

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	2
2.3. Analyse Baustellenmessungen	2
2.4. Langzeitmonitoring	4
2.5. Berechnungsmodelle und Validierung	8
2.6. Parameterstudie	12
2.7. Empfehlungen	18
3. Erläuterung von wesentlichen Änderungen bei den Kosten	22
4. Beitrag der Projektergebnisse zur Nachhaltigkeit	22

1. Zielerreichung und Projektstatus

Die dem Forschungsvorhaben zugrunde liegenden Ziele konnten vollständig erreicht werden und sind weiterhin aktuell. Die vorgesehenen messtechnischen und numerischen Untersuchungen wurden durchgeführt und daraus praxisorientierte Empfehlungen zur Kontrolle der erhärtungsbedingten Rissbildung abgeleitet.

Ein wesentliches Ergebnis ist, dass die maximale Bauteiltemperatur und die Frischbetontemperatur nicht unabhängig von den jeweiligen Umgebungsbedingungen als alleinige Kriterien zur Beurteilung der Rissgefahr herangezogen werden sollten. Aufbauend auf den Projektergebnissen wurde daher ein begründetes Temperaturkriterium zur Rissvermeidung infolge Betonerhärtung entwickelt. Darüber hinaus wurden Empfehlungen zur Sicherstellung einer ausreichenden Verbundfestigkeit und zum Schutz vor frühzeitiger Austrocknung erarbeitet. Für den Fall, dass eine Rissvermeidung nicht vorgesehen ist, wurde ein innovativer Ansatz zur Ermittlung der Mindestbewehrung zur Begrenzung der Rissbreite entwickelt, der entgegen dem bisherigen Ansatz ohne fragwürdige Annahmen zum Risszeitpunkt auskommt.

Das Forschungsprojekt wurde in Abstimmung mit der FFG kostenneutral um sechs Monate verlängert. Dadurch konnten die vorgesehenen Arbeiten vollständig abgeschlossen und die Projektergebnisse abschließend ausgearbeitet werden. Die Projektziele wurden insgesamt zu 100 % erreicht.

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 der Projektmeetings, die Koordination der Kommunikation zwischen den ProjektpartnerInnen, die Partnerkommunikation zwischen Wirtschaft und Wissenschaft sowie das Vertrags- und Kostenmanagement erfolgreich abgewickelt.

Das Forschungsprojekt wurde im 3. Forschungsjahr in Abstimmung mit der FFG um sechs Monate kostenneutral verlängert. Dadurch konnten die vorgesehenen Arbeiten planmäßig abgeschlossen und die Projektergebnisse vollständig ausgearbeitet werden. Abgesehen von der genehmigten Laufzeitverlängerung ergaben sich keine wesentlichen Abweichungen. Die Projektplanung wurde entsprechend angepasst; darüber hinaus waren keine weiteren Änderungen erforderlich.

Der Fertigstellungsgrad des Arbeitspakets ist 100 %.

2.2. Wissenschaftliche Leitung

Fertigstellungsgrad: 100%

Im Arbeitspaket 2 wurden im Berichtszeitraum ein Halbjahresmeeting zur Vorstellung und Diskussion des Zwischenstands (nach 11 Monaten) und ein Abschlussmeeting zur Präsentation der Endergebnisse (nach 17 Monaten) vorbereitet und abgehalten.

Darüber hinaus wurden bereits erste Forschungsergebnisse zur Eignung der maximalen Bauteil- und Frischbetontemperatur als Kriterium zur Kontrolle der Rissgefahr während der Betonerhärtung im Arbeitskreis „Weiße Wannen“ des ÖBVs präsentiert.

Zusätzlich erfolgte eine enge Interaktion mit dem aktuellen Forschungsprojekt „GreenInfrastructure“ von Univ.-Prof. Konrad Bergmeister – BOKU Wien. Der Austausch konzentrierte sich dabei vor allem auf die Materialparameter des CO₂-reduzierten Betons auf Basis von rezyklierter Gesteinskörnung.

Die Arbeitsschritte konnten gemäß Planung umgesetzt werden. Es ergaben sich keine wesentlichen Abweichungen oder Veränderungen, sodass keine Anpassung der Projektplanung erforderlich war.

Der Fertigstellungsgrad des Arbeitspakets ist 100 %.

2.3. Analyse Baustellenmessungen

Fertigstellungsgrad: 100%

In diesem Arbeitspaket wurden die erhobenen Messdaten aus diversen Bauvorhaben zusammengetragen und systematisch ausgewertet. Die Datenbank umfasst Bauwerksmessungen der Vorhaben Koralmbahn Baulos 3.1, Silltaltunnel und S7 sowie Messungen aus früheren Forschungsprojekten des Forschungsnehmers (Kraftwerksbodenplatte Boxberg, die Schifffahrtsschleusen Wusterwitz, Sülfeld, Rothensee sowie Kühlturm Kraftwerk Westfalen). Im Berichtszeitraum wurde die Datenbasis vervollständigt und für die weiteren Projektauswertungen aufbereitet.

Bei den Messdaten handelt es sich überwiegend um Temperaturmessungen. Diese ermöglichen zwar keine direkte Quantifizierung der erhärtungsbedingten Verformungen und Zwangbeanspruchungen, bilden jedoch das Zusammenspiel von Frischbetontemperatur, Umgebungstemperatur und maximaler Bauteiltemperatur in Abhängigkeit vom Bauteiltyp und von der Bauteildicke ab. Abbildung 1 zeigt beispielhaft die Temperaturmessungen und deren Auswertung für das Bauvorhaben Koralmbahn Baulos 3.1.

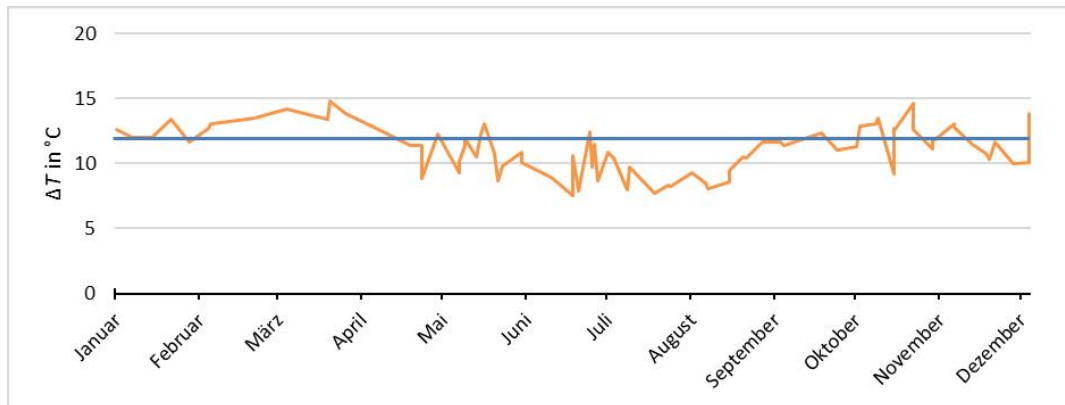


Abbildung 2.3.2: Abbildung 2 – Vergleich der analytischen Gleichung mit den Temperaturmessungen
Untersuchungsobjekt Koralmbahn Baulos 3.1

Die Arbeitsschritte konnten insgesamt gemäß Plan erarbeitet werden.

Es gab keine wesentlichen Abweichungen oder Veränderungen.

Der Fertigstellungsgrad des Arbeitspakets ist 100 %.

2.4. Langzeitmonitoring

Fertigstellungsgrad: 100%

Dieses Arbeitspaket beinhaltet die Konzeption und Durchführung von Bauwerksmessungen der Temperaturen und Betondehnungen mittels verteilter faseroptischer Messmethoden. Im Detail wurde ein Wandquerschnitt in der Weißen Wanne Koralmbahn Baulos 3.1 mit neun Messpunkten ausgerüstet und anschließend über einen Zeitraum von 3 Jahren und 10 Monaten beobachtet. Die Beobachtung erfolgt in der ersten Woche nach Installation als Dauermessung und anschließend als Epochenmessung mit 37 Terminen.

Mit dem Einbau und der Messdurchführung wurde die im Forschungsvorhaben beteiligte Firma ACI Monitoring GmbH beauftragt. Die Messpunkte wurden aus wissenschaftlichen Gesichtspunkten so festgelegt, dass das Temperatur- und Dehnungsfeld eindeutig bestimmt werden kann. Den Querschnitt und die Messpunkte zeigt Abbildung 3.

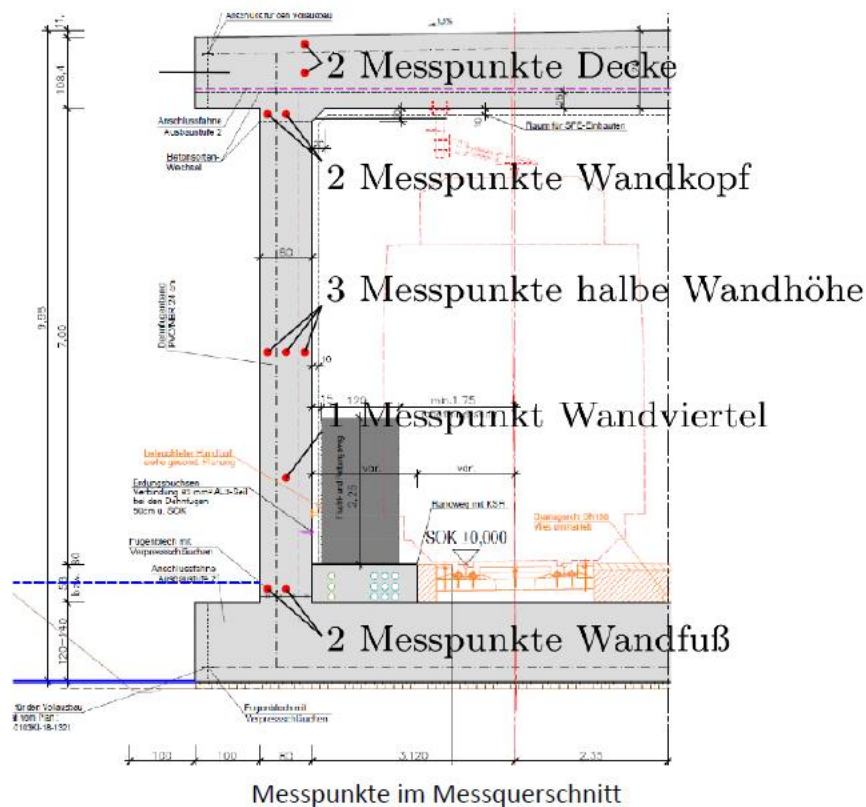


Abbildung 2.4.1: Abbildung 3 – Messquerschnitt FOS-Langzeitmonitoring Koralmbahn Baulos 3.1

In Zusammenarbeit mit der bauausführenden Firma Granit erfolgten der Einbau der Sensoren sowie die Überführung des Messsystems von den Randbedingungen der Herstellung in die Randbedingungen während der Nutzung. Aufgrund der Herstellung des Tunnelbauwerks in offener Bauweise waren besondere Maßnahmen erforderlich, um die Messkabel und das Messgerät während der Bauphase sowie der anschließenden Überschüttung dauerhaft zu schützen und eine langfristige Zugänglichkeit sicherzustellen. Hierfür wurde ein oberirdisch zugänglicher Messschrank installiert. Abbildung 4 gibt einen Einblick in diese Installation.

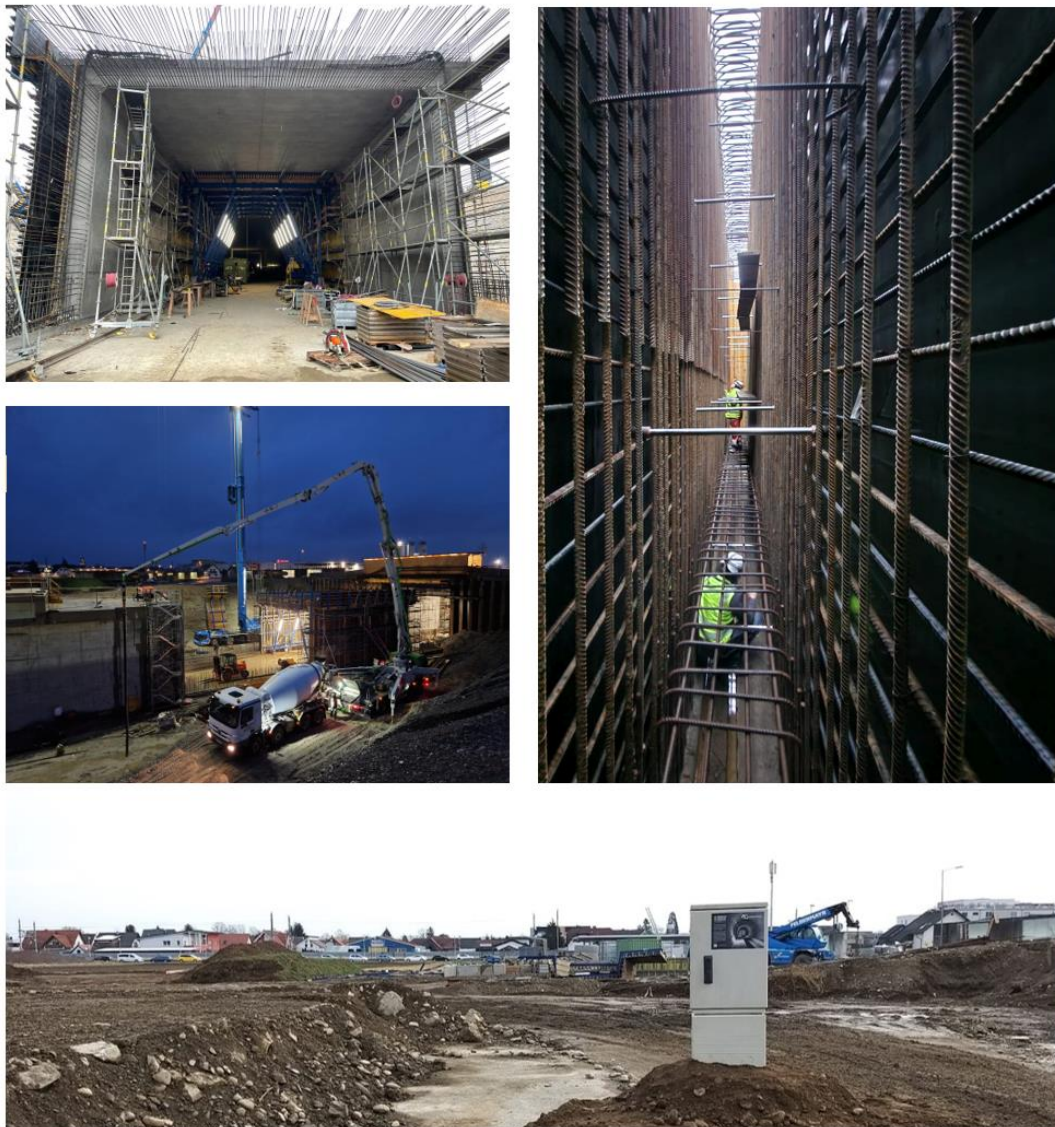
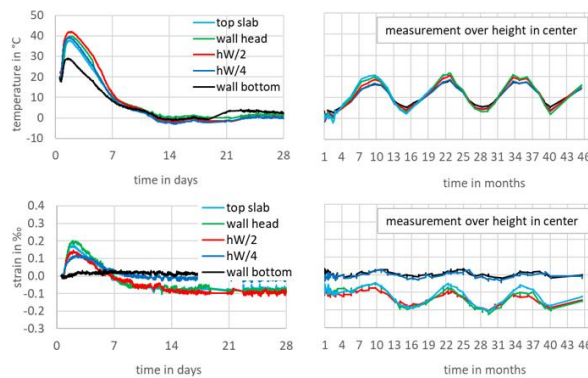


Abbildung 2.4.2: Abbildung 4 – Installation FOS-Langzeitmonitoring Koralmbahn Baulos 3.1

Als Messdaten werden in diesem Monitoring an jedem Messpunkt Temperaturen und Dehnungen aufgezeichnet. Während die Temperaturmessungen direkt verwendet werden können, müssen die Dehnungen unter Berücksichtigung des Messverfahrens aufbereitet werden. Der Einsatz verteilter faseroptischer Messmethoden zur Erfassung der erhärtungsbedingten Zwangdehnungen und Zwangsspannungen ist jedoch nicht endgültig erforscht. Im Forschungsprojekt wurde daher ein Auswertungsalgorithmus entwickelt, der die Ableitung der Zwangsspannungen aus den Messdaten ermöglicht. Die Hintergründe hierzu und die Funktionsweise des Auswertungsalgorithmus wurden in [1] zusammengefasst und der Fachöffentlichkeit zugänglich gemacht.

Für einen Einblick in die Messergebnisse zeigt Abbildung 5 die erfassten Temperaturentwicklungen über die Zeit und die dazugehörigen freien Dehnungsentwicklungen an den einzelnen Messpunkten sowie Abbildung 6 den Vergleich der gemessenen Dehnung zur Solldehnung aus Temperatur. Aus diesem Vergleich wurde der Behinderungsgrad a über die Wandhöhe abgeleitet, welcher sich bei der vorliegenden Geometrie (insbesondere Blocklänge) erwartungsgemäß über die Wandhöhe stark abbaut. Außerdem wurde der Behinderungsgrad über die Wandhöhe mit dem Ansatz aus [2] verglichen und es zeigt sich eine gute Übereinstimmung.

■ Direct results: temperature and free strains



Measurement plane inside

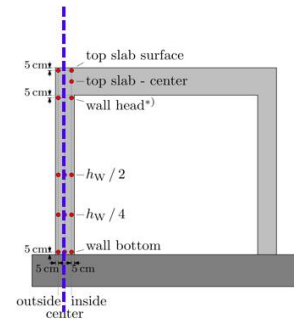


Abbildung 2.4.3: Abbildung 5 – Temperaturentwicklung und freie Dehnung Langzeitmonitoring Koralmbahn Baulos 3.1

■ Derivation of the degree of restraint: $a = 1 - \frac{\epsilon_{\text{free}}}{\epsilon_{\text{imp}}} = 1 - \frac{\epsilon_{\text{measured}}}{\alpha_T \cdot \Delta T}$

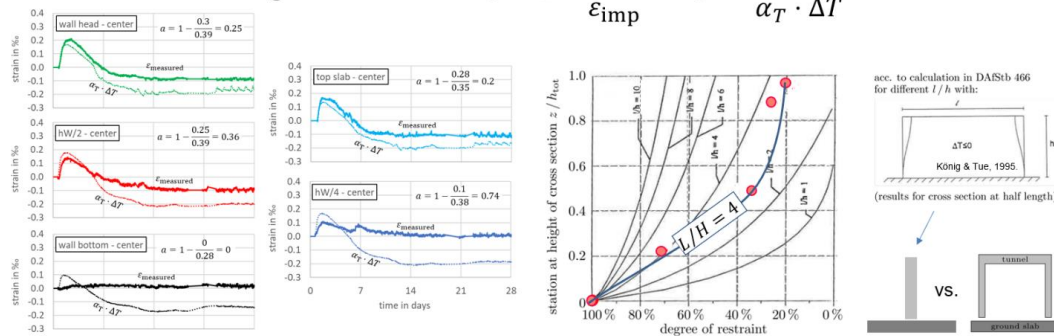


Abbildung 2.4.4: Abbildung 6 – Dehnungsauswertung an den Messpunkten Langzeitmonitoring Koralmbahn Baulos 3.1

Unter Verwendung des entwickelten Auswertungsalgorithmus wurden aus den gemessenen Temperaturen und Dehnungen anschließend die Spannungsentwicklungen im Bauteil abgeleitet. Abbildung 7 zeigt die hieraus berechneten Spannungsverläufe über den gesamten Beobachtungszeitraum. Die Auswertung zeigt, dass der häufig diskutierte Einfluss des Trocknungsschwindens auf die Spannungsentwicklung im weiteren zeitlichen Verlauf nicht signifikant ist.

■ Derivation of stresses

– strain measurement = recording of free strains

- temperature strain ($\alpha_T \cdot \Delta T(t)$)
- shrinkage strain ($\Delta \varepsilon_{cs}(t)$)
- creep strain ($\Delta \varepsilon_{cc}(t)$)

measured strain:

$$\varepsilon_{\text{meas}} = (\alpha_T \cdot \Delta T + \varepsilon_{cs} + \varepsilon_{cc}) \cdot (1 - \alpha)$$

DFOS measurement includes „solely“ the unrestrained part of the imposed strain

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

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

→ depending on stress history

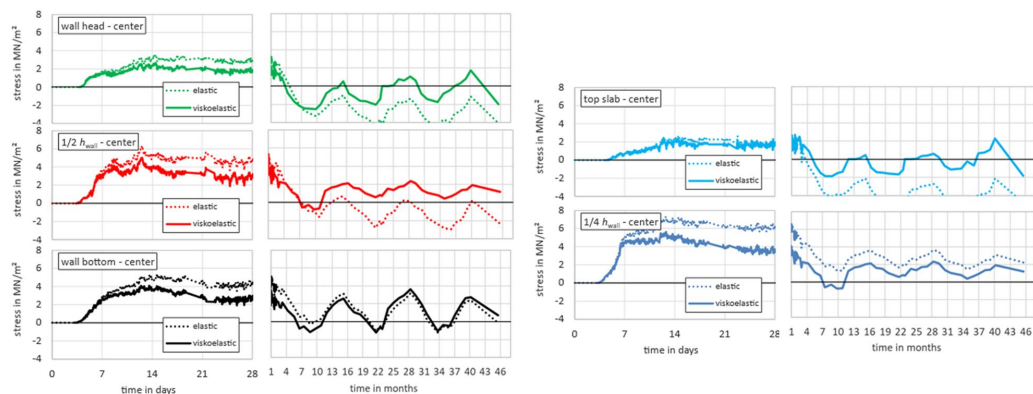


Abbildung 2.4.5: Abbildung 7 – Spannungsentwicklungen Langzeitmonitoring Koralmbahn Baulos 3.1

Das Arbeitspaket konnte insgesamt gemäß Plan erarbeitet werden. Es gab keine wesentlichen Abweichungen von den geplanten Arbeiten. Im Zuge der genehmigten kostenneutralen Projektverlängerung wurde auch das Langzeitmonitoring um sechs Monate verlängert. Dadurch konnte der Beobachtungszeitraum erweitert und die Aussagekraft der Langzeitauswertung zusätzlich erhöht werden.

Der Fertigstellungsgrad des Arbeitspakets ist 100 %.

2.5. Berechnungsmodelle und Validierung

Fertigstellungsgrad: 100%

In diesem Arbeitspaket wurden numerische Berechnungsmodelle für die Bauteiltypen „Bodenplatte“, „Wand auf Fundament“, „Decke“ und „Tunnelquerschnitt“ erstellt. Die Modelle wurden hinsichtlich Bauteildicke, Längsabmessungen, Materialmodell, Umgebungsrandbedingung und Nachbehandlung parametrisch aufgebaut. Ziel ist die realitätsnahe Abbildung der Temperatur-, Dehnungs- und Spannungsentwicklung während der Betonerhärtung und über den Nutzungszeitraum. Abbildung 8 zeigt die entwickelten detaillierten thermohygro-mechanischen Berechnungsmodelle.

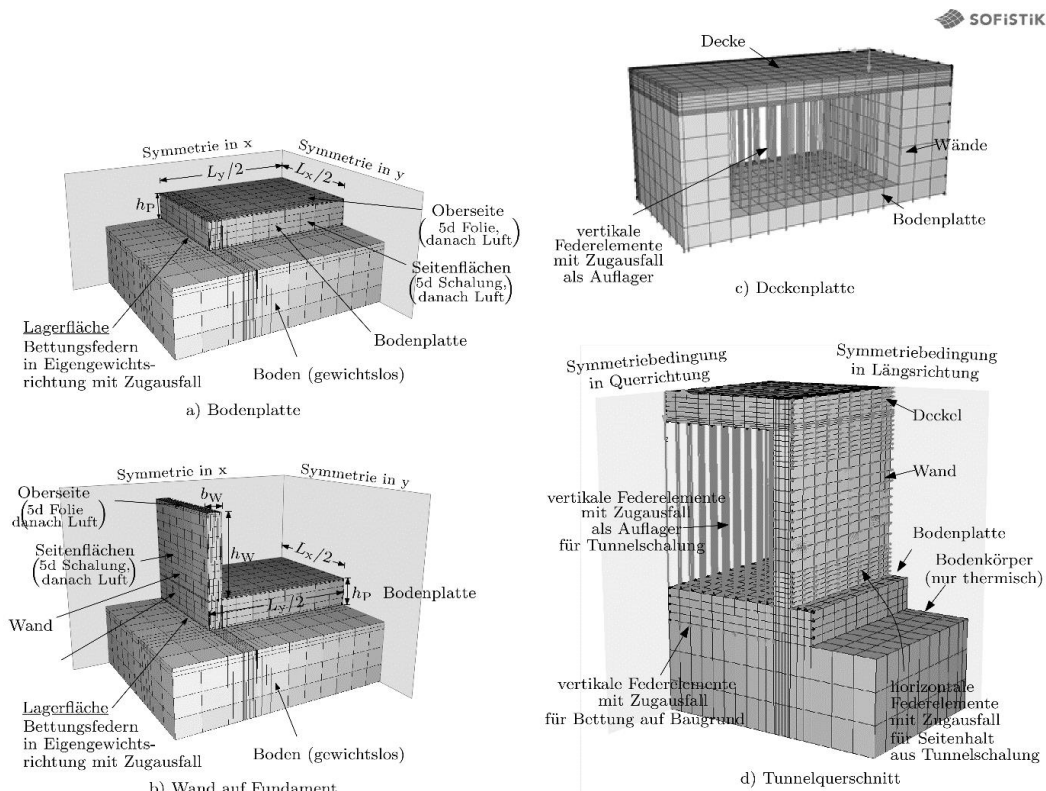
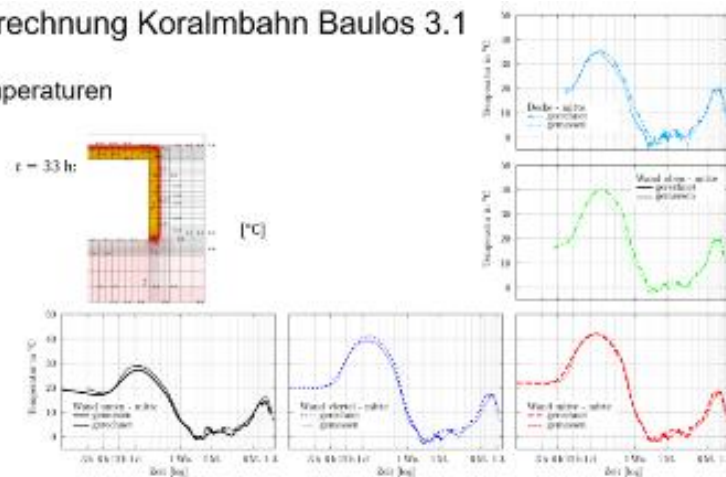


Abbildung 2.5.1: Abbildung 8 – Detaillierte thermohygromechanische Berechnungsmodelle für die Simulation

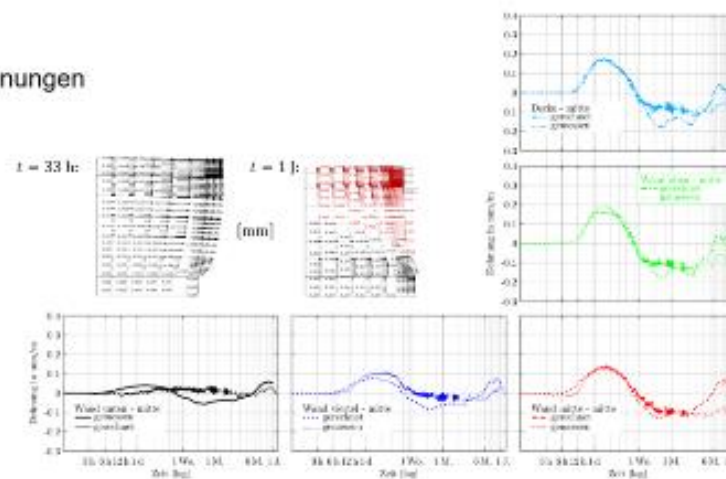
Die Validierung der Berechnungsmodelle erfolgte durch den Vergleich der berechneten Temperatur-, Dehnungs- und Spannungsentwicklungen mit den Bauwerksmessungen aus AP 3 und AP 4. Abbildung 9 zeigt diesen Vergleich auszugsweise für das Vorhaben Koralmahn Baulos 3.1. Insgesamt konnte eine zufriedenstellende Übereinstimmung erzielt 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

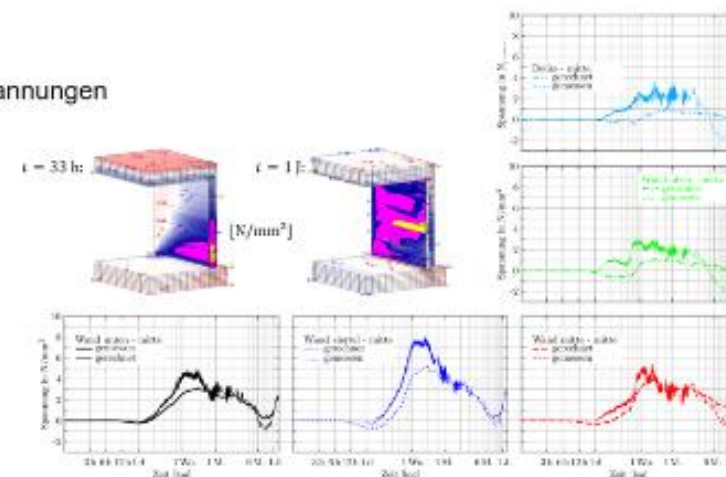


Abbildung 2.5.2: Abbildung 9 – Vergleich der berechneten Temperatur-, Dehnungs- und Spannungsentwicklungen mit den Messergebnissen und aus Messergebnissen abgeleiteten Spannungen am Beispiel Koralmbahn Baulos 3.1

Für die Durchführung der umfangreichen Parameterstudie wurden aus den detaillierten Berechnungsmodellen recheneffiziente Berechnungsmodelle entwickelt. Zunächst wurde hierfür am Beispiel einer Bodenplatte ein vereinfachtes thermohygro-mechanisches Berechnungsmodell aufgebaut, das die Temperatur-, Verformungs- und Spannungsentwicklung bei deutlich reduziertem Rechenaufwand abbildet. Die hierfür getroffenen Idealisierungen sind in Abbildung 10 dargestellt.

■ Berechnungsmodell

– Idealisierung „effizient“

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

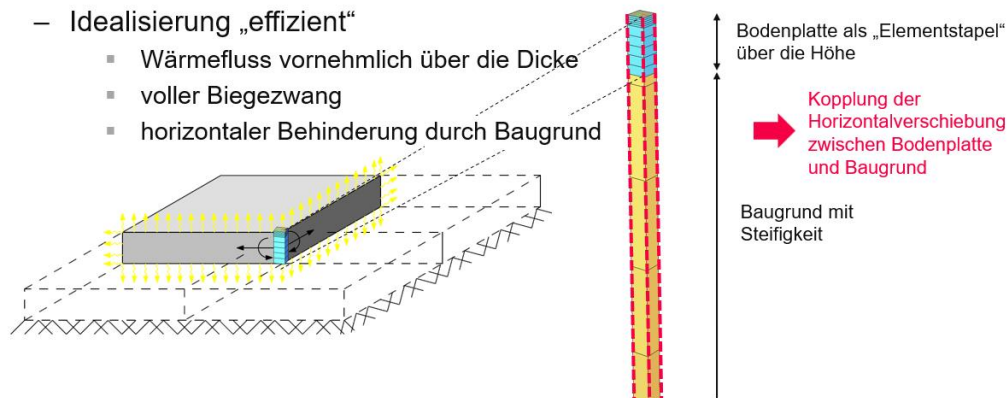


Abbildung 2.5.3: Abbildung 10 – Idealisiertes Berechnungsmodell für die effiziente Durchführung der Parameterstudie am Beispiel der Bodenplatte

Aufbauend auf diesen Untersuchungen wurde die Modellierungsstrategie entsprechend der jeweiligen Fragestellung weiterentwickelt. Für Berechnungen, bei denen ausschließlich die Temperatur- und Steifigkeitsentwicklung erforderlich war, wurden die Berechnungsmodelle auf eine rein thermische Beschreibung inkl. daraus abgeleiteter Steifigkeitsentwicklung reduziert. Dadurch konnte der Rechenaufwand nochmals deutlich verringert werden. Die vereinfachten thermischen Berechnungsmodelle für die unterschiedlichen Bauteiltypen sind in Abbildung 11 dargestellt.

■ Elementstapel über die Höhe/Dicke

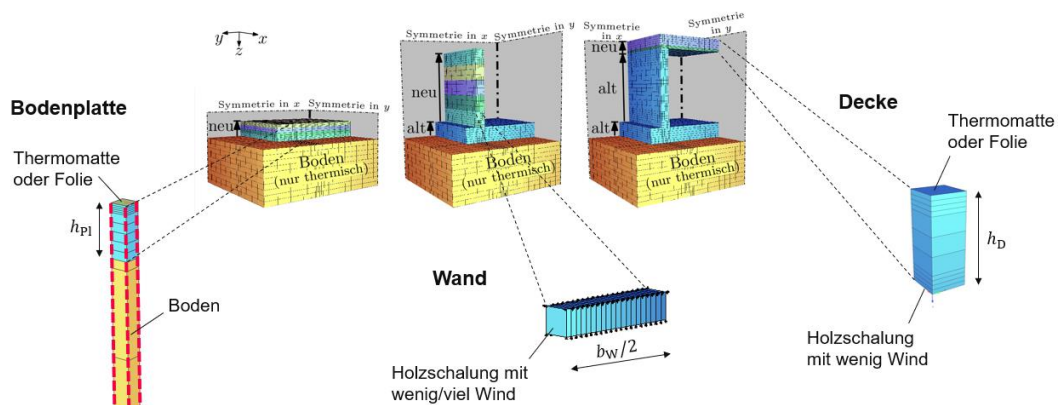


Abbildung 2.5.4: Abbildung 11 – Vereinfachte thermische Berechnungsmodelle für die Parameterstudie

Je nach Fragestellung kamen im weiteren Projektverlauf sowohl die detaillierten thermohygro-mechanischen Berechnungsmodelle als auch die recheneffizienten thermohygro-mechanischen beziehungsweise die rein thermischen Berechnungsmodelle zum Einsatz. Die konkrete Anwendung der einzelnen Modellansätze wird in den nachfolgenden Arbeitspaketen beschrieben.

Insgesamt konnten die Arbeitsschritte somit gemäß Plan erarbeitet werden. Im Zuge der Projektbearbeitung wurde die Modellierungsstrategie schrittweise weiterentwickelt und hinsichtlich der Recheneffizienz optimiert. Dadurch konnten die für die weiteren Untersuchungen erforderlichen Berechnungen deutlich effizienter durchgeführt werden.

Es gab keine wesentlichen Abweichungen oder Veränderungen.

Der Fertigstellungsgrad des Arbeitspakets ist 100 %.

2.6. Parameterstudie

Fertigstellungsgrad: 100%

In diesem Arbeitspaket wurde 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 wurde 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 12 zeigt die untersuchten Systeme.

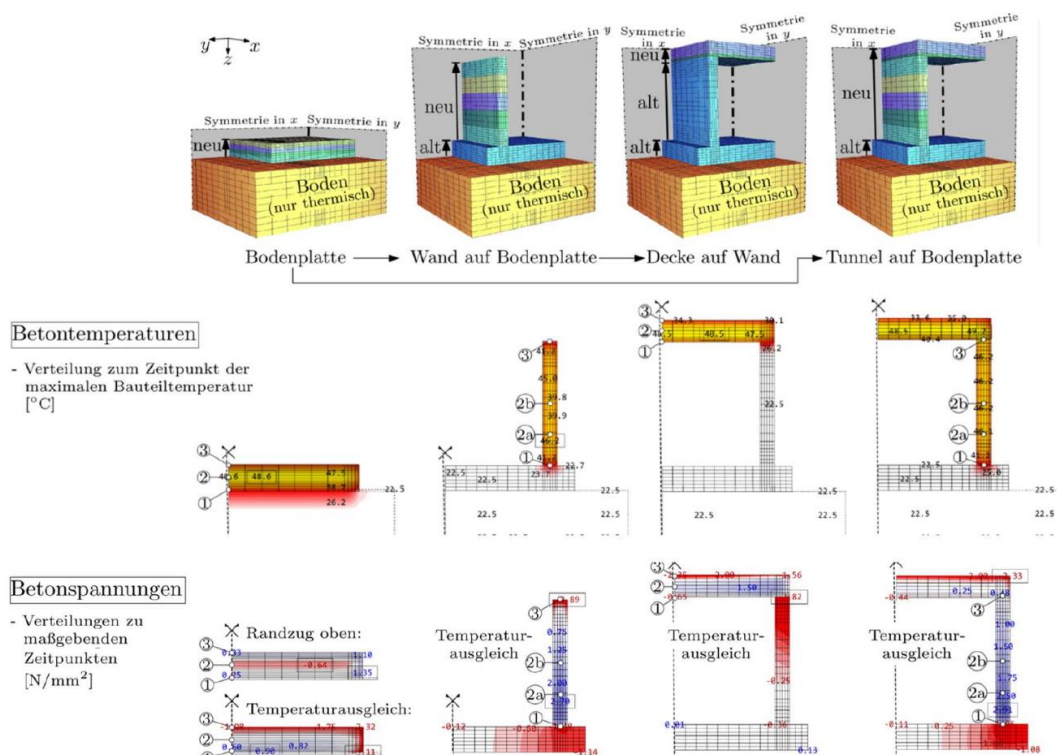


Abbildung 2.6.1: Abbildung 12 – Parameterstudie zur Eignung der maximalen Bauteiltemperatur zur Kontrolle der Rissgefahr

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 thermischen Oberflächenrissen 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. Deckenplatten) 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 Temperatursausgleichs einen erheblichen Einfluss auf die zwangschnittgrößenverursachende Verformungseinwirkung besitzt. Dieser Einfluss ist auch abhängig vom Bauteiltyp und bei Wänden auf Fundamenten stärker ausgeprägt. Die Frischbetontemperatur 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, eine nennenswerte Zunahme der Rissgefahr und sollten deshalb bedachtsam eingesetzt werden.

Die Ergebnisse wurden bereits in der einschlägigen Fachzeitschrift Beton- und Stahlbetonbau veröffentlicht [3].

Die zweite Fragestellung wurde zunächst anhand der in AP 6 entwickelten recheneffizienten thermohygro-mechanischen Berechnungsmodelle untersucht. Hierbei wurden insbesondere der Einfluss der Betonrezeptur, der Bauteildicke, der Frischbetontemperatur, der Umgebungsbedingungen (Umgebungstemperatur und Umgebungsfeuchte) sowie der Nachbehandlung untersucht. Abbildung 13 zeigt beispielhaft die berechneten Temperatur- und Spannungsverläufe einer Bodenplatte.

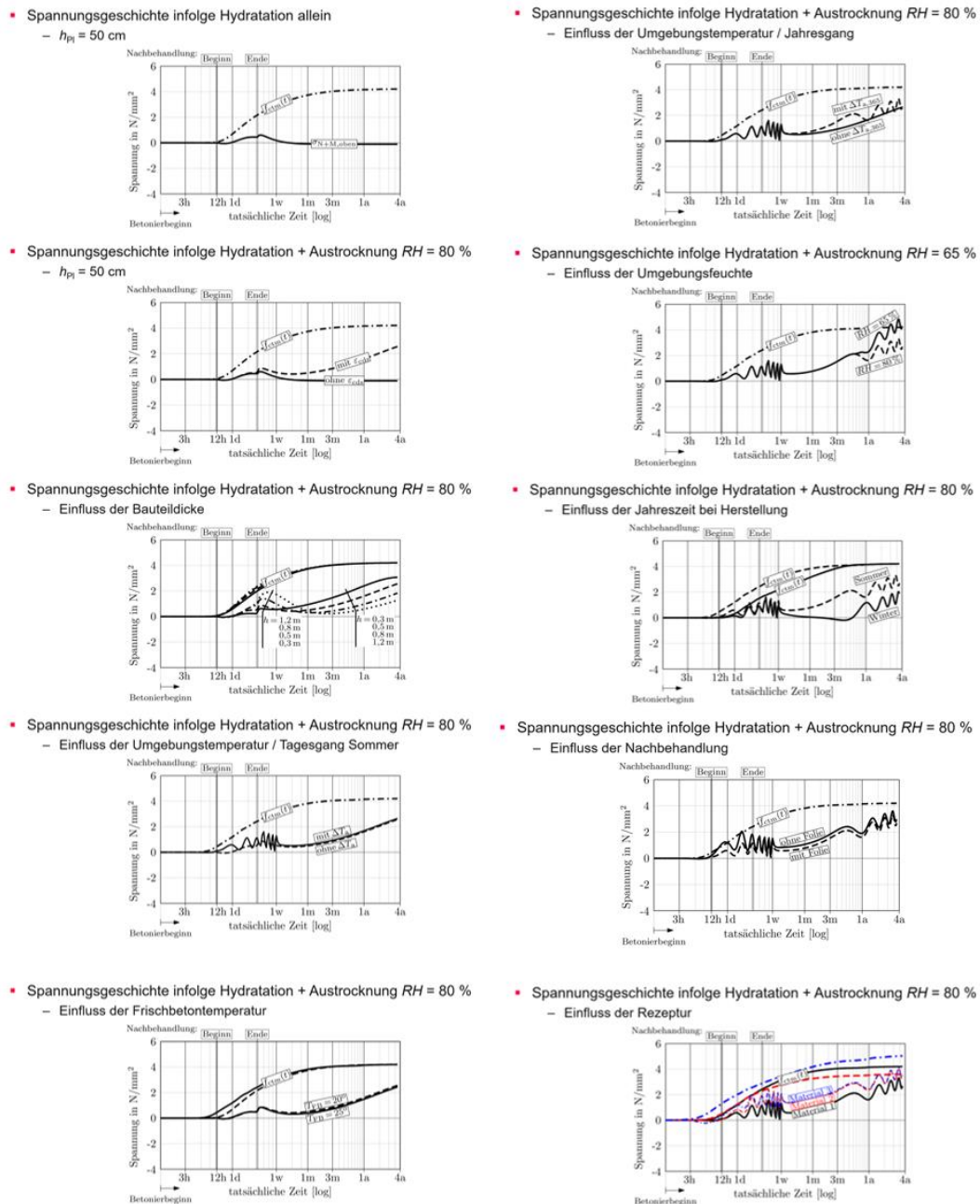


Abbildung 2.6.2: Abbildung 13 – Ausgewählte Berechnungsergebnisse der umfassenden Parameterstudie am Beispiel der Spannungs- und Festigkeitsentwicklung der Bodenplatte

Die Ergebnisse zeigen, dass es in Abhängigkeit der thermischen Nachbehandlungsmaßnahmen und der zugrundeliegenden Umgebungsbedingungen zu einer frühen Oberflächenrissbildung an der Oberseite der Bodenplatte kommen kann. Gleichzeitig wird deutlich, dass Nachbehandlungsmaßnahmen und Umgebungsbedingungen in engem Zusammenhang stehen und gemeinsam betrachtet werden müssen.

In weiterer Folge wurden Untersuchungen hinsichtlich der Dauer von thermischen Nachbehandlungsmaßnahmen vorgenommen. Hierfür sind beispielhaft die Temperatur- und Spannungsverläufe unter konstanten Umgebungsbedingungen für zwei unterschiedlich lange Nachbehandlungsdauern für die Bodenplatte in Abbildung 14 und für die Wand auf Fundament in Abbildung 15 dargestellt. Die Ergebnisse zeigen, dass der mögliche Risszeitpunkt mit großer Wahrscheinlichkeit mit dem thermischen Nachbehandlungsende zusammenfällt.

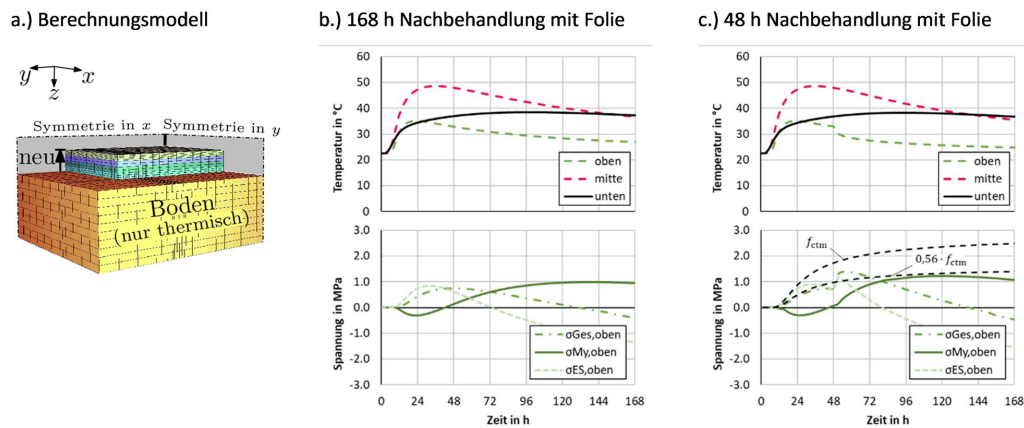


Abbildung 2.6.3: Abbildung 14 – Einfluss der thermischen Nachbehandlungsdauer auf den wahrscheinlichen Risszeitpunkt von Bodenplatten

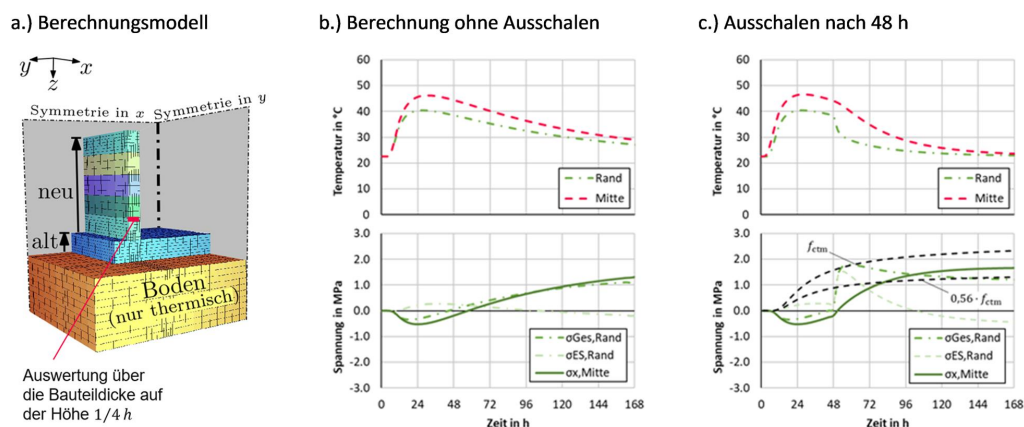
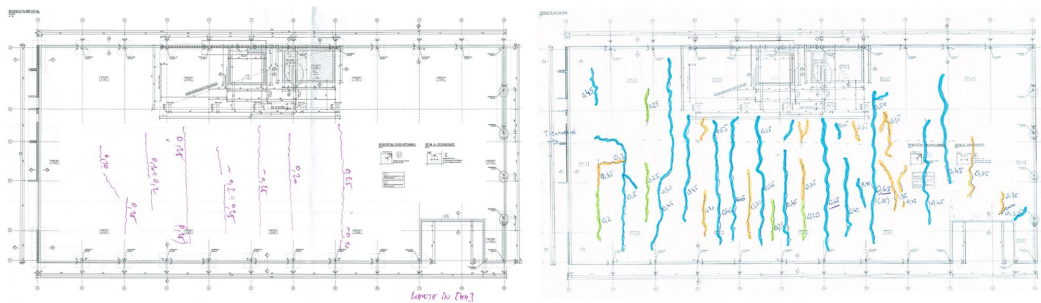


Abbildung 2.6.4: Abbildung 15 – Einfluss des Ausschalzeitpunkts auf den wahrscheinlichen Risszeitpunkt von Wänden auf Fundamenten

Die Auswertungen der Temperatur- und Spannungsverläufe lassen darauf schließen, dass sich bei ausreichender Nachbehandlung ein unkritisches Bild hinsichtlich der Oberflächenqualität ergibt. Dies wird mit Erfahrungen aus der Praxis bestätigt, da bei Einhaltung der Nachbehandlungsmaßnahmen gemäß ÖBV-Richtlinie „Weiße Wannen“ [4] in der Regel eine gute Oberflächenqualität erzielt wird.

In den letzten Jahren wurden jedoch vermehrt Bauwerke mit unerwartet großen Rissöffnungen beobachtet, obwohl die rechnerisch erforderliche Mindestbewehrung eingehalten wurde. Die Untersuchungen im Rahmen dieses Projekts deuten darauf hin, dass diese Rissöffnungen möglicherweise auf eine zu frühe Makrorissbildung zurückzuführen sind. Erfolgt die Makrorissbildung bereits vor dem Aufbau einer ausreichenden Verbundfestigkeit zwischen Beton und Bewehrung, kann die Kraftübertragung nachhaltig beeinträchtigt werden. Die daraus resultierende Verbundschädigung kann zu übermäßigen Rissbreiten im Gebrauchszustand führen. Abbildung 16 verdeutlicht diesen Mechanismus.

b.) unerwartete Rissöffnung im Nutzungszeitraum



c.) Verbundschädigungen infolge zu früher Makrorissbildung



Abbildung 2.6.5: Abbildung 16 – Unerwartete Rissöffnung im Nutzungszeitraum durch Verbundschädigungen infolge zu früher Makrorissbildung während der Betonerhärtung

Aufbauend auf diesen Erkenntnissen wurde die weitere Parameterstudie auf die Ermittlung des Zeitpunkts ausgerichtet, ab dem eine Rissbildung infolge einer ausreichend entwickelten Verbundfestigkeit als unkritisch angesehen werden kann. Hierfür wurden die thermischen Berechnungsmodelle einschließlich der zeitabhängigen Entwicklung der Materialeigenschaften verwendet. Dadurch konnte auch der Rechenaufwand erheblich reduziert werden.

Insgesamt wurden 2160 Berechnungsvarianten unter Variation der in Abbildung 17 dargestellten Parameter durchgeführt. Untersucht wurden sechs Betonrezepturen, fünf Bauteildicken, drei Bauteiltypen, zwei Nachbehandlungsvarianten, drei Jahreszeiten sowie vier Temperaturszenarien.

Parameter	Varianten	Abhängigkeit
Betonrezeptur	6x GreenInfra-Ref; GreenInfra-CO2; Koralmtunnel; Koralmbahn; S7; BBT-Sillschlucht	-
Bauteildicke in m	5x 0,25; 0,50; 0,80; 1,20; 2,00	-
Bauteiltyp	3x Bodenplatte; Wand; Decke	-
Nachbehandlung	2x TN1; TN2	von Bauteiltyp
Jahreszeit	3x Sommer; Herbst; Winter	-
Temperaturszenario	4x VAR 1; VAR 2; VAR 3a; VAR 3b	von Jahreszeit

Nachbehandlung	Bodenplatte	Wand	Decke
TN1	Thermomatte 2,4 W/°Cm ²	Holzschalung mit wenig Wind 2,4 W/°Cm ²	Thermomatte 2,4 W/°Cm ²
TN2	Folie 10,0 W/°Cm ²	Holzschalung mit viel Wind 4,2 W/°Cm ²	Folie 10,0 W/°Cm ²

Temperaturszenario	Sommer	Herbst	Winter
VAR 1 $T_{a,m} = T_{FB}$	22.5 °C	12.5 °C	5 °C
VAR 2 $+\Delta T_{FB}$	5 °C	5 °C	5 °C
VAR 3a $+\Delta T_{a,var}$ Einbau 6 Uhr	25 °C	25 °C	15 °C
VAR 3b $+\Delta T_{a,var}$ Einbau 18 Uhr	25 °C	25 °C	15 °C

Abbildung 2.6.6: Abbildung 17 – Zusammenfassung der Parameterstudie

Abbildung 18 zeigt den Zeitpunkt einer ausreichenden Verbundfestigkeit für alle durchgeführten Parameterkombinationen in Abhängigkeit der Bauteildicke. Die Ergebnisse weisen eine große Bandbreite auf und verdeutlichen den erheblichen Einfluss der gewählten Randbedingungen. Abbildung 19 stellt den Zeitpunkt einer ausreichenden Verbundfestigkeit in Abhängigkeit von den Umgebungsbedingungen, der Betonrezeptur und den Nachbehandlungsmaßnahmen getrennt dar. Diese Auswertung zeigt, dass der Zeitpunkt einer ausreichenden Verbundfestigkeit in erster Linie durch die klimatischen Randbedingungen, insbesondere die Umgebungstemperatur, bestimmt wird. Darüber hinaus ergibt sich insbesondere bei Betonagen im Winter ein zusätzlicher Einfluss aus der Differenz zwischen Frischbeton- und Umgebungstemperatur. Ein weiterer Einfluss ergibt sich aus der Betonrezeptur. Für eine Betonage im Sommer beträgt der Unterschied zwischen dem frühesten und dem spätesten Erreichen einer ausreichenden Verbundfestigkeit rund 24 Stunden. Demgegenüber ist der Einfluss unterschiedlicher thermischer Nachbehandlungsmaßnahmen vergleichsweise gering. Auch die Bauteildicke wirkt sich nur unter ungünstigen Randbedingungen, insbesondere bei niedrigen Umgebungstemperaturen und sehr dünnen Bauteilen, nennenswert auf den Zeitpunkt einer ausreichenden Verbundfestigkeit aus.

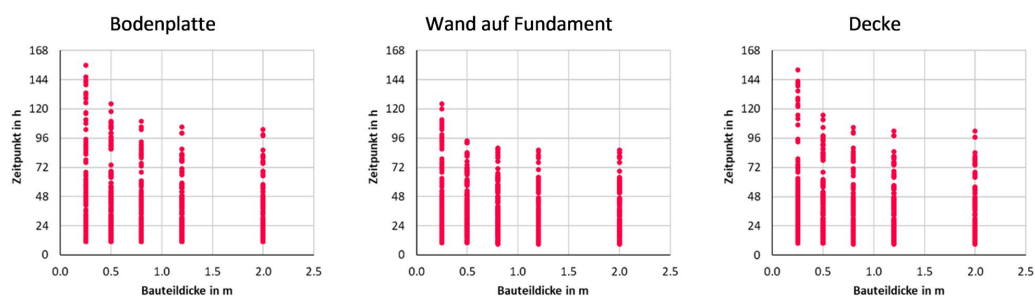


Abbildung 2.6.7: Abbildung 18 – Zeitpunkt einer ausreichenden Verbundfestigkeit für alle Parametervariationen

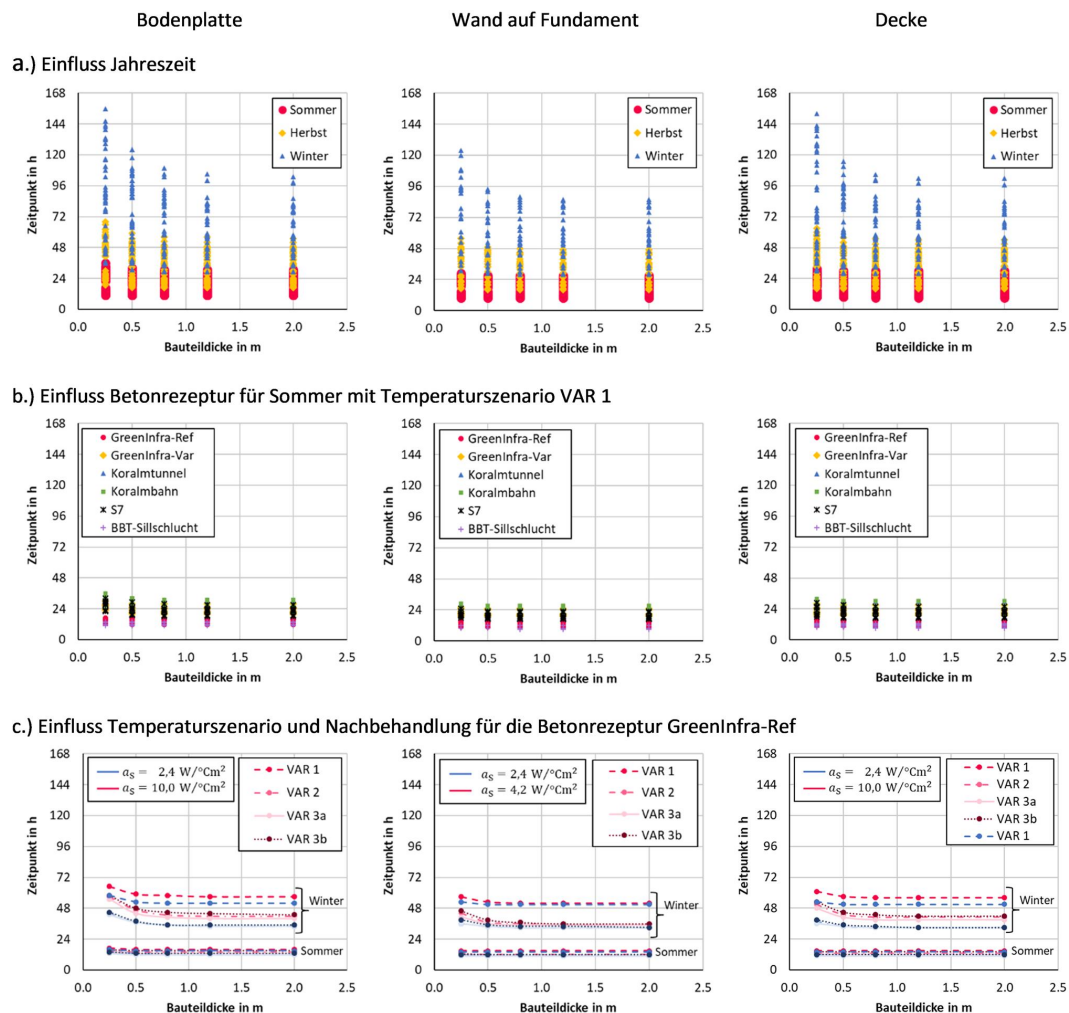


Abbildung 2.6.8: Abbildung 19 – Zeitpunkt einer ausreichenden Verbundfestigkeit in Abhängigkeit unterschiedlicher Parameter

2.7. Empfehlungen

Fertigstellungsgrad: 100%

Eine zufriedenstellende und dauerhafte Risskontrolle kann nur durch das Zusammenwirken mehrerer Maßnahmen sichergestellt werden. Die im Zuge dieses Projekts entwickelten Empfehlungen gliedern sich daher in Maßnahmen zur Sicherstellung einer ausreichenden Verbundfestigkeit, zur Rissvermeidung, zum Schutz vor Austrocknung sowie gegebenenfalls zur Rissbreitenbegrenzung. Nachfolgend werden die Hintergründe und Empfehlungen der einzelnen Maßnahmen im Detail erläutert.

Sicherstellung einer ausreichenden Verbundfestigkeit

Die Parameterstudie sowie die Auswertung von unvorhergesehenen Rissbildern in Betonbauwerken deuten darauf hin, dass eine zu frühe Makrorissbildung zu einer Schädigung des Verbunds zwischen Beton und Bewehrung führen und dadurch die Kraftübertragung nachhaltig beeinträchtigen kann. Dies kann in weiterer Folge zu übermäßigen Rissbreiten im Gebrauchszustand führen. Aus diesem Grund ist es erforderlich, Makrorisse bis zum Erreichen einer ausreichenden Verbundfestigkeit möglichst zu vermeiden. Zur Untersuchung der Entwicklung der Verbundfestigkeit während der Betonhärtung wurden in [5]

Pull-Out-Versuche durchgeführt. Die Ergebnisse zeigen, dass die Verbundfestigkeit im frühen Betonalter eine bessere Korrelation mit der Betonzugfestigkeit als mit der Betondruckfestigkeit aufweist. Darüber hinaus zeigen die Versuche, dass bereits ab einer Betonzugfestigkeit von etwa $0,2 f_{ctm}$ eine Kraftübertragung zwischen Beton und Bewehrung stattfindet. Da die Entwicklung des Verbundverhaltens im frühen Betonalter jedoch weiterer Untersuchungen bedarf, wird im Sinne einer robusten und praxisgerechten Empfehlung erst ab $f_{ctm}(t) > 0,3 f_{ctm}$ von einer ausreichenden Verbundfestigkeit ausgegangen.

Aus diesen Überlegungen ergibt sich die Empfehlung, thermische Nachbehandlungsmaßnahmen zumindest bis zum Erreichen einer ausreichenden Verbundfestigkeit aufrechtzuerhalten, um kritische Temperaturgradienten und eine zu frühe Makrorissbildung zu vermeiden. Die in Kapitel 2.6 dargestellte Auswertung des Zeitpunkts einer ausreichenden Verbundfestigkeit basiert auf diesem Kriterium. Hieraus ergibt sich eine Mindestdauer der thermischen Nachbehandlung von $t(T_{FB}) = \max\{116 - 4 \times T_{FB}; 36 \text{ h}\}$. Bei Wänden auf Fundamenten handelt es sich hierbei um den Ausschalzeitpunkt, wobei in weiterer Folge keine thermischen Maßnahmen notwendig sind. Für Bodenplatten wird bei Umgebungstemperaturen unter 5°C eine Thermomatte empfohlen. Bei Umgebungstemperaturen über 5°C ist eine Abdeckung mit Folie als thermische Nachbehandlungsmaßnahme ausreichend.

Rissvermeidung mittels Temperaturkriterium

Zur Begrenzung erhärtungsbedingter Rissbildung werden derzeit unterschiedliche Nachweiskonzepte angewendet. In der ÖBV-Richtlinie „Weiße Wannen“ [4] werden die maximale Bauteiltemperatur beziehungsweise die Frischbetontemperatur begrenzt. Diese Grenzwerte werden weitgehend unabhängig voneinander betrachtet und dienen als einfache Steuergrößen zur Verringerung der Rissgefahr. Ergänzend dazu enthält das Merkblatt „Analytisches Bemessungsmodell für Weiße Wanne optimiert“ [8] einen mechanisch begründeten Rissvermeidungsnachweis auf Grundlage der im Beton auftretenden Zwangsspannungen. Dieser Nachweis basiert auf denselben Grundlagen wie die nachfolgend entwickelte temperaturbasierte Vorgehensweise.

Die Ergebnisse der im Rahmen dieses Projekts durchgeführten Parameterstudie zeigen, dass weder die maximale Bauteiltemperatur noch die Frischbetontemperatur allein eine geeignete Kenngröße zur Beurteilung der Rissgefahr darstellen. Entscheidend sind vielmehr die Temperaturunterschiede zwischen maximaler Bauteiltemperatur und Umgebungstemperatur sowie die Temperaturgradienten über den Querschnitt. Insbesondere führt eine alleinige Begrenzung der maximalen Bauteiltemperatur unter hochsommerlichen Randbedingungen häufig zu aufwendigen und teilweise unnötigen Zusatzmaßnahmen, obwohl keine erhöhte Rissgefahr besteht.

Aus diesem Grund werden im Folgenden die Erkenntnisse früherer Arbeiten zum spannungsbasierten Rissvermeidungsnachweis [6]-[8] mit den Ergebnissen der durchgeführten Parameterstudie zusammengeführt. Ziel ist die Entwicklung eines mechanisch begründeten Temperaturkriteriums, das eine einfache und praxisgerechte Beurteilung der Rissgefahr ermöglicht und in weiterer Folge die Ableitung einer zulässigen Frischbetontemperatur ermöglicht. Als Grenzwert wird hierbei das erhöhte Verformungsvermögen des Betons unmittelbar vor der Rissbildung ausgenutzt. Anstelle der vorhandenen Zugfestigkeit zum Risszeitpunkt wird daher die Zugbruchdehnung des Betons als maßgebendes Kriterium herangezogen. Unter Ansatz einer zulässigen Zugbruchdehnung von $0,12\text{‰}$ ergibt sich ein zulässiger Temperaturunterschied von 12°C .

Zur Bestimmung der maßgebenden Temperaturbeanspruchung wird das Temperaturprofil über den Querschnitt in einen Normalanteil, einen Biegeanteil und einen nichtlinearen Temperaturanteil zerlegt. Aus der Überlagerung der jeweils maßgebenden Temperaturanteile kann anschließend das Temperaturkriterium zur Vermeidung von Makrorissbildung abgeleitet werden.

Bei Bodenplatten tritt die maßgebende Temperaturbeanspruchung infolge der unterschiedlichen Wärmeabgabe über Ober- und Unterseite bereits früh als Biegebeanspruchung an der Oberseite auf. Die maßgebenden Temperaturanteile setzen sich daher aus dem Biegeanteil und dem nichtlinearen Temperaturanteil zusammen. Der Normalanteil wird vernachlässigt, da er zum maßgebenden Zeitpunkt der Biegebeanspruchung entgegenwirkt und aufgrund des geringen Behinderungsgrades zwischen Bodenplatte und Untergrund auch im weiteren Erhärtungsverlauf keine maßgebenden Zwangsspannungen verursacht.

Aufgrund der zeitabhängigen Steifigkeitsentwicklung und des Kriechens wird nur ein Teil der temperaturbedingten Verformungen in Zwangsspannungen umgesetzt. Zur Berücksichtigung der Steifigkeitsentwicklung und des Kriechens wird daher der Reduktionsfaktor k eingeführt. Für den Biegeanteil wird vollständiger Biegezwang angenommen, sodass der Behinderungsgrad $a = 1$ beträgt. Abbildung 20 a) zeigt die Zerlegung des Temperaturprofils sowie die Herleitung des Temperaturkriteriums für Bodenplatten.

Bei Wänden auf Fundamenten ergibt sich die maßgebende Temperaturbeanspruchung aus dem Abkühlungspotenzial zwischen der maximalen Bauteiltemperatur und der Ausgleichstemperatur. Die Temperaturbeanspruchung setzt sich aus einem Normalanteil und einem nichtlinearen Temperaturanteil zusammen. Aufgrund der annähernd gleichen Wärmeabgabe über beide Bauteiloberflächen entsteht kein Biegeanteil. Analog zur Bodenplatte wird der Einfluss der Steifigkeitsentwicklung und des Kriechens durch den Faktor k berücksichtigt. Da außerdem nur der behinderte Anteil der Temperaturbeanspruchung Zwangsspannungen verursacht, wird der Normalanteil zusätzlich mit dem Behinderungsgrad a reduziert. Abbildung 20 b) zeigt die Zerlegung des Temperaturprofils sowie die Herleitung des Temperaturkriteriums für Wände auf Fundamenten.

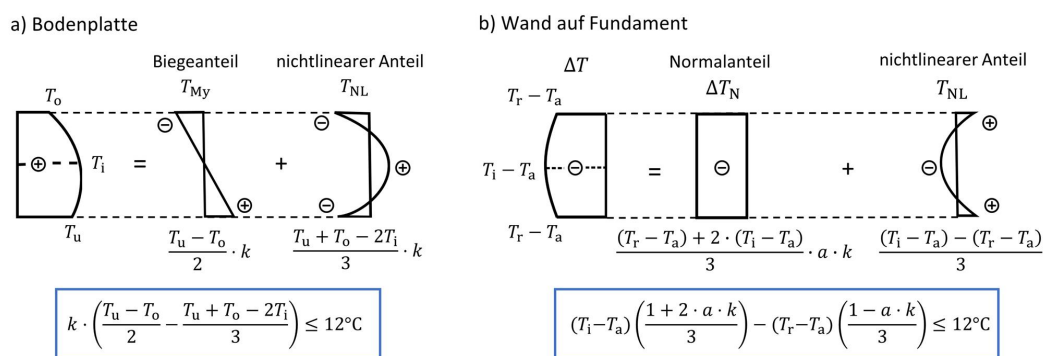


Abbildung 2.7.1: Abbildung 20 – Temperaturkriterium für Rissvermeidung

Dieses Kriterium wird für die Praxis so aufbereitet, dass mit der Abschätzung der maximalen Bauteiltemperatur und der zu erwartenden Ausgleichstemperatur eine Frischbetontemperatur festgelegt werden kann. Kann diese nicht eingehalten werden, kann der Nachweis entweder durch eine Verlängerung der thermischen Nachbehandlung, eine Reduzierung der Frischbetontemperatur oder eine Reduzierung des Wärmepotenzials der Betonrezeptur erfolgen.

Schutz vor Austrocknung

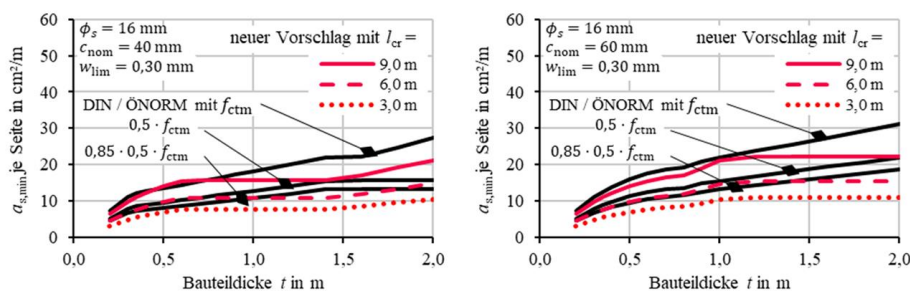
Zur Sicherstellung einer dauerhaft hochwertigen Oberflächenqualität ist neben der Vermeidung einer zu frühen Makrorissbildung auch ein frühzeitiger Feuchtigkeitsverlust der Betonoberfläche zu vermeiden. Hierzu wird empfohlen, die Oberfläche für mindestens sieben Tage mit einem geeigneten Nachbehandlungsmittel zu behandeln, um einen frühzeitigen Feuchtigkeitsverlust und eine daraus resultierende Minderung der Oberflächenqualität zu vermeiden.

Rissbreitenbegrenzung

Kann Makrorissbildung nicht vermieden werden oder ist ein Rissvermeidungsnachweis wirtschaftlich nicht sinnvoll, ist die Rissbreite durch eine ausreichende Mindestbewehrung zu begrenzen. Im Rahmen des Forschungsprojekts wurde hierfür ein neuer Bemessungsansatz entwickelt, der die bekannten Schwächen bisheriger Verfahren überwindet. Das Verfahren berücksichtigt erstmals den bauteiltypabhängigen, geometrisch vorgegebenen Primärrissabstand und leitet die erforderliche Mindestbewehrung auf einer mechanisch konsistenteren Grundlage aus dem tatsächlichen Rissbildungsprozess ab. Dadurch können problematische Annahmen zur Betonzugfestigkeit bzw. zum Risszeitpunkt vermieden und gleichzeitig mechanisch besser begründete Ergebnisse erzielt werden. Eine ausführliche Beschreibung des Bemessungskonzepts ist in [9] veröffentlicht. In Abbildung 21 ist ein Vergleich des neuen Vorschlags mit dem im EC2 [10] inkl. nationalen Anwendungsdokumenten (NAD) für Deutschland [11] und Österreich [12]

enthaltenen Ansatz sichtbar. Der Vergleich zeigt, dass der neue Ansatz Ergebnisse in derselben Bandbreite wie jener nach EC2 inkl. NAD erzielt, jedoch in diesem Fall die Bandbreite vom geometrisch vorgegebenen Rissabstand abhängt und nicht von einer Annahme zur effektiven Zugfestigkeit zum Risszeitpunkt.

a.) Mindestbewehrung für Wände auf Fundamenten ($k_c=1,0$); Vergleich neuer Vorschlag mit DIN EN 1992-1-1/NA und ÖNORM B 1992-1-1



b.) Mindestbewehrung für Bodenplatten ($k_c=0,4$); Vergleich neuer Vorschlag mit DIN EN 1992-1-1/NA und ÖNORM B 1992-1-1

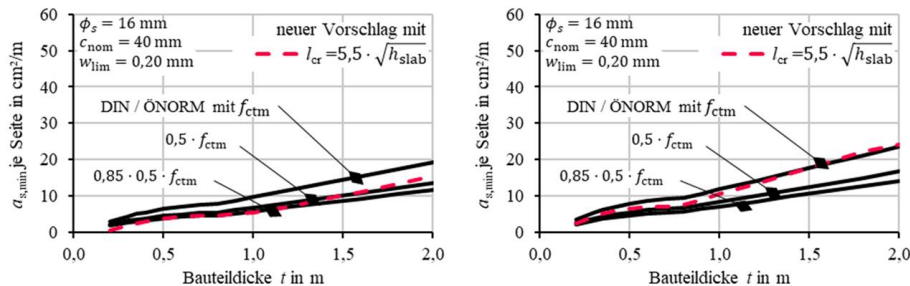


Abbildung 2.7.2: Abbildung 21 – Mindestbewehrung zur Rissbreitenbegrenzung - Vergleich neuer Vorschlag mit DIN EN 1992-1-1/NA und ÖNORM B 1992-1-1

Abbildung 21 – Mindestbewehrung zur Rissbreitenbegrenzung - Vergleich neuer Vorschlag mit DIN EN 1992-1-1/NA und ÖNORM B 1992-1-1

Die entwickelten Empfehlungen ermöglichen eine ganzheitliche Betrachtung der erhärtungsbedingten Rissbildung. Während eine ausreichende Verbundfestigkeit und der Schutz vor Austrocknung die Voraussetzungen für eine dauerhafte Risskontrolle und eine hochwertige Betonoberfläche schaffen, kann durch das vorgeschlagene Temperaturkriterium eine frühe Makrorissbildung vermieden werden. Ist eine Rissvermeidung nicht möglich oder nicht wirtschaftlich, ermöglicht der entwickelte Bemessungsansatz eine mechanisch konsistentere Ermittlung der erforderlichen Mindestbewehrung zur Begrenzung der Rissbreite. Damit stehen erstmals aufeinander abgestimmte Empfehlungen zur Verfügung, welche die Planung und Ausführung massiger Betonbauteile unterstützen und zu einer wirtschaftlichen sowie dauerhaft rissarmen Bauweise beitragen.

3. Erläuterung von wesentlichen Änderungen bei den Kosten

Es ergaben sich keine wesentlichen Änderungen gegenüber dem Förderungsantrag. Innerhalb der In-Kind-Leistungen kam es zu einer geringfügigen Verschiebung: Der Aufwand für das Langzeitmonitoring fiel höher aus als ursprünglich angenommen, während die In-Kind-Leistungen der beteiligten Bauunternehmen unterschiedlich ausfielen. Die Gesamthöhe der In-Kind-Leistungen sowie die Gesamtprojektkosten entsprechen jedoch in Summe weitgehend den im Förderungsantrag vorgesehenen Ansätzen. Die Kosten fielen annähernd linear über die Zeit an.

4. Beitrag der Projektergebnisse zur Nachhaltigkeit

Die Ergebnisse des Forschungsprojekts leisten einen wesentlichen Beitrag zur ökologischen und wirtschaftlichen Nachhaltigkeit im Betonbau. Durch die entwickelten Bemessungs- und Ausführungsempfehlungen werden die Voraussetzungen für den sicheren und breiten Einsatz CO₂-reduzierter Betone geschaffen. Damit wird eine wesentliche Hürde für deren Anwendung in der Praxis beseitigt und die Umsetzung klimafreundlicher Betonbauweisen unterstützt.

Ein wesentlicher Beitrag zum Klimaschutz ergibt sich aus der optimierten Temperaturführung während der Betonerhärtung. Die Ergebnisse zeigen, dass die bisher häufig angewendete Begrenzung der maximalen Bauteiltemperatur beziehungsweise der Frischbetontemperatur nicht in allen Fällen zielführend ist. Mit dem entwickelten Temperaturkriterium können Kühlmaßnahmen künftig gezielt auf tatsächlich kritische Situationen beschränkt werden. Dadurch kann der Einsatz energieintensiver Frischbetonkühlungen und aufwendiger Kühlsysteme deutlich reduziert werden, wodurch sowohl Energieverbrauch als auch CO₂-Emissionen während der Bauausführung sinken.

Darüber hinaus ermöglicht das entwickelte Temperaturkriterium einen einfachen und praxisgerechten Nachweis der Rissvermeidung. Ergänzend wurde ein neuer mechanisch konsistenter Bemessungsansatz zur Ermittlung der Mindestbewehrung entwickelt. Dadurch kann der Bewehrungseinsatz bedarfsgerechter erfolgen und der Stahlverbrauch reduziert werden. Neben den ökologischen Vorteilen ergeben sich dadurch auch wirtschaftliche Einsparungen.

Innerhalb der nächsten fünf Jahre wird erwartet, dass die Projektergebnisse schrittweise in Richtlinien, Bemessungsempfehlungen und die Planungspraxis übernommen werden. Dadurch wird ein breiterer Einsatz CO₂-reduzierter Betone ermöglicht, der Bedarf an energieintensiven Kühlmaßnahmen verringert und der Bewehrungseinsatz optimiert. Eine exakte Quantifizierung der CO₂-Einsparungen ist derzeit noch nicht möglich, da diese vom Umfang der zukünftigen Anwendung der entwickelten Empfehlungen abhängt. Aufgrund des breiten Anwendungsbereichs im Infrastruktur- und Hochbau wird jedoch ein erhebliches CO₂-Einsparpotenzial erwartet. Insgesamt leisten die Projektergebnisse damit einen wesentlichen Beitrag zur Dekarbonisierung des Betonbaus sowie zur Anpassung der Baupraxis an die Anforderungen einer nachhaltigen und klimafreundlichen Bauweise.