

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	4
2.5. Materialmodelle für die Simulation	9
2.6. Berechnungsmodelle und Validierung	12
2.7. Parameterstudie	14
3. Erläuterung von wesentlichen Änderungen bei den Kosten	17
4. Beitrag der Projektergebnisse zur Nachhaltigkeit	18

1. Zielerreichung und Projektstatus

Die für das zweite Forschungsjahr gesteckten Ziele des Vorhabens wurden erreicht. Die globalen Ziele des Vorhabens bleiben damit realistisch. Im zweiten Forschungsjahr wurde insbesondere das faseroptische Monitoring weitergeführt, das numerische Berechnungsmodell validiert sowie eine umfassende Parameterstudie durchgeführt. Hierdurch wurde eine umfassende und auch abgesicherte Datenbasis für das weitere Vorgehen im dritten Forschungsjahr geschaffen.

2. Durchgeführte Arbeiten im Berichtszeitraum

2.1. Projektleitung

Fertigstellungsgrad: 100%

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 66% im Plan, bezogen auf die Gesamtprojektlaufzeit.

2.2. Wissenschaftliche Leitung

Fertigstellungsgrad: 100%

Im AP2 wurde ein Halbjahresmeeting zur Besprechung des Zwischenstands (nach 6 Monaten) und eine Jahresabschlussmeeting zur Präsentation des Endstands (nach 12 Monaten) vorbereitet und abgehalten.

Ein weiterer Fokus lag auf weiteren Literatur- und Normenstudien 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 internationalen Erfahrungen in der Auswertung von faseroptischen Messungen im erhärtenden Beton und der rechnerischen Prognose des instationären Verformungsfelds infolge Austrocknung.

Darüber hinaus erfolgte eine enge Interaktion mit dem aktuellen Forschungsprojekt „Upcycling 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.

Der Projektfortschritt liegt mit 66% im Plan, bezogen auf die Gesamtprojektlaufzeit.

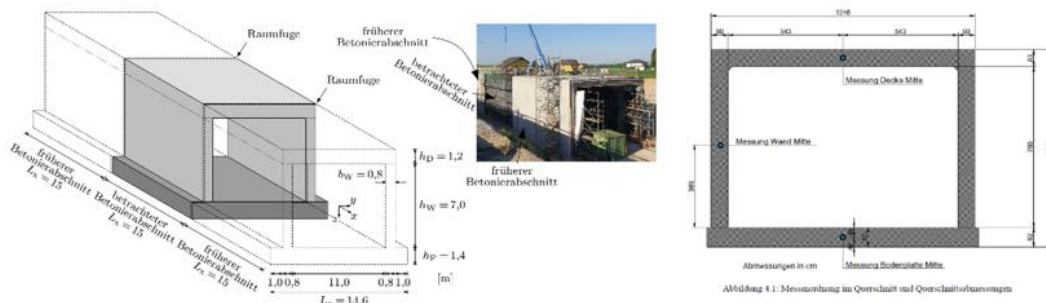
2.3. Analyse Baustellenmessungen

Fertigstellungsgrad: 100%

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, Sulfeld, Rothensee und den Kühlturm Kraftwerk Westfalen. Im weiteren Projektverlauf wird diese Datenbank laufend ergänzt.

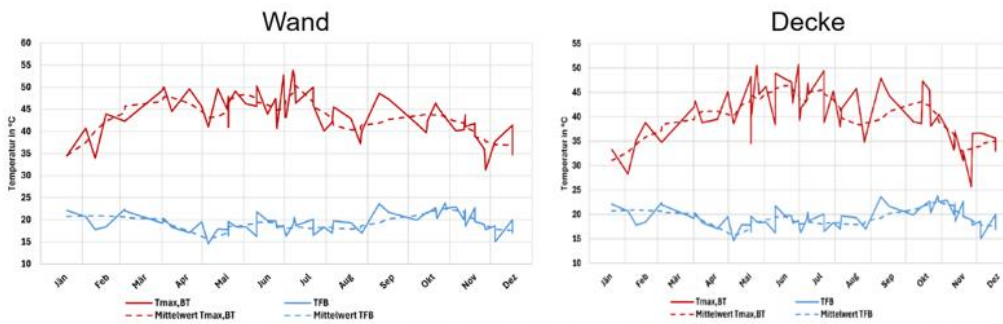
Abbildung 2.3.1 zeigt das Ergebnis dieser Auswertungen am Beispiel des Vorhabens Koralmbahn Baulos 3.1.

Übersicht



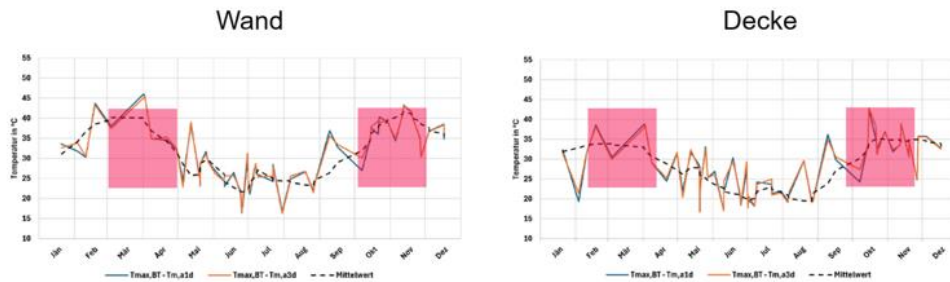
Datensätze zwischen Oktober 2020 und August 2022

Frischbetontemperatur und maximale Bauteiltemperatur



Enorme Maßnahmen zur Frischbetontemperatur führen zu einer starken Vergleichmäßigung der Frischbetontemperatur im Jahresverlauf

Differenz maximale Bauteil- und Ausgleichstemperatur



gleichmäßige Frischbetontemperatur im Jahresverlauf trifft allerdings auf variable Ausgleichtemperatur im Jahresverlauf

→ rissverursachende Temperaturunterschiede sind im Winter deutlich höher als im Sommer!

Abbildung 2.3.1: Temperaturmessungen und Auswertung Untersuchungsobjekt Koralmbahn Baulos 3.1 Graz

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.

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.

In Ergänzung zu dem geplanten Messvorhaben Koralmbahn Baulos 3.1 wurde auf eigene Initiative ein anderes Messprogramm in einem komplexen Deckensystem der Smartcity Graz eingebracht und. Einen ersten Einblick in dieses Vorhaben gibt Abbildung 2.

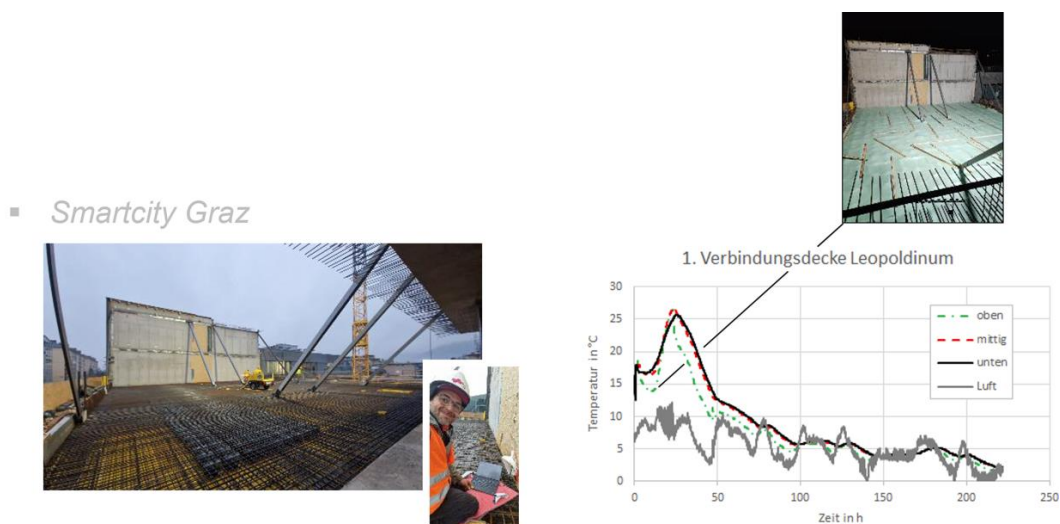


Abbildung 2.3.2: Temperaturmessung Deckensystem Smartcity Graz

Die Arbeitsschritte konnten insgesamt gemäß Plan erarbeitet werden.

Es gab keine wesentlichen Abweichungen oder Veränderungen.

Der Fertigstellungsgrad des Arbeitspakets liegt beträgt 85 % bezogen auf der Gesamtlaufzeit.

2.4. Langzeitmonitoring

Fertigstellungsgrad: 100%

Dieses Arbeitspaket hatte die Erstellung und Durchführung von Bauwerksmessungen von Temperaturen und Betondehnungen mittels verteilter faseroptischer Messmethoden zum Ziel. Im Detail sollte ein Wandquerschnitt in der Weißen Wanne Koralmbahn Baulos 3.1 mit neun Messpunkten ausgerüstet und anschließend über einen Zeitraum von 2 Jahren beobachtet werden. Die Beobachtung erfolgt in der ersten Woche nach Installation als Dauermessung und anschließend als Epochenmessung mit 28 Terminen.

Mit dem Einbau und Messdurchführung wurde die im Forschungsvorhaben beteiligte Firma ACI Monitoring GmbH beauftragt. Im ersten Schritt erfolgte die Festlegung der Messpunkte aus wissenschaftlichen Gesichtspunkten, sodass das Temperatur- und Dehnungsfeld eindeutig bestimmt werden kann. Den Querschnitt und die Messpunkte zeigt Abbildung 2.4.1.

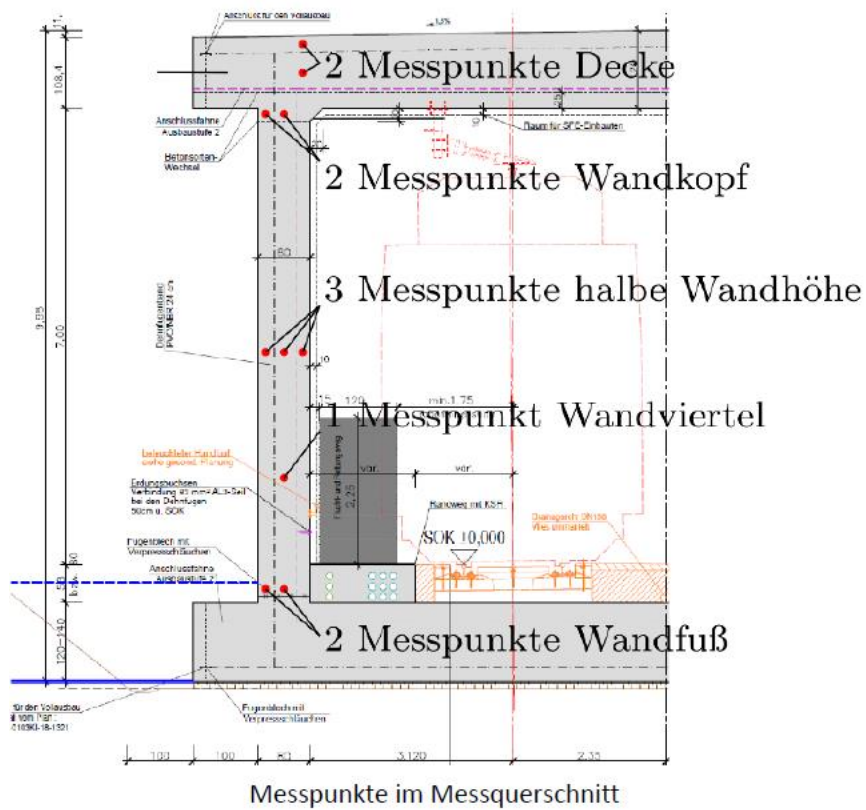


Abbildung 2.4.1: Messquerschnitt FOS-Langzeitmonitoring Koralmbahn Baulos 3.1

Im nächsten Schritt wurde in Zusammenarbeit mit der bauausführenden Firma Granit der Einbau der Sensoren sowie die Überführung des Messvorhabens von den Randbedingungen der Herstellung in die Randbedingungen während der Nutzung erarbeitet. Besondere Herausforderung war hierbei, dass es sich bei diesem Bauwerk um einen Tunnel in offener Bauweise handelt. Dabei wird der Tunnel zunächst in einer offenen Baugrube erstellt, die dann für die Nutzung wieder geschlossen wird. Für die kontinuierliche Messung im Bauzustand müssen daher die Messkabel und das Messgerät zunächst baustellengerecht am Bauwerk platziert werden. Für die Überführung in den Nutzungszustand müssen anschließend geeignete Maßnahmen gesetzt werden, damit die Kabel während der Überschüttung und Verdichtung mit Bodenmaterial unbeschädigt bleiben. Für die weitere Beobachtung im Nutzungszustand wurde letztendlich ein Messschrank installiert, der oberirdisch frei zugänglich ist. Abbildung 2.4.2 gibt einen Einblick in diese Installation.

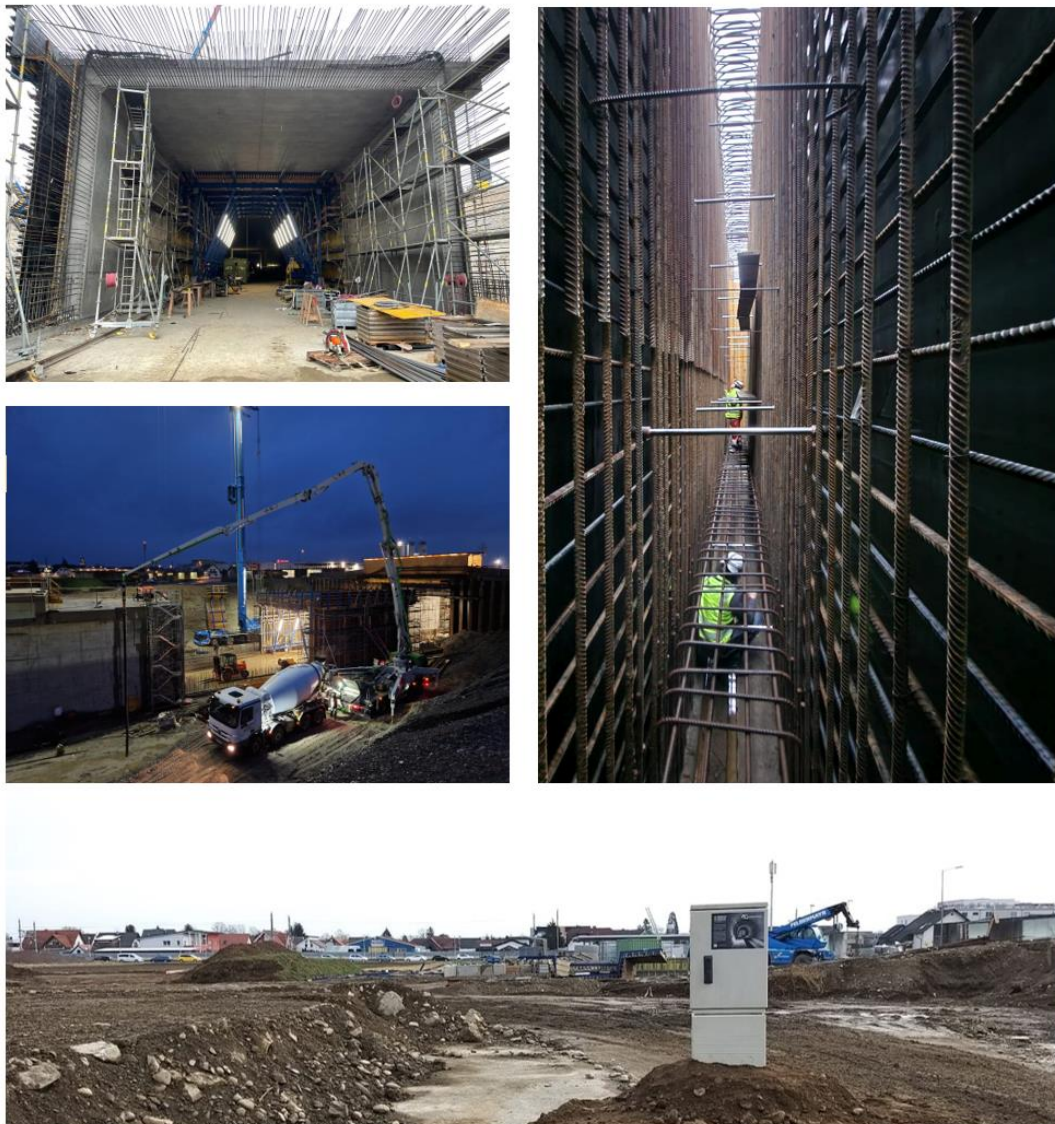


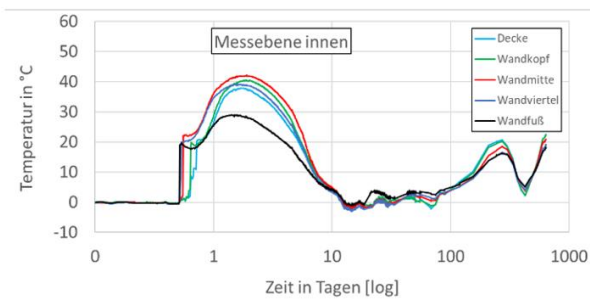
Abbildung 2.4.2: Installation FOS-Langzeitmonitoring Koralmbahn Baulos 3.1

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 die dazugehörigen Dehnungsentwicklungen als Rohdaten sowie in Abbildung 2.4.4 den Vergleich der gemessenen Dehnung zur Solldehnung aus Temperatur. Aus diesem Vergleich kann der Behinderungsgrad a abgeleitet werden, der sich erwartungsgemäß über die Wandhöhe stark abbaut.

■ Messdaten

- Temperatur im Materialpunkt



- Dehnungsmessung = tatsächliche Dehnung

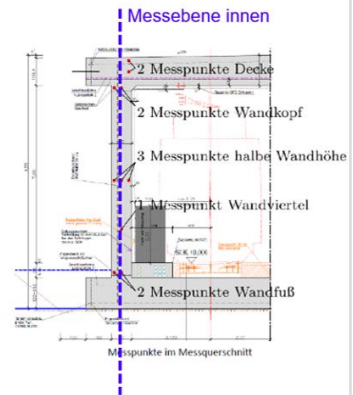
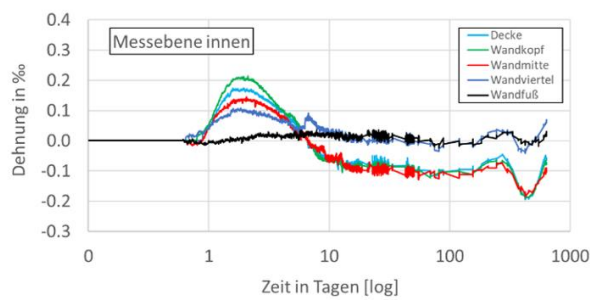
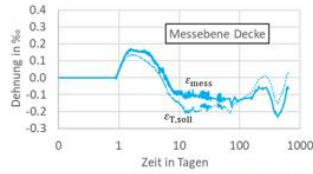


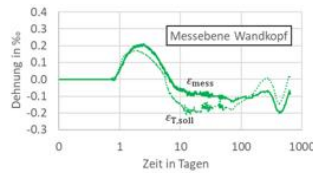
Abbildung 2.4.3: Temperaturentwicklungen Langzeitmonitoring Koralmbahn Baulos 3.1

• Messdaten

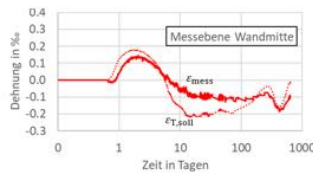
- theoretische Temperaturdehnung vs. tatsächliche Dehnung



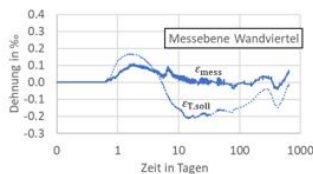
$$\alpha = 1 - \frac{0,28}{0,35} = 0,20$$



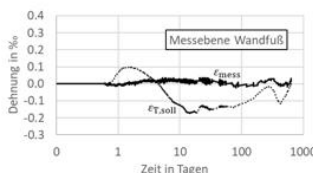
$$\alpha = 1 - \frac{0,3}{0,39} = 0,25$$



$$\alpha = 1 - \frac{0,25}{0,39} = 0,36$$



$$\alpha = 1 - \frac{0,1}{0,38} = 0,74$$



$$\alpha = 1 - \frac{0}{0,28} = 1,0$$

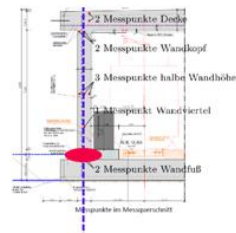


Abbildung 2.4.4: Dehnungsauswertung an den Messpunkten Langzeitmonitoring Koralmbahn Baulos 3.1

Darüber hinaus zeigt Abbildung 2.4.5 die aus den gemessenen Dehnungen mittels entwickeltem Auswertungsalgorithmus abgeleiteten Spannungsentwicklungen.

▪ **Auswertung der Messdaten: Dehnung**

– Dehnungsmessung = tatsächliche Dehnung

- freier Anteil der Temperaturdehnung
- freier Anteil des Schwindens
- freie Kriechdehnung

Messgröße:

$$\epsilon_{\text{mess}} = (\alpha_T \cdot \Delta T + \epsilon_{\text{cs}} + \epsilon_{\text{cc}}) \cdot (1 - a)$$

„nur“ der freie Anteil der Dehnung

Zwangspannung:

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

„nur“ der behinderte Anteil der Dehnung

abhängig von der Spannungsgeschichte

▪ **Auswertung der Messdaten: Zwangspannung**

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

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

bei ungleichmäßiger Austrocknung im Querschnitt abhängig vom Schwinden im lokalen Punkt

abhängig von der Spannungsgeschichte

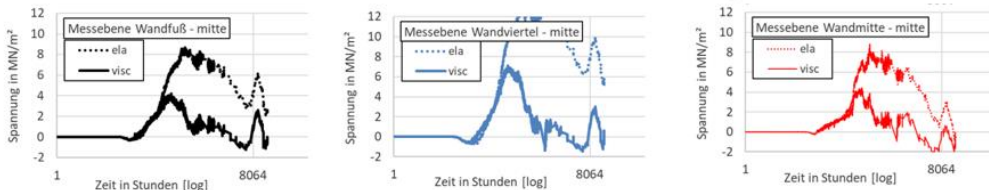


Abbildung 2.4.5: Spannungsentwicklungen Langzeitmonitoring Koralmbahn Baulos 3.1

Die Arbeitsschritte konnten insgesamt gemäß Plan erarbeitet werden. Im dritten Forschungsjahr werden die zukünftig auflaufenden Messergebnisse weiter ausgewertet. Von großem Interesse ist hier der Einfluss des viel diskutierten Trocknungsschwindens im weiteren zeitverlauf.

Es gab keine wesentlichen Abweichungen von den geplanten Arbeiten. Die gegen Ende des ersten Forschungsjahres angedachte unplanmäßige Ausweitung des Arbeitspakets auf Messungen im Semmering Basistunnel wurden nicht realisiert.

Der Fertigstellungsgrad des Arbeitspakets liegt mit 90 % im Plan, bezogen auf die Gesamtprojektlaufzeit.

2.5. Materialmodelle für die Simulation

Fertigstellungsgrad: 100%

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 und Abbildung die Anpassungen des Materialmodells an die Rezepturen Koralmbahn Baulos 3.1 und Tunnel Silltal.

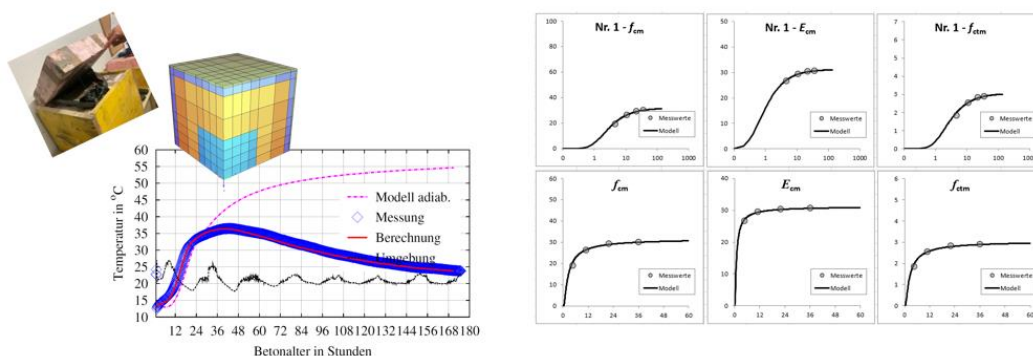


Abbildung 2.5.1: Anpassung Materialmodell zur Temperatur- und Festigkeitsentwicklung Koralmbahn Baulos 3.1

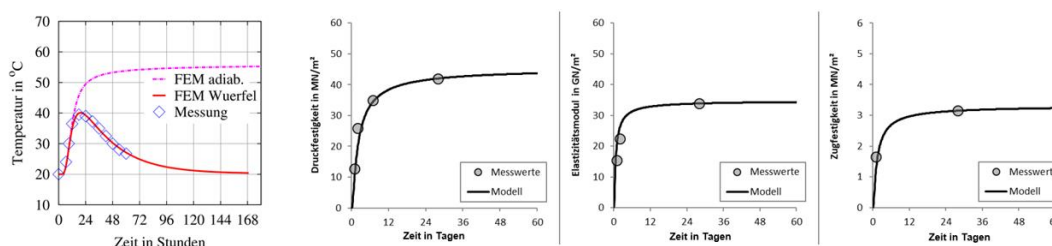


Abbildung 2.5.2: Anpassung Materialmodell zur Temperatur- und Festigkeitsentwicklung Silltal

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 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 rechts gezeigt.

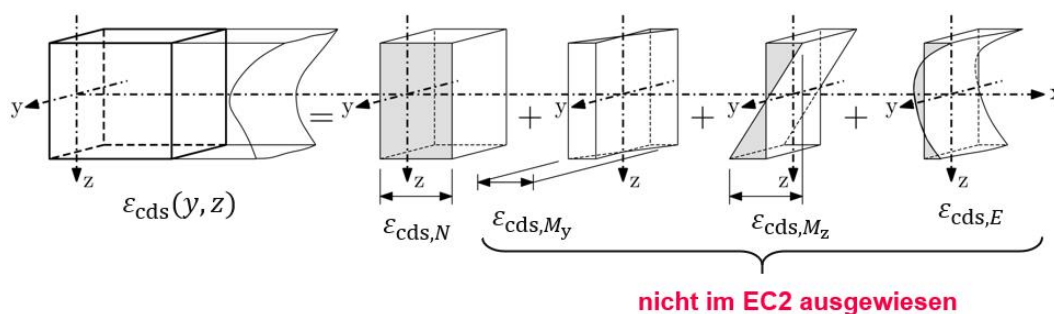


Abbildung 2.5.3: Anteile des Verformungsfelds aus dem Trocknungsschwinden

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.

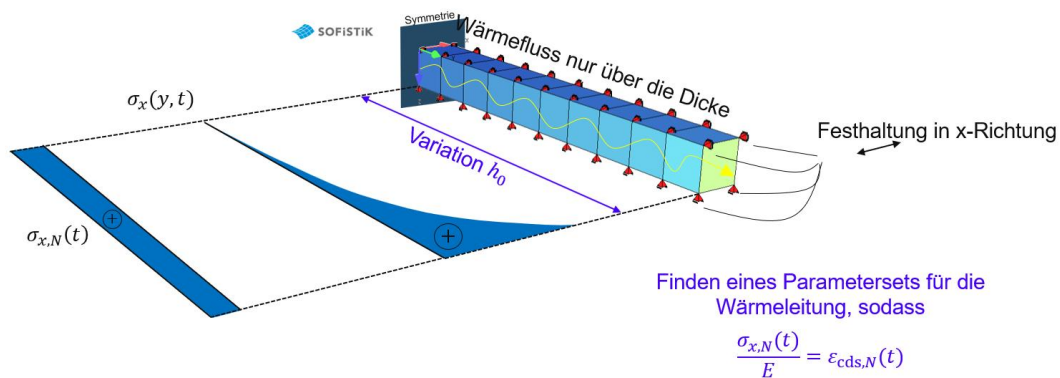


Abbildung 2.5.4: Vorgehensweise bei der Entwicklung eines Materialmodells zur Simulation des Trocknungsschwindens

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.

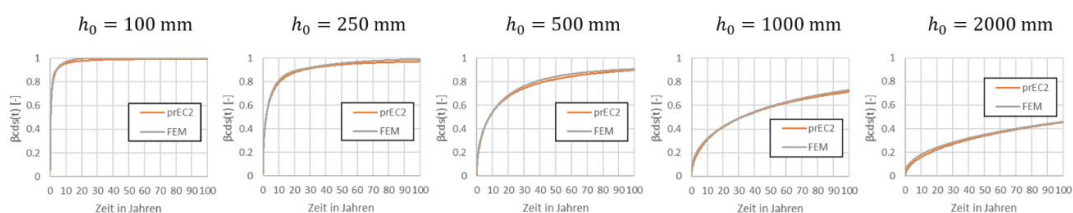


Abbildung 2.5.5: Gegenüberstellung der Ergebnisse zum Trocknungsschwinden gemäß entwickeltem Materialmodell für die Simulation und den Ergebnissen gemäß dem normativen Materialmodell

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

Fertigstellungsgrad: 100%

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.

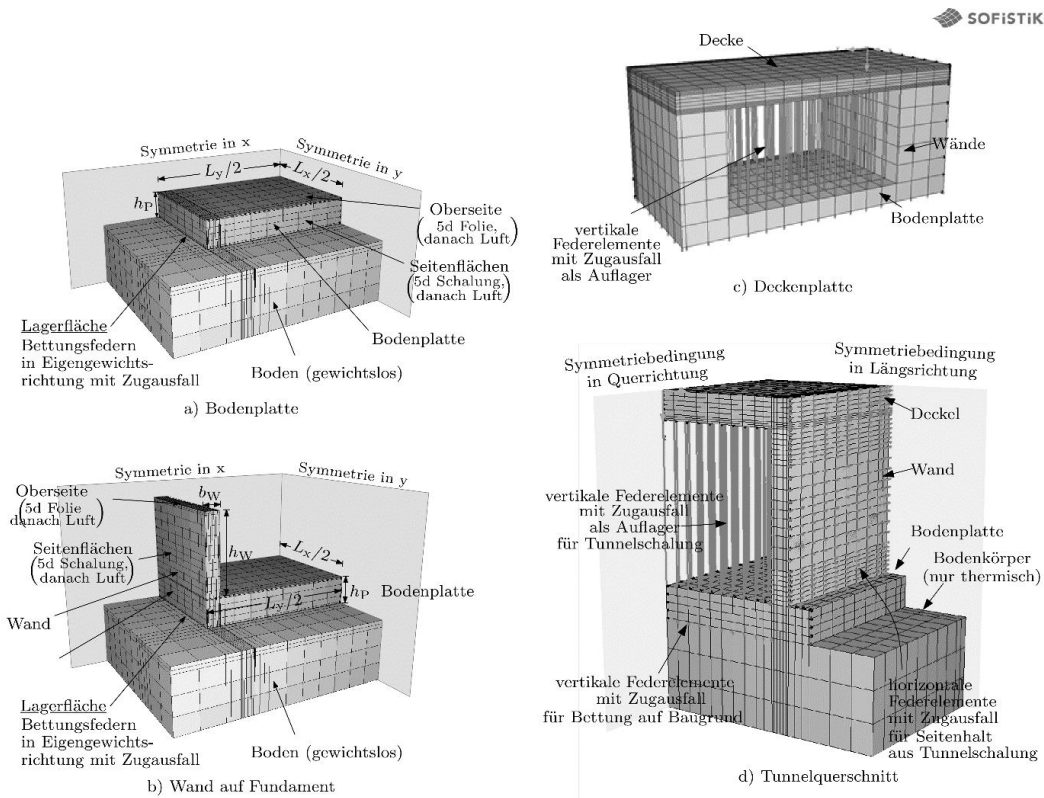


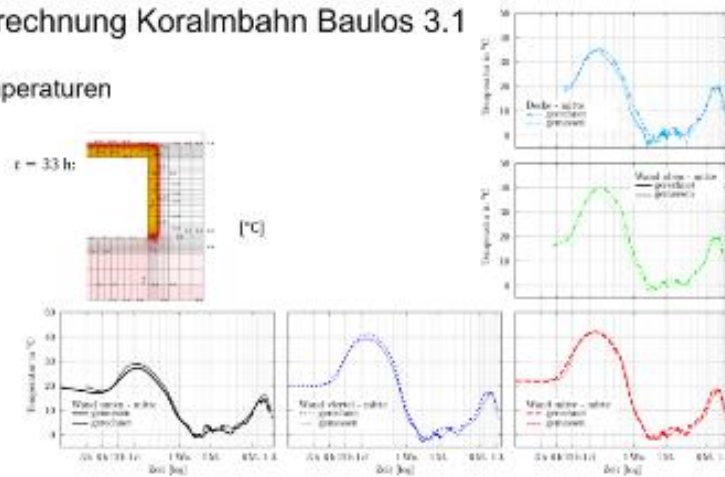
Abbildung 2.6.1: Berechnungsmodelle für die Simulation

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 zeigt diesen Vergleich auszugsweise für das Vorhaben Koralmbahn Baulos 3.1.

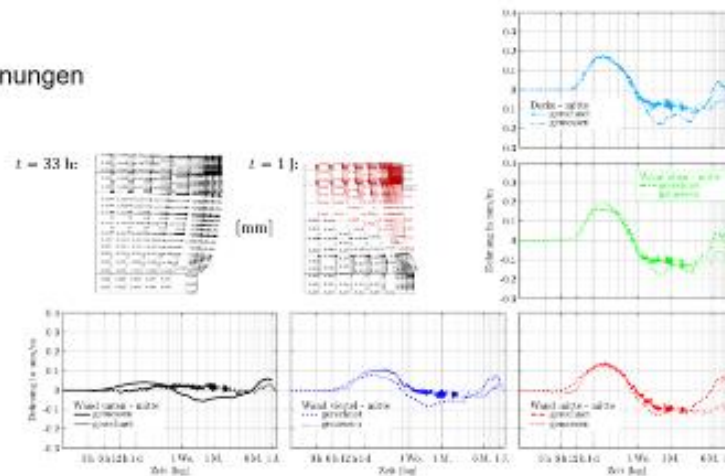
Insgesamt konnte hierbei eine zufriedenstellende Übereinstimmung gefunden werden, sodass die Berechnungsmodelle für die weitere Verwendung in der Parameterstudie (AP 7) als geeignet anzusehen sind.

Nachrechnung Koralmbahn Baulos 3.1

■ Temperaturen



■ Dehnungen



■ Spannungen

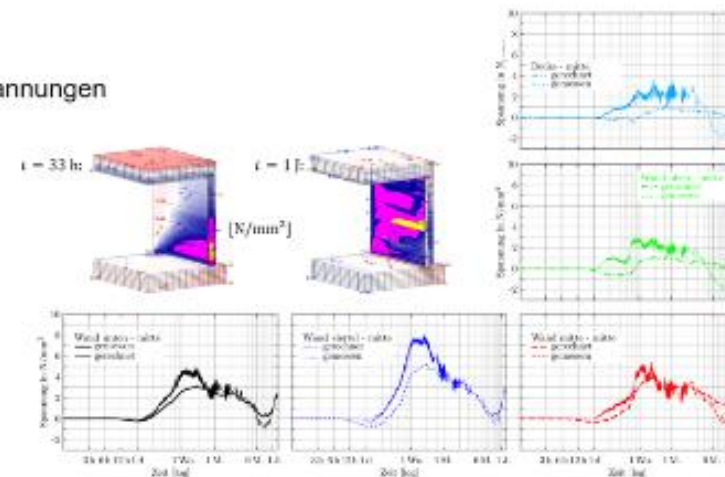


Abbildung 2.6.2: Vergleich der berechneten Temperatur-, Dehnungs- und Spannungsentwicklungen mit den Messergebnissen und aus Messergebnissen abgeleiteten Spannungen am Beispiel Koralmbahn 3.1

Für die aufwendige Parameterstudie wurden aus diesen ganzheitlichen Modellierungsansätzen repräsentative Modellausschnitte für die zu betrachteten Bauteiltypen abgeleitet. Abbildung 2.6.3 veranschaulicht diese Vorgehensweise am Beispiel der Bodenplatte.

▪ Berechnungsmodell

– Idealisierung „effizient“

- Wärmefluss vornehmlich über die Dicke
- voller Biegezwang
- horizontaler Behinderung durch Baugrund

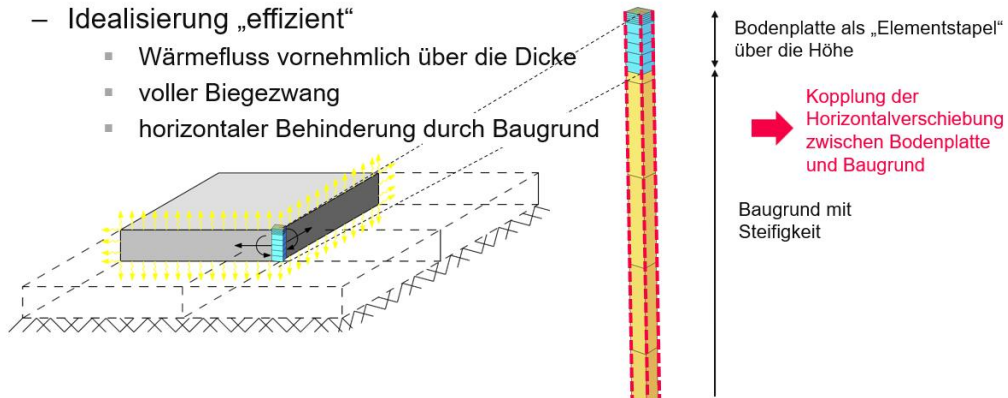


Abbildung 2.6.3: Idealisierte Berechnungsmodelle für die effiziente Durchführung der Parameterstudie am Beispiel der Bodenplatte

Die Arbeitsschritte konnten gemäß Plan erarbeitet werden.

Es gab keine wesentlichen Abweichungen oder Veränderungen.

Der Fertigstellungsgrad des Arbeitspakets liegt mit 90 % im Plan, bezogen auf die Gesamtprojektlaufzeit.

2.7. Parameterstudie

Fertigstellungsgrad: 100%

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 gliedert sich in zwei Bereiche:

1. Eignung der maximalen Bauteiltemperatur zur Kontrolle der Rissgefahr während der Betonerhärtung (Bauteiltemperatur als Steuerungsgröße)
2. systematische Ermittlung der Temperatur- und Spannungsgeschichte für unterschiedliche Bauteiltypen und Randbedingungen
 - Bodenplatten
 - Wände auf Fundamenten
 - Decken
 - Tunnel

Die erste Frage anhand von realen Bauteilsituationen in Anlehnung an das Untersuchungsobjekt Koralmbahn Baulos 3.1 systematisch untersucht. Insgesamt wurden 52 Simulationen für vier typische Bauteiltypen unter Variation der Umgebungsrandbedingungen und der Frischbetontemperatur durchgeführt. Abbildung 2.7.1 zeigt die untersuchten Systeme.

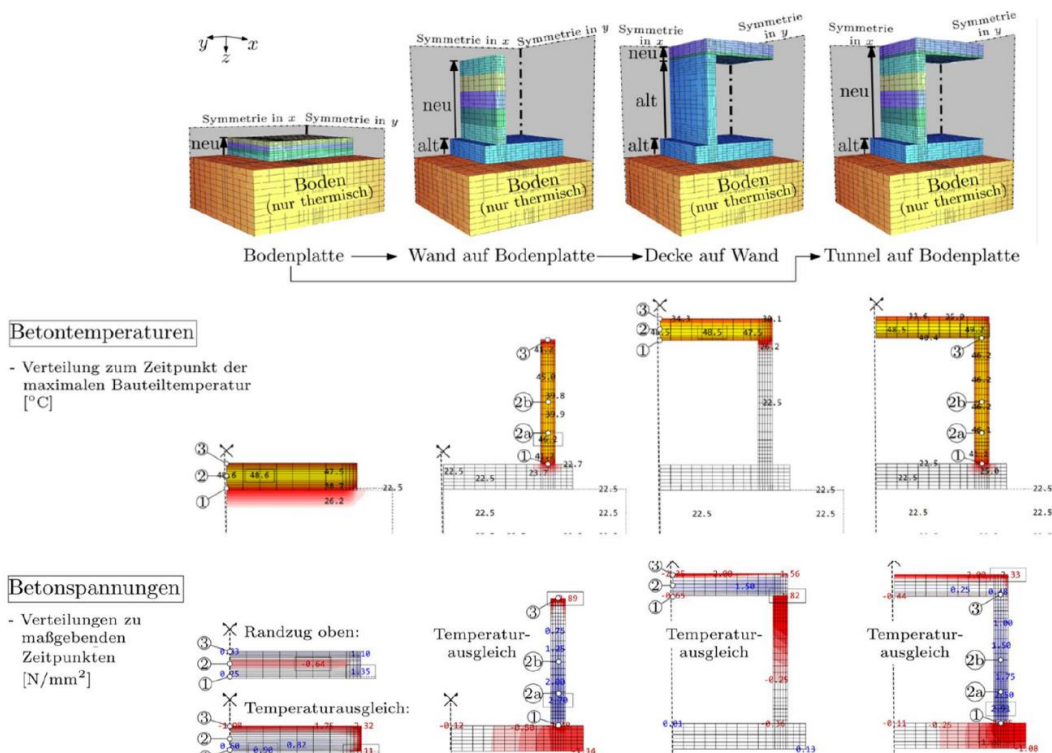


Abbildung 2.7.1: Parameterstudie zur Eignung der maximalen Bauteiltemperatur zur Kontrolle der Rissgefahr

Ganz allgemein zeigen die Ergebnisse erwartungsgemäß, dass die Spannungsentwicklung vornehmlich von den Temperaturänderungen im Zeitverlauf und nur geringfügig von der absoluten Bauteiltemperatur beeinflusst werden.

Hinsichtlich des Herstellungszeitpunktes im Jahresverlauf ergibt sich, dass dieser mit Einschränkung auf die hier betrachteten Bauteildicken keinen nennenswerten Einfluss auf die Rissgefahr hat, wenngleich sich die absoluten Bauteiltemperaturen sehr stark zwischen den Herstellungszeitpunkten „Sommer“ und „Winter“ unterscheiden. Hintergrund ist, dass sich die Temperaturunterschiede im Erhärtungsverlauf bei den hier betrachteten Bauteildicken nur geringfügig vom Herstellungszeitpunkt im Jahresverlauf unterscheiden.

Bedeutender ist der Einfluss von Änderungen der Umgebungstemperatur im Erhärtungsverlauf. Tagestemperaturschwankungen um einen gleichbleibenden Mittelwert der Umgebungstemperatur lassen vor allem den Temperaturunterschied innerhalb des Querschnitts stark ansteigen. Hierdurch werden die Eigenspannungen merklich vergrößert, während die zwangschnittgrößenverursachenden Verformungseinwirkungen nicht nennenswert beeinflusst werden. Ein zusätzlicher Abfall der mittleren Umgebungstemperatur im Erhärtungsverlauf (hier ungünstig mit Abfall zum Zeitpunkt der maximalen Bauteiltemperatur abgebildet) vergrößert demgegenüber auch die zwangschnittgrößenverursachenden Verformungseinwirkungen. Für die hier betrachteten Bauteildicken lässt sich somit schlussfolgern, dass Tagestemperaturschwankungen vor allem die Gefahr von Oberflächenrissbildung vergrößern, während ein Abfall der mittleren Umgebungstemperatur im Erhärtungsverlauf vor allem die Makrorissgefahr merklich ansteigen lässt. Diese Effekte weisen zudem unterschiedliche Ausprägungen in Abhängigkeit vom Bauteiltyp auf. Plattenartige Bauteile mit unterschiedlichen Temperaturentwicklungen an den Außenflächen (Boden- bzw. Deckenplatte) zeigen diesbezüglich ein ungünstiges Zusammenwirken von Zugeigenspannungen am Rand mit Biegezug an der Oberseite zum Zeitpunkt der maximalen Bauteiltemperatur, aus dem eine erhöhte Gefahr von Biegerissbildung zu einem frühen Zeitpunkt hervorgeht. Wandartige Bauteile weisen demgegenüber zum Zeitpunkt maximaler Zugeigenspannungen am Rand gleichzeitig auch eine zentrische Druckbeanspruchung auf, was einer Oberflächenrissbildung zu einem frühen Zeitpunkt entgegenwirkt. Allerdings führt hier der Abfall der mittleren Umgebungstemperatur im weiteren Erhärtungsverlauf zu einer Vergrößerung der Trennrissgefahr.

Hinsichtlich des Einflusses der Frischbetontemperatur auf die Rissgefahr wurde herausgearbeitet, dass diese im Zusammenspiel mit der mittleren Umgebungstemperatur zum Zeitpunkt des Temperaturlausgleichs einen erheblichen Einfluss auf die zwangsschnittgrößenverursachende Verformungseinwirkung besitzt. Dieser Einfluss ist auch abhängig vom Bauteiltyp und bei Wänden auf Fundamenten stärker ausgeprägt. Die Frischbeton-temperatur wirkt sich zudem auch sehr stark auf die absolute Bauteiltemperatur aus, jedoch resultieren die Auswirkungen der Frischbetontemperatur auf die Rissgefahr vornehmlich nur aus dem Unterschied zur Umgebungstemperatur. Im Allgemeinen begünstigt die Frischbetonkühlung natürlich die Vermeidung erhärtungsbedingter Rissbildung. Die Notwendigkeit aufwendiger Maßnahmen zur Frischbetonkühlung im Sommer wird aber für die hier betrachteten Bauteildicken nicht bestätigt. Im Gegensatz dazu bewirken gezielte Maßnahmen zur Erwärmung des Frischbetons im Winter, um den Beginn der Hydratation nach dem Einbau sicherzustellen, auch gleichzeitig eine nennenswerte Zunahme der Rissgefahr und sollten deshalb bedachtsam eingestellt werden.

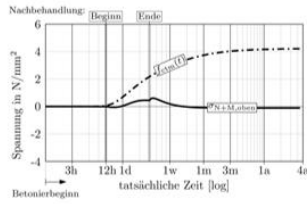
Die Ergebnisse wurden bereits in der einschlägigen Fachzeitschrift Beton- und Stahlbetonbau veröffentlicht.

Die zweite Frage wurde mit den effizienten Berechnungsmodellen unter Variation folgender Parameter durchgeführt:

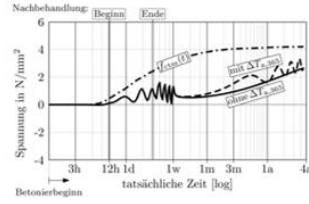
- - - Einfluss der Betonrezeptur
 - Einfluss der Bauteildicke
 - Einfluss der Frischbetontemperatur
 - Einfluss der Umgebungsbedingungen
 - Umgebungstemperatur
 - Umgebungsfeuchte
 - Einfluss der Nachbehandlung

In der Gesamtheit resultieren aus dieser Gliederung ca. 8000 Berechnungen, die in Form von Temperatur-, Dehnungs-, Spannungs- und Festigkeitsentwicklungen vorliegen. Einen kleinen Auszug daraus gibt Abbildung 2.7.2 für ausgewählte Variationen der Bodenplatte.

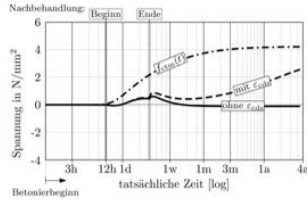
- Spannungsgeschichte infolge Hydratation allein
- $h_{pl} = 50 \text{ cm}$



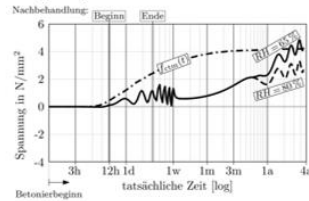
- Spannungsgeschichte infolge Hydratation + Austrocknung $RH = 80 \%$
- Einfluss der Umgebungstemperatur / Jahresgang



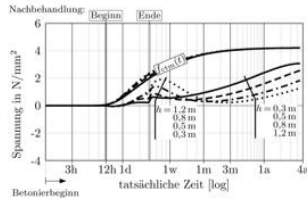
- Spannungsgeschichte infolge Hydratation + Austrocknung $RH = 80 \%$
- $h_{pl} = 50 \text{ cm}$



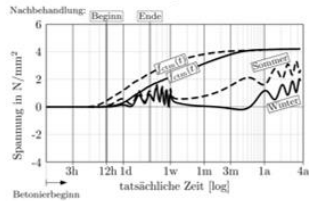
- Spannungsgeschichte infolge Hydratation + Austrocknung $RH = 65 \%$
- Einfluss der Umgebungsfeuchte



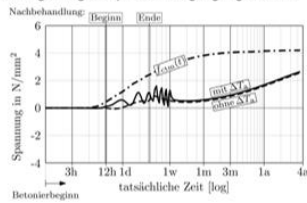
- Spannungsgeschichte infolge Hydratation + Austrocknung $RH = 80 \%$
- Einfluss der Bauteildicke



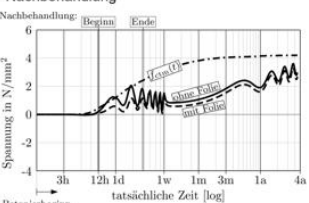
- Spannungsgeschichte infolge Hydratation + Austrocknung $RH = 80 \%$
- Einfluss der Jahreszeit bei Herstellung



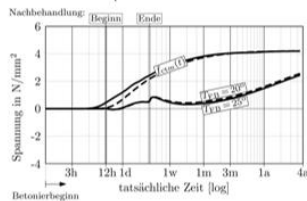
- Spannungsgeschichte infolge Hydratation + Austrocknung $RH = 80 \%$
- Einfluss der Umgebungstemperatur / Tagesgang Sommer



- Spannungsgeschichte infolge Hydratation + Austrocknung $RH = 80 \%$
- Einfluss der Nachbehandlung



- Spannungsgeschichte infolge Hydratation + Austrocknung $RH = 80 \%$
- Einfluss der Frischbetontemperatur



- Spannungsgeschichte infolge Hydratation + Austrocknung $RH = 80 \%$
- Einfluss der Rezeptur

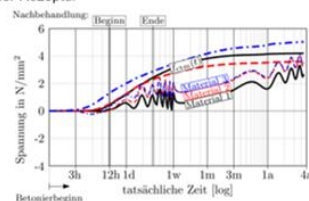


Abbildung 2.7.2: Ausgewählte Berechnungsergebnisse der umfassenden Parameterstudie am Beispiel der Spannungs- und Festigkeitsentwicklung der Bodenplatte

Diese Ergebnisse werden im dritten Jahr hinsichtlich der für die Bemessungspraxis relevanten spannungserzeugenden Temperatureinwirkung ausgewertet und in analytischen Abschätzungsformeln aufbereitet.

Die Arbeitsschritte konnten gemäß Plan erarbeitet werden.

Es gab keine wesentlichen Abweichungen oder Veränderungen.

Der Fertigstellungsgrad des Arbeitspakets liegt mit 70% im Plan, bezogen auf die Gesamtprojektlaufzeit.

3. Erläuterung von wesentlichen Änderungen bei den Kosten

Abgesehen von den InKind-Leitungen, welche dem Projekt über die Zusagen hinaus bereitgestellt wurden, kam es zu keinen Abweichungen.

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 zweiten Forschungsjahres, insbesondere der Fortführung des faseroptischen Monitorings, der Validierung des numerischen Berechnungsmodells sowie der Durchführung umfassender Parameterstudien 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 Übertragung dieser Erkenntnisse ist allerdings erst mit dem Abschluss der Parameterstudie und den zu entwickelnden Ingenieurmodellen im Forschungsjahr 3 möglich.