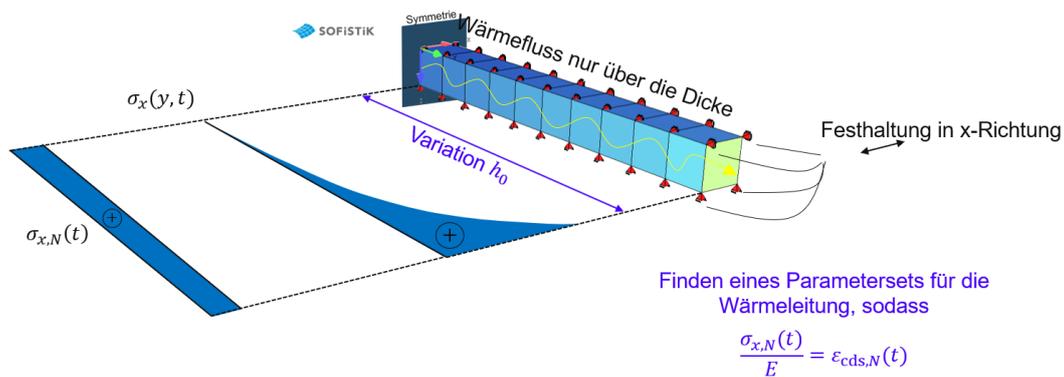


Abbildung 2.5.3: Vorgehensweise bei der Entwicklung eines Materialmodells zur Simulation des Trocknungsschwindens

Messungen zum Trocknungsschwinden konzentrieren sich allerdings vornehmlich auf den konstanten Anteil des Trocknungsschwindens, da dieser messtechnisch bestimmbar ist. Lineare und nichtlineare Anteile können sich demgegenüber aufgrund von Prüfkörperabmessungen und Querschnittskompatibilität üblicherweise nicht frei einstellen und führen zu Zwangsspannungen, die nicht mehr als Verformung gemessen werden können. In den normativen Materialmodellen werden ebenfalls nur die konstanten Anteile ausgewiesen, da diese Modelle auf Messungen beruhen, die wiederum nur den konstanten Anteil ausweisen. Für die Ingenieurpraxis ist das insofern akzeptabel, da sich Verformungen infolge Trocknungsschwinden und etwaige Makrorissbildung, sofern die Verformungen infolge Trocknungsschwinden behindert werden, üblicherweise unter Berücksichtigung des konstanten Anteils abschätzen lassen. Bei Bauteilen mit Gradienten über die Dicke oder Höhe, wie bspw. bei Bodenplatten oder Stützwänden ist die alleinige Zugrundelegung des konstanten Anteils jedoch nicht realistisch. Bei dickeren Querschnitten gewinnt zudem der nichtlineare Anteil stark an Bedeutung, wodurch Oberflächenrissbildung hervorgerufen werden kann (Randzone trocknet schneller aus und verkürzt sich gegenüber dem Kernbereich). Um diese Effekte im Forschungsvorhaben realistisch beurteilen zu können, wurde im Forschungsvorhaben ein neues Materialmodell zur orts- und zeitdiskreten Simulation der Verformungseinwirkungen aus dem Trocknungsschwinden entwickelt.

Grundsätzlich könnte ein derartiges Materialmodell auf der Diffusionsgleichung aufgebaut werden. Allerdings muss dabei berücksichtigt werden, dass die Verformungseinwirkungen aus dem Trocknungsschwinden nicht alleinig aus den elastischen Verformungen des Zementsteinskeletts infolge Porenunterdruck durch Austrocknung resultieren, sondern die einhergehende innere Druckbeanspruchung des Zementsteinskeletts wiederum Kriechverformungen hervorruft, die zeitlich verzögert auftreten. Insgesamt korreliert das Trocknungsschwinden damit nicht direkt mit der Trocknung.

Für eine möglichst transparente und in weiterer Folge auch praxisnahe Modellierung wurde daher eine alternative Simulation auf Basis von Wärmeleitung gewählt. Hierzu wurde ein einfaches FEM-Volumenmodell bestehend aus einer Elementreihe erstellt, das ausgehend von einer Starttemperatur über die Dicke auf Umgebungstemperatur auskühlt. Wärmefluss wurde hierbei nur über die Elementreihe zugelassen. Die einhergehenden Temperaturverformungen wurden anschließend in Längsrichtung behindert und in Form von Spannung ausgewertet. Aufgrund des nichtlinearen Wärmeabflusses über die Dicke und die Zeit ergibt sich dann ein nichtlinearer Spannungsverlauf über die Elementreihe. Im nächsten Schritt wurden dann die Parameter für Wärmekapazität und Wärmeleitkoeffizient so eingestellt, dass die zeitliche Entwicklung des konstanten Anteils aus dem Temperaturfeld gemäß FEM-Simulation und der prognostizierte Zeiterlauf für das Trocknungsschwinden gemäß normativen Materialmodell bei gleichen Dicken einander entsprechen. Die Vorgehensweise veranschaulicht Abbildung 2.5.4.

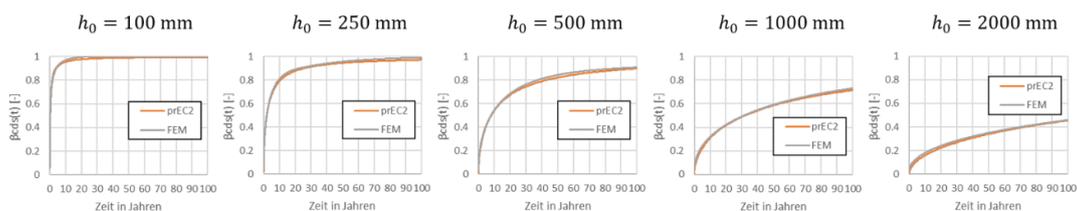


Abbildung 2.5.4: Gegenüberstellung der Ergebnisse zum Trocknungsschwinden gemäß entwickeltem Materialmodell für die Simulation und den Ergebnissen gemäß dem normativen Materialmodell

Auf diesem Wege konnte in weiterer Folge ein Parameterset für eine gute Übereinstimmung über den gesamten Dickenbereich gefunden werden. Das Ergebnis dieser Anpassung zeigt Abbildung 2.5.5.

Insgesamt konnten die Arbeitsschritte somit gemäß Plan erarbeitet werden.

Es gab keine wesentlichen Abweichungen oder Veränderungen.

Der Fertigstellungsgrad des Arbeitspakets ist 100%.

2.6. Berechnungsmodelle und Validierung

In diesem Arbeitspaket wurden numerische Berechnungsmodelle für die Bauteiltypen „Bodenplatte“, „Wand auf Fundament“, „Decke“ und „Tunnelquerschnitt“ erstellt. Für die spätere Verwendung dieser Berechnungsmodelle in der Parameterstudie wurden diese hinsichtlich Bauteildicke, Längsabmessung, Materialmodell, Umgebungsrandbedingung und Nachbehandlung parametrisch aufgebaut. Zur Veranschaulichung zeigt Abbildung 2.6.1 diese Berechnungsmodelle.

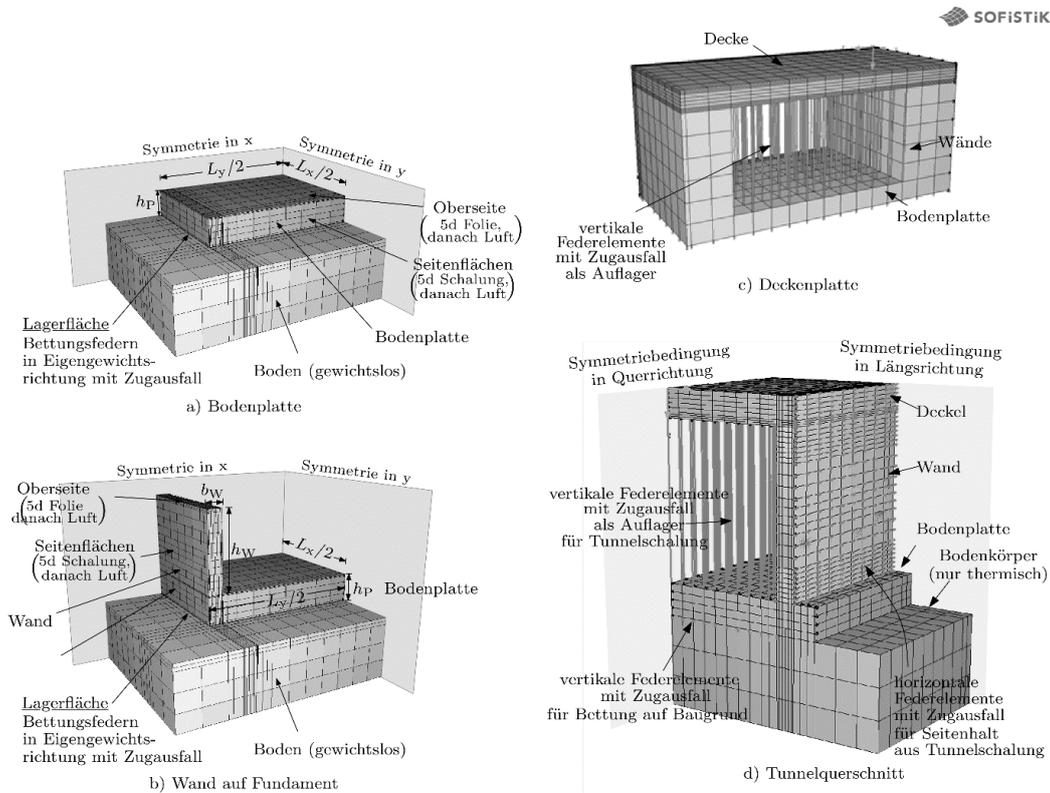


Abbildung 2.6.1: Berechnungsmodelle für die Simulation

Die Validierung der Berechnungsmodelle erfolgte durch einen Vergleich der berechneten Temperatur- und Dehnungsentwicklungen mit den Bauwerksmessungen aus AP 3 und AP 4. Abbildung 2.6.2 und Abbildung 2.6.3 zeigt diesen Vergleich auszugswise für das Vorhaben Koralmobahn Baulos 3.1.

Insgesamt konnte hierbei eine zufriedenstellende Übereinstimmung gefunden werden, sodass die Berechnungsmodelle für die weitere Verwendung in der Parameterstudie (AP 7) als geeignet anzusehen sind.

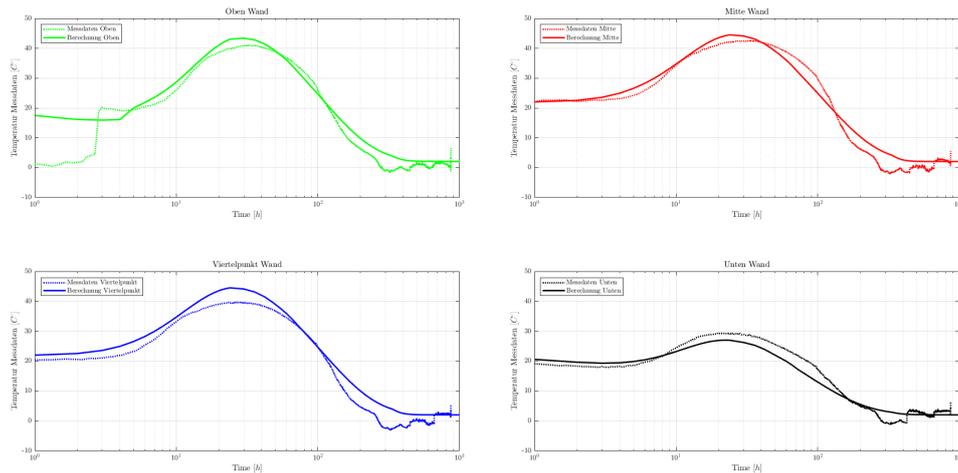


Abbildung 2.6.2: Vergleich der berechneten Temperatur- und Dehnungsentwicklungen mit den Messergebnissen am Beispiel Korallbahn 3.1

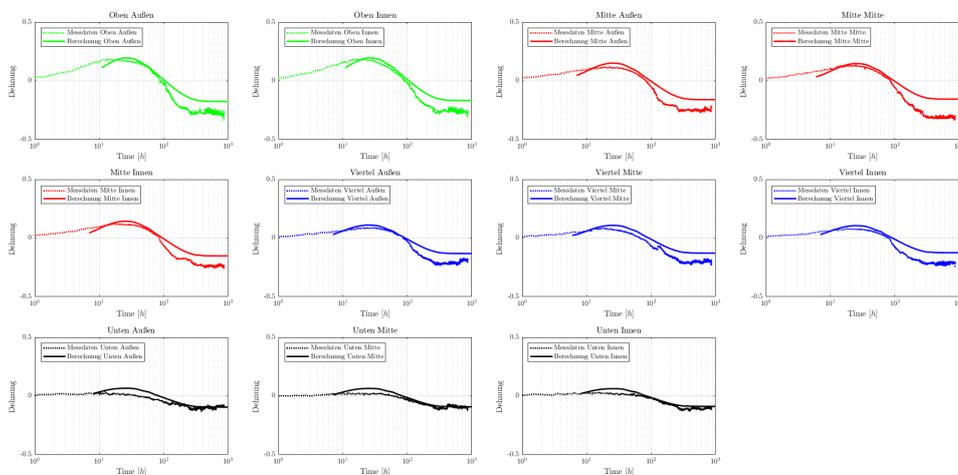


Abbildung 2.6.3: Vergleich der berechneten Temperatur- und Dehnungsentwicklungen mit den Messergebnissen am Beispiel Korallbahn 3.1

Die Arbeitsschritte konnten gemäß Plan erarbeitet werden.

Es gab keine wesentlichen Abweichungen oder Veränderungen.

Der Fertigstellungsgrad des Arbeitspakets liegt mit 66% im Plan, bezogen auf die Gesamtprojektlaufzeit.

2.7. Parameterstudie

In diesem Arbeitspaket wird eine umfangreiche numerische Parameterstudie zur erhärtungsbedingten Temperatur- und Spannungsentwicklung für die angeführten Bauteiltypen unter Variation der Bauteildicken, Rezepturen, klimatischen Randbedingungen und Frischbetontemperaturen sowie Nachbehandlungsmaßnahmen durchgeführt. Diese Parameterstudie wird vornehmlich im zweiten Projektjahr durchgeführt. Im ersten Projektjahr erfolgte in diesem Arbeitspaket lediglich ein Übertrag der neu geschaffenen Materialmodellentwicklungen in die entsprechenden Bausteine für die parametrische Simulation.

Die Arbeitsschritte konnten gemäß Plan erarbeitet werden.

Es gab keine wesentlichen Abweichungen oder Veränderungen.

Der Fertigstellungsgrad des Arbeitspakets liegt mit 3% im Plan, bezogen auf die Gesamtprojektlaufzeit.

3. Erläuterung von wesentlichen Änderungen bei den Kosten

Aus Sicht der Kosten und Arbeitsstruktur gab es im ersten Forschungsjahr keine Änderungen.

4. Beitrag der Projektergebnisse zur Nachhaltigkeit

Aus ökologischer Sicht entfaltet sich die nachhaltige Wirkung des Projekts vor allem in der angestrebten Reduktion des CO₂-Ausstoßes durch das Bauen mit Beton. Mit den Ergebnissen des ersten Forschungsjahres, insbesondere der wissenschaftlich sehr anspruchsvollen Neuentwicklungen in AP4 (Auswertungsalgorithmus für faseroptische Temperatur- und Dehnungsmonitorings im erhärtenden Beton) und AP5 (Materialmodellentwicklung zur diskreten Simulation des Trocknungsschwindens in der Randzone), wurde eine fundierte Basis zur Erreichung des übergeordneten Ziels (Schaffung von Grundlagen für die breite Einführung und Anwendung von CO₂-reduzierten Betonen in der Praxis) geschaffen.

Insgesamt trägt dieses Forschungsprojekt zu dem Bestreben einer signifikanten CO₂-Reduktion durch das Bauen mit Beton bei. Damit leistet das Projekt einen Beitrag zu Abschwächung des Klimawandels.

Eine Quantifizierung dieses Beitrags ist allerdings erst mit weiterem Erkenntnisgewinn in den Forschungsjahren 2 und 3 möglich.

Quellen

- EC2_1_NAD** ÖNORM B 1992-1-1: Eurocode 2 - Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken; Teil 1-1:
AT Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau (Nationale Festlegungen zu ÖNORM EN 1992-1-1), 2018, Wien, Österreichisches Normungsinstitut, 3
- Eur15** EN 1992-1-1 Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken - Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau, 2015, Wien, Österreichisches Normungsinstitut, ÖNORM EN 1992-1-1, Eurocode 2: 4
- Sch16** Schlicke, Dirk: Mindestbewehrung für zwangbeanspruchten Beton, 2. überarbeitete Auflage, 2016, Verlag der Technischen Universität Graz, Graz, 2. überarbeitete Auflage, 10.3217/978-3-85125-473-0, 1
- Sch18** Schlicke, Dirk & Huber, Helmut: Nachweis der Rissvermeidung für Innenschalen bei hohen Tunneltemperaturen, 2018, 22-23, Bautechnik, 2