



Daniel Gasser, BSc

**Praxistest der Bemessungsmodelle für die
Gebrauchstauglichkeitsnachweise von Weißen Wannen
gemäß öbv-Richtlinie 2018**

MASTERARBEIT

zur Erlangung des akademischen Grades

Diplom-Ingenieur

Masterstudium Bauingenieurwissenschaften - Konstruktiver Ingenieurbau

eingereicht an der

Technischen Universität Graz

Betreuer

Ass.Prof. Dipl.-Wirtsch.-Ing. Dr.techn. Dirk Schlicke

Institut für Betonbau

Fakultät für Bauingenieurwissenschaften

EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG

AFFIDAVIT

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe. Das in TUGRAZonline hochgeladene Textdokument ist mit der vorliegenden Masterarbeit identisch.

I declare that I have authored this thesis independently, that I have not used other than the declared sources/resources, and that I have explicitly indicated all material which has been quoted either literally or by content from the sources used. The text document uploaded to TUGRAZonline is identical to the present master's thesis.

14.01.2019

Datum / Date

David Gasser

Unterschrift / Signature

Danksagung

An dieser Stelle gilt es all jenen ganz herzlich zu danken, die mich beim Verfassen der vorliegenden Arbeit unterstützt haben.

Als Erstes danke ich meinen Betreuern Ass.-Prof. Dr. Dirk Schlicke und Univ.-Doz. Dr. tit.Univ.-Prof. Johann Glatzl für die Bereitstellung des Themas und die hervorragende fachliche Betreuung während der Ausarbeitung. Die ständige Bereitschaft zur Diskussion und Hilfestellung hat die Arbeit in dieser Form erst möglich gemacht und mir viele neue Erkenntnisse im Fachgebiet (Stahl-)Betonbau geliefert.

Des Weiteren möchte ich mich bei Herrn Univ.-Prof. Dr. habil. Viet Tue Nguyen für die Wissensvermittlung im Massivbau während meines Bachelor- und Masterstudiums an der Technischen Universität Graz bedanken. Durch sein Engagement ist es ihm gelungen, große Faszination für den Werkstoff Beton in mir zu wecken.

Der größte Dank gilt meinen Eltern, denen ich diese Arbeit widmen möchte: Meiner Mutter Hildegard, die mir bedingungslos immer mit Rat und Tat zur Seite stand und mit aufmunternden Worten den Studienalltag erleichterte. Meinem Vater Erwin, der mir von Kindheit an das Bauwesen näherbrachte und mich bis heute in spannenden Diskussionen immer wieder aufs Neue verblüfft.

Meiner Schwester Melanie und meinem Bruder Fabian danke ich für die Gesellschaft während meines Studiums in Graz und dafür, dass ich immer auf sie zählen konnte.

Abschließend möchte ich mich bei meinen Studienkollegen und Freunden bedanken. Dominik Matzler und Philipp Mair für die zahlreichen Treffen am späten Abend und Moritz Telch für die interessanten Gedankenaustausche. Auch meinen Freunden aus dem Zeichensaal gilt ein besonderer Dank für die schöne Zeit. Zu guter Letzt danke ich Hannes Volgger, meinem langjährigen besten Freund aus der Heimat. Die spontanen Ausflüge während der Ferienzeiten haben mich immer wieder neu motiviert.

Kurzfassung

Die öbv-Richtlinie „Wasserundurchlässige Betonbauwerke - Weiße Wannen“ aus dem Jahr 2018 beschreibt zur Nachweisführung der Gebrauchstauglichkeit „bei überwiegender Zwangbeanspruchung“ neben dem Bemessungsmodell „Weiße Wanne klassisch“, welches auf der Bemessungsphilosophie der Rissbreitenbegrenzung beruht, erstmals auch das Bemessungsmodell „Weiße Wanne optimiert“ mit dem Ziel der Rissvermeidung. Der Nachweis der Rissvermeidung im Bemessungsmodell „Weiße Wanne optimiert“ kann hierbei mit einer analytischen Lösung für einfache statische Systeme oder allgemein mit einer numerischen Lösung erbracht werden.

In der vorliegenden Masterarbeit werden alle drei durch die Bemessungsmodelle nun zur Verfügung stehenden Bemessungsverfahren an einem konkreten Untersuchungsbeispiel mit festgelegten Randbedingungen angewandt. Es wird der Einsatz derselben exemplarisch festgehalten und eine Gegenüberstellung im Hinblick auf den Bemessungsaufwand und die resultierende erforderliche Bewehrungsmenge vorgenommen.

Weiters werden die einzelnen Verfahren hinterfragt und Vereinfachungen und Annahmen im Bemessungsvorgang, die aus der Richtlinie bzw. dem Merkblatt nicht direkt ersichtlich sind, aufgezeigt. Dabei nimmt das Bemessungsverfahren „Numerische Simulation“ den Hauptteil der Arbeit ein.

Ein weiterer Schwerpunkt ist die Variation des Dehnfugenabstands bei Weißen Wannen. Die Anwendbarkeit der obengenannten Bemessungsmodelle ist im Hinblick auf den vorgesehenen Dehnfugenabstand beschränkt. Die Gültigkeit des Bemessungsmodells „Weiße Wanne klassisch“ ist bei großen Dehnfugenabständen aufgrund der Vernachlässigung des späten Zwangs nicht mehr gegeben. Ebenfalls ist bei großen Dehnfugenabständen die Rissvermeidung nicht mehr möglich, sodass auch das Bemessungsmodell „Weiße Wanne optimiert“ an seine Grenzen kommt. Um dennoch die Auswirkungen einer fugenlosen Ausführung des Untersuchungsbeispiels untersuchen zu können, wird auf das derzeit noch unveröffentlichte BAWMerkblatt „Zwang bei fugenlosen Wasserbauwerken“ zurückgegriffen.

Dem Leser der Arbeit soll eine Hilfestellung für die Auswahl eines für ihn geeigneten Bemessungsverfahrens zur Errichtung einer Weißen Wanne geboten werden.

Abstract

Practical test of the ÖBV design models for the crack control of watertight concrete structures

The öbv Bulletin for watertight concrete structures, so called „Wasserundurchlässige Betonbauwerke - Weiße Wannen“, published in 2018 provides different design models for the crack width control in case of restraint stressing. In detail, it includes the design model „Weiße Wanne klassisch“ based on the design principle „crack width limitation“ and the design model „Weiße Wanne optimiert“ aiming at the avoidance of restraint-induced cracking. And for the second one, two approaches were introduced: (i) analytical solution for simple systems and (ii) advanced numerical solution for all systems.

In this master thesis all three approaches were exemplified on the same example with chosen boundary conditions. The application of them in the practice and a comparison of the effort and the results is explained. Furthermore, application boundaries were checked by comparative studies.

The main part of the work is dedicated to the design method with the numerical simulation. This numerical simulation is particularly used to assess the results of the simplified analytical solution as well as to check the prior mentioned application boundaries of the guideline. The applicability of the öbv design models depends strongly on the member length which is given by the distance between movement joints. The reason of this limitation is the increasing risk of later cracking due to imposed deformations during service life, which strongly depends on the distance of movement joints in the final structure, especially in case of walls on foundations. Altogether, the applied limits of the öbv design were confirmed by the calculations.

Furthermore, the example is also designed as a jointless structure by using a bulletin of the Federal Institute for waterways in Germany, so called „BAWMerkblatt Zwang“, which has not been published yet.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Motivation	1
1.2	Vorgehensweise	3
1.3	Ziel	5
2	Untersuchungsbeispiel	6
2.1	Geometrie	6
2.2	Verwendete Materialien und übliche Kenngrößen	7
2.3	Erweiterte Materialkenngrößen für die Anwendung der öbv-Richtlinie WW	8
2.4	Klimatische Randbedingungen	10
2.5	Weitere thermische Kenngrößen	14
2.6	Bemessungskriterien gemäß öbv-Richtlinie WW	15
2.6.1	Anforderungsklasse	15
2.6.2	Konstruktionsklasse	16
2.6.3	Zulässige Rissbreite	17
3	Bemessung gemäß öbv-Richtlinie WW	18
3.1	Allgemeines	18
3.1.1	Behandlung der Zwangbeanspruchung	18
3.1.2	Überlagerung Last und Zwang	19
3.2	Bemessungsdiagramme Zwang („WW klassisch“)	20
3.2.1	Kurze Beschreibung der Bemessungsphilosophie „Risskraft“	20
3.2.2	Vereinfachungen und Annahmen, die aus der Richtlinie nicht ersichtlich sind	21
3.3	Analytische Bemessung Zwang („WW optimiert“ gemäß öbv-Merkblatt)	22
3.3.1	Allgemeine Beschreibung der Vorgehensweise	22
3.3.2	Vereinfachungen, die aus dem Merkblatt nicht ersichtlich sind	22
3.4	Numerische Simulation Zwang („WW optimiert“ allgemein)	24
3.4.1	Allgemeine Beschreibung der Vorgehensweise	24
3.4.2	Aufbau eines thermomechanischen Berechnungsmodells	26
3.4.3	Mindestanforderungen an die geometrische Idealisierung	27
3.4.4	Kurze Beschreibung des Materialmodells	28
3.4.5	Auswertung und Interpretation	34
4	Bewehrungsermittlung „WW klassisch“	35
4.1	Bodenplatte	36
4.2	Wand	37

5	Bewehrungsermittlung „WW optimiert“ gemäß öbv-Merkblatt	38
5.1	Bodenplatte	40
5.1.1	Rissgefahr	40
5.1.2	Erforderliche Mindestbewehrung zur Begrenzung der Rissbreite . . .	43
5.2	Wand	44
5.2.1	Rissgefahr	44
5.2.2	Erforderliche Mindestbewehrung zur Begrenzung der Rissbreite . . .	46
6	Bewehrungsermittlung „WW optimiert“ allgemein, L = 15 m	47
6.1	Berechnungsmodell	47
6.1.1	Bodenplatte	49
6.1.2	Wand	51
6.2	Simulationsergebnisse	54
6.2.1	Bodenplatte	54
6.2.1.1	Temperaturen	54
6.2.1.2	Spannungen	54
6.2.1.3	Rissgefahr	55
6.2.2	Wand	57
6.2.2.1	Temperaturen	57
6.2.2.2	Spannungen	57
6.2.2.3	Rissgefahr	58
6.3	Erforderliche Mindestbewehrung zur Begrenzung der Rissbreite	59
6.4	Zusatzbetrachtung später Zwang	60
7	Bewehrungsermittlung „WW optimiert“ allgemein, L = 30 m	74
7.1	Berechnungsmodell	74
7.1.1	Bodenplatte	75
7.1.2	Wand	75
7.2	Simulationsergebnisse	78
7.2.1	Bodenplatte	78
7.2.1.1	Temperaturen	78
7.2.1.2	Spannungen	78
7.2.2	Wand	80
7.2.2.1	Temperaturen	80
7.2.2.2	Spannungen	80
7.3	Erforderliche Mindestbewehrung zur Begrenzung der Rissbreite	82
8	Bewehrungsermittlung gemäß BAWMerkblatt Zwang, L = ∞	83
8.1	Bemessungsphilosophie	84
8.1.1	Bemessung Bodenplatte	85
8.1.2	Bemessung Wand	91
9	Diskussion der Ergebnisse	94

1 Einleitung

1.1 Motivation

Wasserundurchlässige Betonbauwerke, auch als „Weiße Wannen“ bezeichnet, stellen einen Grundtyp der Bauwerksabdichtung dar. Bei dieser Art der Stahlbetonkonstruktion kann auf zusätzliche Abdichtungsschichten verzichtet werden, da die Konstruktion selbst neben der tragenden Funktion auch die Abdichtungsfunktion übernimmt.

Die im Zuge der Planung festgelegten Anforderungen an die Dichtigkeit der Wanne gelten dann als erfüllt, wenn der Wasserdurchtritt durch den Beton, die Risse, die Fugen (Arbeits- und Dehnfugen) und die Durchdringungen ausreichend beschränkt bzw. verhindert wird. Dies wird durch die Verwendung von Beton mit hohem Wassereindringwiderstand, dem sogenannten wasserundurchlässigen Beton, die Begrenzung der Rissbreiten oder die Rissvermeidung, die Abdichtung der Fugen und die Ausbildung von dichten Durchdringungen erreicht.

Bei Weißen Wannen können folgende drei Bauweisen unterschieden werden:

- Bauweise ohne Trennrisse
Durch gezielte Maßnahmen konstruktiver Art (z.B. Dehnfugenabstände, Trennschichten), betontechnologischer Art (z.B. Beton mit reduzierter Hydratationswärme) und ausführungstechnischer Art (z.B. Arbeitsfugen, Nachbehandlungsmaßnahmen) werden die Zwangbeanspruchungen ausreichend gering gehalten, wodurch die Trennrissbildung verhindert werden kann.
- Bauweise mit Trennrissen begrenzter Rissbreite
Durch rissverteilende Bewehrung werden die Rissbreiten ausreichend gering gehalten, damit die gestellten Anforderungen an die Dichtigkeit der Wanne erfüllt werden.
- Bauweise mit zugelassenen Trennrissen
Die Bildung von Trennrissen ohne Rissbreitenbeschränkung wird akzeptiert, wobei die nachträgliche Abdichtung derselben Teil der Baumaßnahme ist.

In Österreich repräsentiert die öbv-Richtlinie „Wasserundurchlässige Betonbauwerke - Weiße Wannen“ [14] den derzeitigen Stand der Technik für besagte Konstruktionen. Sie stellt ein Gesamtkonzept zur Realisierung von Weißen Wannen dar, bestehend aus Regeln für die konstruktive Durchbildung und Bemessung, Betontechnologie und Bauausführung.

Historisch betrachtet wurde durch die Österreichische Bautechnik Vereinigung 1999 erstmals eine Richtlinie zum Thema „Wasserundurchlässige Betonbauwerke“ veröffentlicht. Eine Überarbeitung derselben fand in den Jahren 2002, 2009 und für die derzeit gültige Fassung 2018 statt. Neben den dazugewonnenen Erfahrungen wurden in der Vergangenheit insbesondere das neue österreichische Normenwerk auf dem Gebiet der Betontechnologie und die Eurocodes eingearbeitet.

Im Februar 2018 wurde die derzeit aktuelle Auflage der Richtlinie publiziert. Wesentliche Neuerungen waren die Einführung des Betonstandards „BS 1 PLUS“ und des Bemessungsmodells „Weiße Wanne optimiert“. In diesem Zusammenhang wurde ergänzend zur Richtlinie erstmals das öbv-Merkblatt „Analytisches Bemessungsverfahren für die Weiße Wanne optimiert“ [13] veröffentlicht. Wie der Name bereits sagt, beschreibt das Merkblatt das analytische Bemessungsverfahren zum neu eingeführten Bemessungsmodell, wodurch auch ohne Spezialkenntnisse die Anwendung desselben möglich wird. Das analytische Verfahren wurde im Zuge von Forschungsarbeiten am Institut für Betonbau der Technischen Universität Graz erarbeitet.

Im Zuge des Bemessungsvorgangs müssen gemäß [14, S. 11] folgende drei Nachweise geführt werden:

- Nachweis der Tragsicherheit
- Nachweis der Gebrauchstauglichkeit „bei überwiegender Zwangbeanspruchung“
- Nachweis der Gebrauchstauglichkeit „bei überwiegender Lastbeanspruchung“

Durch die Neueinführung des Bemessungsmodells „Weiße Wanne optimiert“ stehen nun mit dem bisherigen Bemessungsmodell „Weiße Wanne klassisch“ drei Verfahren zum Nachweis der Gebrauchstauglichkeit „bei überwiegender Zwangbeanspruchung“ durch die Richtlinie zur Verfügung. Tab. 1.1 gibt eine detaillierte Übersicht über die einzelnen Verfahren.

Tab. 1.1: Übersicht über die Verfahren zum Nachweis der Gebrauchstauglichkeit „bei überwiegender Zwangbeanspruchung“ gemäß [14, S. 13]

Entwurfsgrundsatz	Rissbreitenbegrenzung	Rissvermeidung	
Bemessungsmodell	„Weiße Wanne klassisch“	„Weiße Wanne optimiert“	
Bemessungsverfahren Nachweis „früher Zwang“	Bemessungsdiagramme	Analytische Bemessung	Numerische Simulation
Nachweis „später Zwang“	entfällt bei Dehnfugenabstand ≤ 30 m gemäß [7, S. 12]	entfällt bei Dehnfugenabstand ≤ 15 m	
Betonstandard	„BS 1“ oder „BS 1 PLUS“	„BS 1 PLUS“	

Die oben angeführten Verfahren sind wesentlicher Gegenstand der vorliegenden Arbeit.

1.2 Vorgehensweise

Im ersten Teil der Arbeit (Kapitel 3) werden die in Abs. 1.1 genannten Bemessungsmodelle näher erläutert und Hintergründe aufgezeigt, welche aus der Richtlinie und dem Merkblatt zum Teil nicht ersichtlich sind.

Der zweite Teil (Kapitel 4 bis Kapitel 6) dient der Untersuchung der Praxistauglichkeit der Bemessungsmodelle. Dazu wird ein Untersuchungsbeispiel mit festgelegten Randbedingungen (Kapitel 2) mit allen drei in [14] zur Verfügung stehenden Verfahren bemessen. Augenmerk wird insbesondere auf die Zeitintensität und die für die Anwendung erforderliche fachliche Qualifikation der Verfahren gelegt. Zudem soll der Praxistest aber auch eine Gegenüberstellung der mit den Verfahren erzielten Ergebnisse ermöglichen, wodurch die Wirtschaftlichkeit der Bemessungsmodelle beurteilbar wird.

Der dritte Teil (Kapitel 7 und Kapitel 8) behandelt den Aspekt Dehnfugenabstand. Dehnfugen sind aufwändig in der Herstellung und schadensanfällig im Nutzungszeitraum. Deshalb steht heute zunehmend die monolithische Bauweise im Fokus. Die Untersuchung beläuft sich auf eine Variation des Dehnfugenabstands. Im ersten Schritt wird der im zweiten Teil der Arbeit gewählte Dehnfugenabstand verdoppelt und mittels numerischer Simulation (Gründe für die Wahl des Bemessungsverfahrens und dessen Einordnung siehe Tab. 1.1) die Bemessung vorgenommen. Im zweiten Schritt erfolgt eine Bemessung des in Kapitel 2 beschriebenen Untersuchungsbeispiels ohne Dehnfugen, wobei dafür das BAWMerkblatt Zwang herangezogen wird. Der Grund dafür liegt darin, dass mit den in Tab. 1.1 angeführten Bemessungsmodellen für den konkreten Fall die Sicherstellung der Gebrauchstauglichkeit „bei überwiegender Zwangbeanspruchung“ nicht möglich ist.

Eine detaillierte Übersicht über die angewendeten Bemessungsverfahren bei der Variation des Dehnfugenabstands ist in Tab. 1.2 ersichtlich.

Tab. 1.2: Übersicht über die angewendeten Bemessungsverfahren bei der Variation des Dehnfugenabstands

Dehnfugenabstand	Bemessungsverfahren		
	Bemessungsdiagramme	Analytische Bemessung	Numerische Simulation
15 m	✓	✓	✓
30 m	✓	nicht zulässig gemäß [13], da keine Regelung für späten Zwang	✓ mit Nachweis später Zwang
∞	nicht zulässig gemäß [7, S. 12], da keine Regelung für späten Zwang	nicht zulässig gemäß [13], da keine Regelung für späten Zwang	Nachweis gemäß BAWMerkblatt Zwang (wird in [14] nicht behandelt)

Die erste Zeile der Tab. 1.2 repräsentiert den zweiten Teil der Arbeit. Die restlichen Einträge entsprechen dem dritten Teil.

Die nachfolgende Abbildung beschreibt den Zusammenhang der in dieser Arbeit verwendeten Bemessungsverfahren. Der rote Bereich betrifft das Bemessungsmodell „Weiße Wanne klassisch“ mit dem Ziel der Rissbreitenbegrenzung. Die grünen Bereiche (zusammengefasst im grauen Bereich) repräsentieren beide Verfahren des neu eingeführten Bemessungsmodells „Weiße Wanne optimiert“ mit der Bemessungsphilosophie „Rissvermeidung“. Der um die gelben Bereiche erweiterte graue Bereich beinhaltet die Bemessungsphilosophie der Rissbreitenbegrenzung, die allerdings im Unterschied zur herkömmlichen Methode auf Basis der Risskraft über einen Nachweis der Verformungskompatibilität erbracht wird. In diesem gelben Bereich wäre auch das Bemessungsverfahren „BAWMerckblatt Zwang“ angesiedelt.

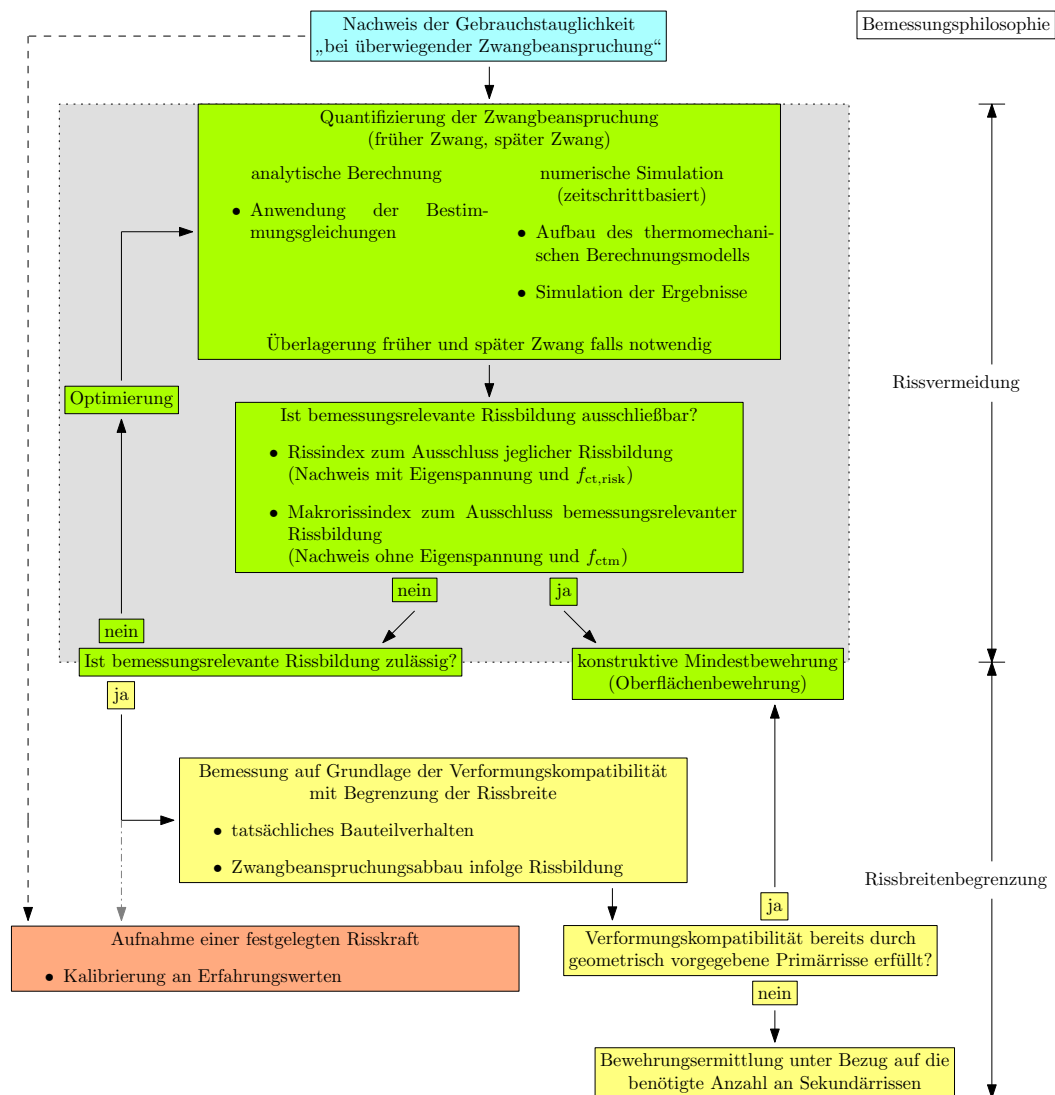


Abb. 1.1: Zusammenhang der angewendeten Bemessungsverfahren

Diese Abbildung zeigt die generelle Vorgehensweise in ihrer Gesamtheit. In der weiteren Arbeit wird diese Abbildung bei den entsprechenden Verfahren wieder aufgegriffen und hinsichtlich der relevanten Bereiche modifiziert.

1.3 Ziel

Diese Arbeit soll die praktische Anwendung der Bemessungsmodelle „Weiße Wanne klassisch“ und „Weiße Wanne optimiert“ der öbv-Richtlinie „Wasserundurchlässige Betonbauwerke - Weiße Wannen“ [14] aufzeigen. Damit soll zunächst ein grundlegender Überblick über die einzelnen in [14, S. 13 - 17] angeführten Bemessungsverfahren gegeben werden. Dies gelingt insbesondere durch die Behandlung eines Untersuchungsbeispiels mit festgelegten Randbedingungen.

Zudem sollen die einzelnen Verfahren hinterfragt und Vereinfachungen und Annahmen im Bemessungsvorgang, die aus der Richtlinie bzw. dem Merkblatt nicht direkt ersichtlich sind, aufgezeigt werden.

Durch die Variation des Dehnfugenabstands soll der Einfluss desselben auf die Höhe der resultierenden Zwangbeanspruchungen im Erhärtings- und Nutzungszeitraum untersucht werden. In diesem Zusammenhang können die Anwendungsgrenzen der Bemessungsverfahren aufgezeigt werden. In der Richtlinie nicht vorgesehene Ausführungsvarianten sind nicht auszuschließen.

Dem Leser dieser Arbeit soll eine Hilfestellung für die Auswahl eines für ihn geeigneten Bemessungsverfahrens zur Errichtung einer weißen Wanne geboten werden.

2 Untersuchungsbeispiel

Die Trasse einer geplanten Schnellstraße sieht abschnittsweise Unterführungen vor. Die einzelnen Unterführungen sollen durch die Aneinanderreihung von Wannenelementen gebildet werden. Es soll auf zusätzliche Abdichtungsschichten verzichtet werden und die Weiße-Wannen-Bauweise zur Anwendung kommen. Jeder Block weist dieselben geometrischen Abmessungen auf, wobei die Längsabmessung (Bodenplattenlänge und Wandlänge) dem Dehnfugenabstand entspricht. Der Regelblock soll im Nachfolgenden untersucht werden.

2.1 Geometrie

Die geometrischen Verhältnisse und die Symbole für die Geometrieigenschaften sind aus Abb. 2.1 ersichtlich. Die zugehörigen Werte mit Einheit werden in Tab. 2.1 angeführt.

Die Abbildung zeigt zwei Teilhälften. Die linke Teilhälfte repräsentiert die Analyse der Stahlbetonkonstruktion im Erhärtszeitraum, die rechte im Nutzungszeitraum. Im Erhärtszeitraum variieren die Temperaturen im Bauteilinneren und die mechanischen Eigenschaften infolge des Erhärtsprozesses. Im Nutzungszeitraum variieren die Temperaturen im Bauteilinneren, während die mechanischen Eigenschaften im betrachteten Zeitabschnitt nahezu konstant bleiben. Die Temperaturänderung wird dabei durch die Interaktion des Bauteils mit der Umgebungstemperatur hervorgerufen. Es wird davon ausgegangen, dass die Stahlbetonkonstruktion nach dem Erhärtszeitraum hinterfüllt wird.

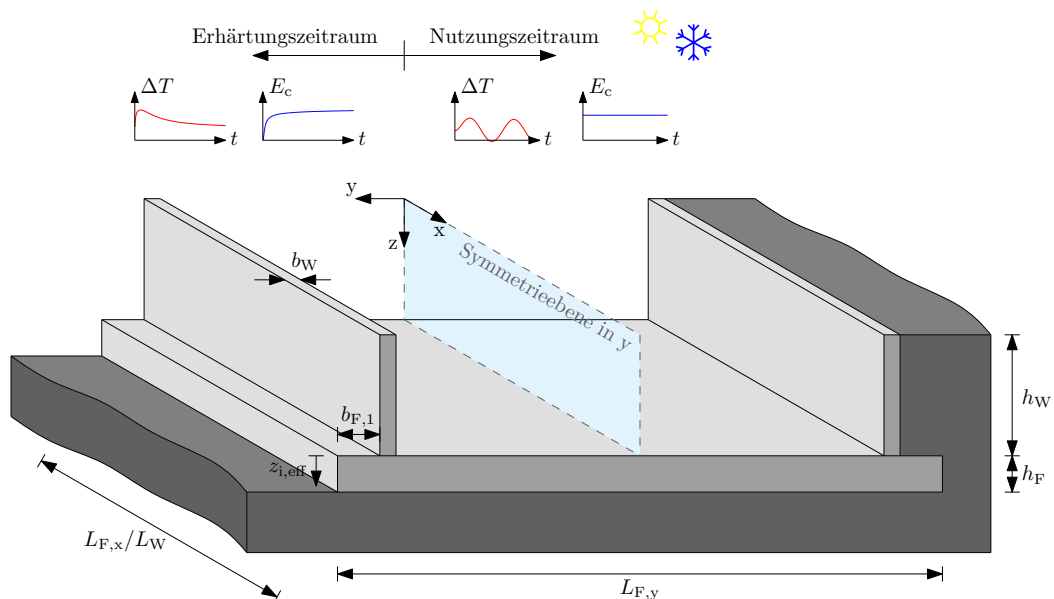


Abb. 2.1: Untersuchungsbeispiel

Tab. 2.1: Geometriekenngrößen

Größenname	Symbol	Wert	Einheit
Bodenplattenlänge (Dehnfugenabstand)	$L_{F,x}$	15,00	[m]
		30,00	[m]
		∞	[m]
Bodenplattenbreite	$L_{F,y}$	30,00	[m]
Bodenplattenhöhe	h_F	1,80	[m]
seitlicher Bodenplattenüberstand	$b_{F,1}$	2,10	[m]
Wandlänge (Dehnfugenabstand)	L_W	15,00	[m]
		30,00	[m]
		∞	[m]
Wandbreite	b_W	0,80	[m]
Wandhöhe	h_W	6,00	[m]

Auf die Anordnung einer Trennschicht unter der Bodenplatte (wird in [14, S. 60] empfohlen) wird verzichtet, auch wenn dieselbe zu einer Reduzierung der Zwangbeanspruchung führen würde. Die erhöhten Zwangsschnittgrößen werden in der Bemessung dementsprechend berücksichtigt.

2.2 Verwendete Materialien und übliche Kenngrößen

Entsprechend den statischen Erfordernissen wird der Beton mit der Betonfestigkeitsklasse C25/30(56) gewählt. Es wird versucht, die Festigkeitsklasse möglichst niedrig zu halten, da bei hohen Festigkeiten wichtige weitere Betoneigenschaften, z.B. Wärmeentwicklung und Schwinden, für die Zwangbemessung verschlechtert werden. Der Betonstahl soll der in Österreich üblichen Güte BSt 550 entsprechen. Die Betondeckung wird mit 4,00 cm festgelegt.

Tab. 2.2: Materialkenngrößen

Größenname	Symbol	Wert	Einheit
Beton C25/30(56)			
Druckfestigkeit	f_{ck}	25,00	[N/mm ²]
Wichte	γ_c	25,00	[kN/m ³]
Betonstahl BSt 550			
Streckgrenze	f_{yk}	550,00	[N/mm ²]
Elastizitätsmodul	E_s	200,00	[kN/mm ²]
Betondeckung	c_{nom}	4,00	[cm]

2.3 Erweiterte Materialkenngrößen für die Anwendung der öbv-Richtlinie WW

Für die Anwendbarkeit des neu eingeführten Bemessungsmodells „Weiße Wanne optimiert“ sind eine Vielzahl an weiteren Materialkenngrößen erforderlich. Dies betrifft sowohl die analytische Bemessung als auch die numerische Simulation. Die erweiterten Materialkenngrößen sind in Tab. 2.3 enthalten.

Die Verwendung des Betonstandards „BS 1 PLUS“ ist gemäß [14, S. 13] (siehe Tab. 1.1) allgemeine Voraussetzung für das neue Bemessungsmodell. Dieser Betonstandard zeigt durch den höheren Anteil an hydraulisch wirksamen Zusatzstoffen im Gesamtbindemittel einen geringeren Anstieg der Betontemperatur während des Erhärtungsprozesses auf. Damit wird es möglich, den Entwurfsgrundsatz der Rissvermeidung zu erreichen. Die Wanne soll mit der für Verkehrsbauwerke mit Taumittleinwirkung geeigneten Regelbetonsorte **BS 1 C PLUS/Typ 5** errichtet werden.

Tab. 2.3: Erweiterte Materialkenngrößen

Größenname	Symbol	Wert	Einheit
Wärmeausdehnungskoeffizient	α_T	$8,00 \cdot 10^{-6}$	[°C ⁻¹]
Querdehnzahl	ν	0,20	[-]
Bindemittelmenge	m_{BM}	330,00	[kg/m ³]
maximale Hydratationswärme	Q_{max}	255,00	[kJ/kg]
Elastizitätsmodul	E_{cm}	26,50	[kN/mm ²]
Zugfestigkeit	f_{ctm}	3,05	[N/mm ²]
Wärmeleitfähigkeit Frischbeton	λ_c	2,22	[W/mK]
Wärmespeicherkapazität Frischbeton	S_c	2400,00	[kJ/m ³ K]
Wärmeleitfähigkeit Beton	λ_c	2,22	[W/mK]
Wärmespeicherkapazität Beton	S_c	2400,00	[kJ/m ³ K]
horizontale Bodensteifigkeit	$E_{B,h}$	100,00	[N/mm ²]
vertikale Bodensteifigkeit	$E_{B,v}$	1000,00	[N/mm ²]
Wärmeleitfähigkeit Boden	λ_B	1,66	[W/mK]
Wärmespeicherkapazität Boden	S_B	1600,00	[kJ/m ³ K]

Abb. 2.2 bis Abb. 2.4 zeigen die von einem Experten für Betontechnik ermittelten Messwerte zur Wärmeentwicklung, Entwicklung des Elastizitätsmoduls und Entwicklung der Zugfestigkeit des gewählten Betons infolge Betonerhärtung. Diese dienen in weiterer Folge als Eingangsgrößen in der Bemessung und zur Kalibrierung der Materialmodelle.

Die Messwerte in Abb. 2.2 sind Ergebnisse des Langavantversuchs gemäß ONR 23303. Dabei handelt es sich um ein Verfahren zur Messung der freigesetzten Hydratationswärme von Bindemitteln mit Hilfe der teiladiabatischen Kalorimetrie, vgl. [9, S. 154]. Die mechanischen Eigenschaften (Abb. 2.3 und Abb. 2.4) wurden nach 3, 7, 14 und 28 Tagen geprüft. ANHANG 3 der Richtlinie schreibt die Versuchsergebnisse zu diesen Zeitpunkten als Grundlage für die Kalibrierung der Materialmodelle für die numerische Simulation vor.

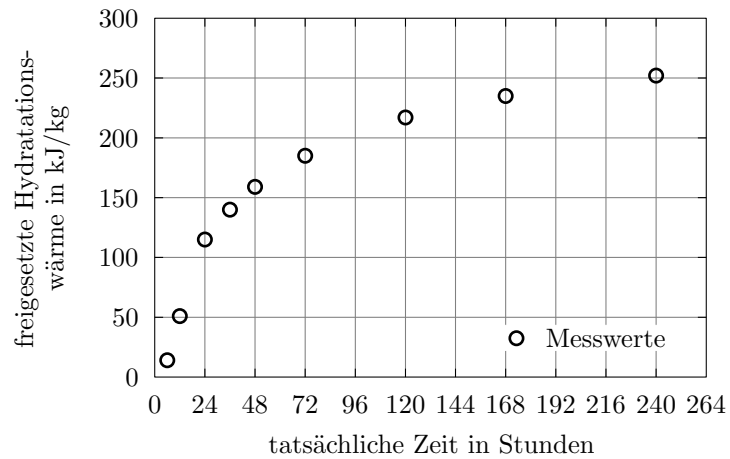


Abb. 2.2: Messwerte zur Wärmeentwicklung des Betons infolge Betonerhärtung

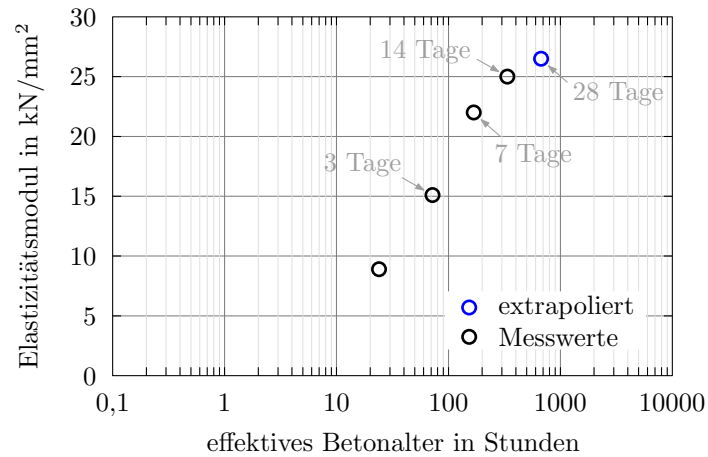


Abb. 2.3: Messwerte zur Entwicklung des Elastizitätsmoduls des Betons infolge Betonerhärtung

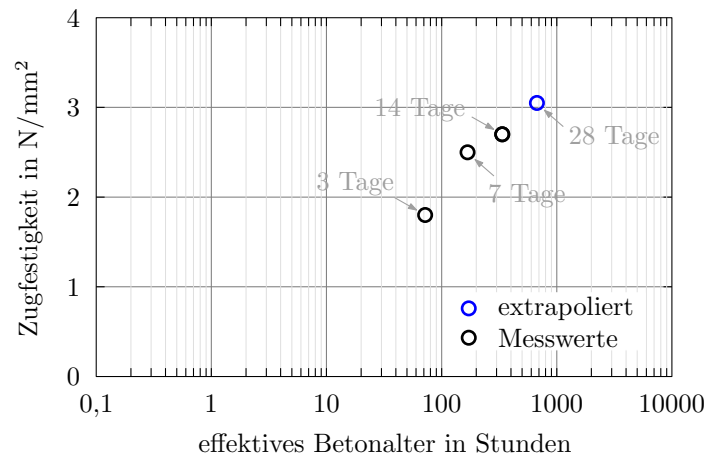


Abb. 2.4: Messwerte zur Entwicklung der Zugfestigkeit des Betons infolge Betonerhärtung

2.4 Klimatische Randbedingungen

Die klimatischen Randbedingungen haben bedeutenden Einfluss auf die Temperaturentwicklung im Bauteil. Dies gilt sowohl im Erhärungszeitraum als auch im Nutzungszeitraum. Im letzteren Fall werden die Temperaturänderungen ausschließlich durch die klimatischen Einwirkungen verursacht.

Die Zwangsbeanspruchung im Bauteil resultiert aus behinderten Verformungseinwirkungen. Zu den Verformungseinwirkungen zählen bei Betonbauteilen neben den Schwindverkürzungen vor allem Temperaturdehnungen, welche aus dem exothermen Erhärungsprozess oder aus den klimatischen Einwirkungen entstehen, vgl. [11, S. 1]. Im Erhärungszeitraum wird von frühem Zwang und im Nutzungszeitraum von spätem Zwang gesprochen.

Bei den klimatischen Randbedingungen handelt es sich demnach um wesentliche Einflussgrößen auf die Höhe der resultierenden Zwangsbeanspruchung.

Die Zwangsschnittgrößen sind die Bemessungsgrundlage für das Bemessungsmodell „Weiße Wanne optimiert“. Um diese mit ausreichender Genauigkeit ermitteln zu können, wird die Umgebungstemperaturentwicklung in der Berechnung berücksichtigt. Die Einflüsse der Sonneneinstrahlung und der Windgeschwindigkeit werden indirekt erfasst.

Erhärungszeitraum

Die Umgebungstemperaturentwicklung im Erhärungszeitraum ist wesentlich durch die Tag-Nacht-Schwankung geprägt, die in der weiteren Betrachtung als sinusförmig verteilt angenommen wird. Grund dafür ist der verhältnismäßig kurze Zeitraum, in dem der Erhärungsprozess stattfindet. Die höchsten Beanspruchungen im Bauteil entstehen bei extremen sommerlichen Temperaturverhältnissen. Es wird also sowohl bei der Untersuchung der Bodenplatte als auch der Wand von einem Extremsommer ausgegangen. Die ungünstigste Bemessungssituation ergibt sich unter der zusätzlichen Annahme, dass die mittlere Tagestemperatur im Erhärungszeitraum abnimmt.

$$T_a(t) = T_{a,m}(t) + \Delta T_{a,var} \cdot \sin\left(\frac{2\pi \cdot (t + \Delta t)}{24}\right) \quad (2.1)$$

- $T_a(t)$ Umgebungstemperatur zu einem bestimmten Zeitpunkt
- $T_{a,m}(t)$ mittlere Umgebungstemperatur zu einem bestimmten Zeitpunkt
- $\Delta T_{a,var}$ Amplitude der Tagestemperaturschwankung
- t tatsächliche Zeit nach Betoneinbau in Stunden
- Δt Verschiebung Tagesgang in Stunden (siehe Abb. 2.5)
23 Stunden, falls Betoneinbauzeitpunkt um 09:00 Uhr

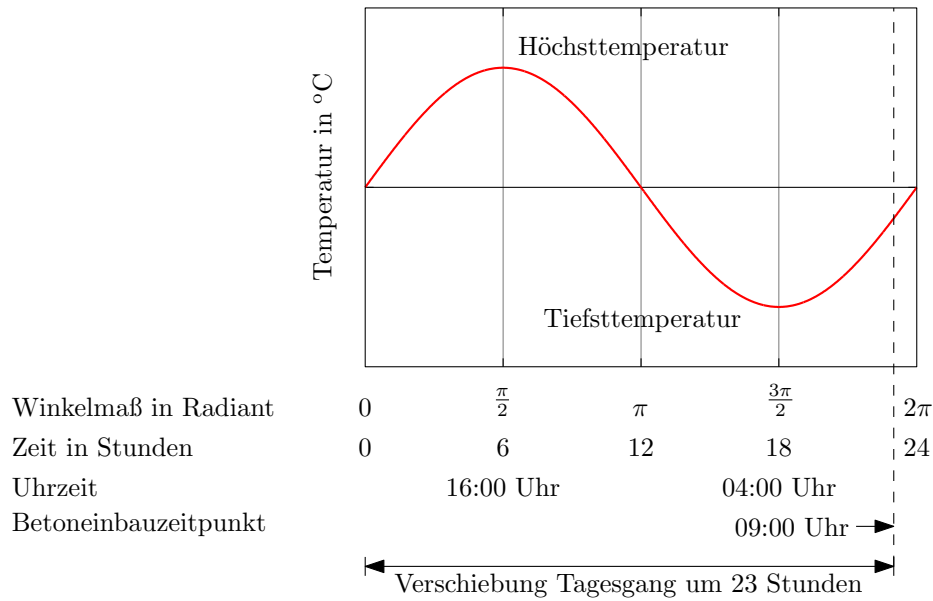


Abb. 2.5: Verschiebung Tagesgang aufgrund Betoneinbauzeitpunkt

Es wird angenommen, dass im Erhärungszeitraum der Bodenplatte die mittlere Tagestemperatur unmittelbar nach dem Betoneinbauzeitpunkt innerhalb von 120 h von 25 °C auf 20 °C abnimmt. Die Zeitspanne, in der das Temperaturgefälle stattfinden soll, ergibt sich unter Berücksichtigung der Temperaturentwicklung an der Plattenunterseite. Die höchsten Zwangbeanspruchungen treten dann auf, wenn die Bodenplatte zunächst möglichst hohe Temperaturen entwickelt, und anschließend zum Zeitpunkt der höchsten Temperatur an der Plattenunterseite die niedrigste Temperatur an der Plattenoberseite vorherrscht. Dabei ergibt sich die stärkste Verkrümmung und folglich die höchste Eigengewichtsaktivierung.

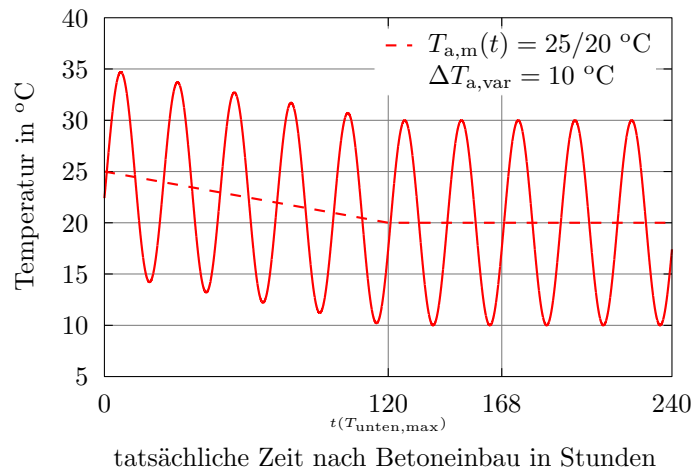


Abb. 2.6: Umgebungstemperaturentwicklung im Erhärungszeitraum der Bodenplatte - Extrem-sommer

Es wird angenommen, dass im Erhärungszeitraum der Wand die mittlere Tagestemperatur 48 h nach dem Betoneinbauzeitpunkt innerhalb von 120 h von 25 °C auf 20 °C abnimmt. Die Zeitspanne, in der das Temperaturgefälle stattfinden soll, ergibt sich unter Berücksichtigung der Temperaturentwicklung in der Wand. Die höchsten Zwangbeanspruchungen treten dann auf, wenn die Wand zunächst möglichst hohe Temperaturen entwickelt und anschließend

zum Zeitpunkt, an dem die Ausgleichstemperatur im Bauteil erreicht wird, die niedrigste Umgebungstemperatur vorherrscht. Dabei ergibt sich die höchste Verformungseinwirkung und der Zwangabbau zufolge Viskoelastizität wird möglichst gering gehalten.

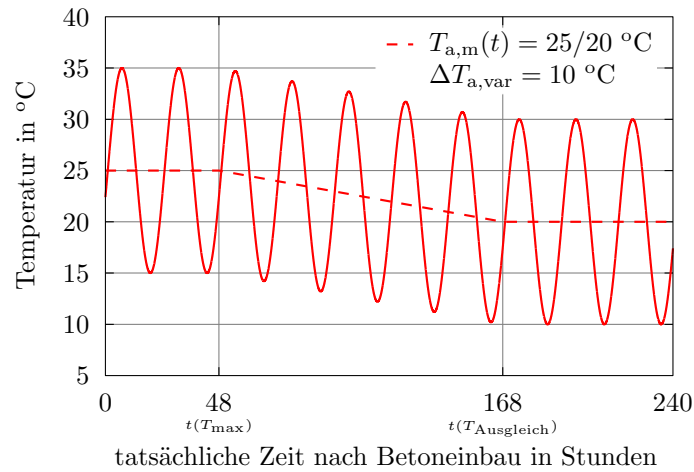


Abb. 2.7: Umgebungstemperaturentwicklung im Erhärungszeitraum der Wand - Extremsommer

Bei der analytischen Bemessung im Kapitel 5 wird der Temperaturunterschied zwischen der Frischbetontemperatur und der mittleren Tagestemperatur (relevant für die Bodenplatte) bzw. der mittleren Temperatur des behindernden Bauteils (relevant für die Wand) pauschal durch ein Vorhaltemaß ΔT_{nom} von 5 °C berücksichtigt. Dieser Wert entspricht auch dem in [13, S. 6] empfohlenen Wert. Die Amplitude der Tagestemperaturschwankung $\Delta T_{\text{a,var}}$ beträgt gemäß Abb. 2.6 und Abb. 2.7 10 °C und erfüllt somit das in [13, S. 6] genannte Kriterium $\Delta T_{\text{a,var}} \geq 10$ °C.

Nutzungszeitraum

Für die Analyse der Stahlbetonkonstruktion im Nutzungszeitraum muss ein längerer Zeitabschnitt betrachtet werden. Dadurch wird es erforderlich, den Jahresgang der Umgebungstemperatur neben dem Tagesgang zwingend mit zu berücksichtigen.

$$T_a(t) = T_{a,m}(t) + \Delta T_{a,var,a} \cdot \sin\left(\frac{2\pi \cdot t}{8064}\right) + \Delta T_{a,var,d} \cdot \sin\left(\frac{2\pi \cdot (t + \Delta t)}{24}\right) \quad (2.2)$$

- $T_a(t)$ Umgebungstemperatur zu einem bestimmten Zeitpunkt
- $T_{a,m}(t)$ mittlere Umgebungstemperatur zu einem bestimmten Zeitpunkt
- $\Delta T_{a,var,a}$ Amplitude der Jahrestemperaturschwankung
- $\Delta T_{a,var,d}$ Amplitude der Tagestemperaturschwankung
- t tatsächliche Zeit in Stunden
- Δt Verschiebung Tagesgang in Stunden
12 Stunden bei Extremfall Sommer
0 Stunden bei Extremfall Winter

Abb. 2.8 zeigt zwei volle Jahresgänge mit abschnittsweise überlagerten Tagesgängen (Tagesgang Sommer und Tagesgang Winter). Die zwei markierten Zeitabschnitte repräsentieren Extremfälle klimatischer Einwirkung.

Untersucht wird das Verhalten der Wanne unter drei verschiedenen Umgebungstemperaturentwicklungen im Nutzungszeitraum:

- Jahresgang ohne Tagesgang
Betrachtet werden zwei volle Jahresgänge der Umgebungstemperatur. Der Tagesgang wird vernachlässigt.
- Extremfall Sommer
Betrachtet wird das erste Viertel des Jahresgangs (Zeitraum Frühling, Sommer). Der Tagesgang bei extremen sommerlichen Temperaturverhältnissen wird überlagert.
- Extremfall Winter
Betrachtet wird das dritte Viertel des Jahresgangs (Zeitraum Herbst, Winter). Der Tagesgang bei extremen winterlichen Temperaturverhältnissen wird überlagert.

Berücksichtigt werden jeweils drei volle Tagesgänge. Diese werden zeitlich so überlagert, dass die höchsten Zwangbeanspruchungen im Bauwerk auftreten.

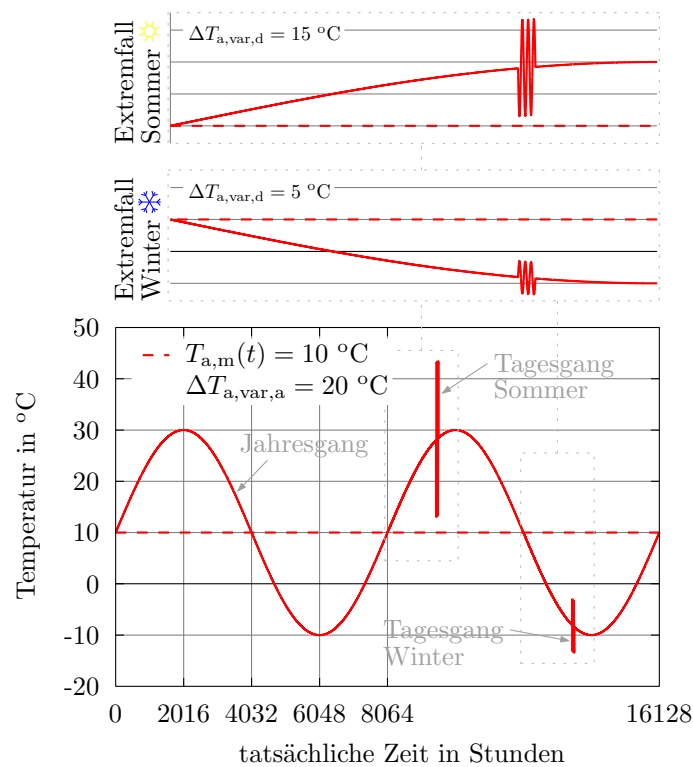


Abb. 2.8: Umgebungstemperaturentwicklung im Nutzungszeitraum

2.5 Weitere thermische Kenngrößen

Die in Tab. 2.4 angeführten thermischen Kenngrößen werden vorwiegend für die numerische Simulation benötigt.

Für die Frischbetontemperatur wird die maximal zulässige Temperatur für das Bemessungsmodell „Weiße Wanne optimiert“ gewählt. Gemäß [14, S. 66] ist für den gewählten Betonstandard eine Ausschfrist von mindestens 36 h einzuhalten. Zudem müssen die Ausschfrist und die Nachbehandlungsdauer so gewählt werden, dass der Beton nach dem Einbau mindestens 3 Tage vor rascher Abkühlung und 7 Tage vor starkem Austrocknen geschützt ist. Die gewählte Ausschfrist und Nachbehandlungsdauer ist in Tab. 2.4 angeführt.

Tab. 2.4: Thermische Kenngrößen

Größenname	Symbol	Wert	Einheit
Frischbetontemperatur	T_c	22,00	[°C]
Simulation Erhärtungszeitraum			
Bodentemperatur zum Betoneinbauzeitpunkt	$T_{B,E}$	20,00	[°C]
Bauteiltemperatur zum Betoneinbauzeitpunkt	$T_{BT,E}$	20,00	[°C]
Simulation Nutzungszeitraum			
Bodentemperatur zu Simulationsbeginn	$T_{B,N}$	10,00	[°C]
Bauteiltemperatur zu Simulationsbeginn	$T_{BT,N}$	10,00	[°C]
Ausschfrist	t_A	72,00	[h]
Nachbehandlungsdauer	t_{NB}	168,00	[h]
Wärmeübergangskoeffizient Schalung	α_S	4,20	[W/m ² K]
Wärmeübergangskoeffizient Folienabdeckung	α_F	20,00	[W/m ² K]
Wärmeübergangskoeffizient Luft	α_L	30,00	[W/m ² K]

2.6 Bemessungskriterien gemäß öbv-Richtlinie WW

2.6.1 Anforderungsklasse

Die Anforderungsklasse ist im Vorfeld mit dem Auftraggeber festzulegen. Die Wahl erfolgt unter Berücksichtigung der vorgesehenen Nutzung des geplanten Bauwerks. In der vorliegenden Arbeit wird für das geplante Verkehrsbauwerk die Klasse A₁ gewählt. Damit sind die Anforderungen an die Wasserundurchlässigkeit der Wanne weitestgehend bekannt. Tab. 2.5 gibt diese wieder.

Tab. 2.5: Anforderungsklasse A₁ gemäß [14, S. 6]

Anforderungsklasse	Kurzbezeichnung	Beschreibung der Betonoberfläche	Beurteilung der Feuchtigkeitsstellen
A ₁	weitgehend trocken	visuell einzelne feststellbare Feuchtigkeitsstellen (max. matte Dunkelfärbung)	Nach Berühren mit der trockenen Hand (flächenhaft) sind an der Hand keine Wasserspuren zu erkennen.
Zulässige Fehlstellen an der Betonoberfläche	Zusatzmaßnahmen	Anwendungsbeispiele	Bauweisen
1 ‰ der Bauteiloberfläche als Feuchtigkeitsstellen zulässig. Wasserfahnen, die nach maximal 20 cm abtrocknen.	Es ist eine bauphysikalische Untersuchung erforderlich, derzufolge eine Konditionierung/Klimatisierung des Raumes erforderlich sein kann (z.B. bei langem Aufenthalt von Menschen).	Verkehrsbauwerke mit hohen Anforderungen, Aufenthaltsräume, Lager, Hauskeller (Einlagerungsräume), Haustechnikräume mit besonderen Anforderungen	„Weiße Wanne“ gemäß [14] oder Dichte Schlitzwände gemäß öbv-Richtlinie

2.6.2 Konstruktionsklasse

Der Bemessungswasserstand beträgt im gewählten Beispiel laut Pegelmessungen 7,80 m. Abb. 2.9 zeigt die Vorgehensweise gemäß [14, S. 7] zur Wahl der Konstruktionsklasse. Es wird die Konstruktionsklasse Kon_1 gefordert.

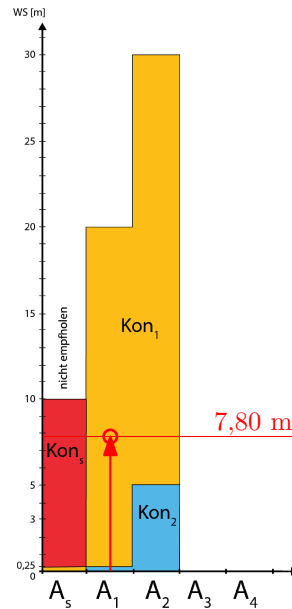


Abb. 2.9: Zusammenhang zwischen Anforderungskategorie, Wassersäule WS (Bemessungswasserstand) und Konstruktionsklasse gemäß [14, S. 7]

Tab. 2.6 beinhaltet Kriterien für die Konstruktion und Bemessung, welche für die Konstruktionsklasse Kon₁ einzuhalten sind.

Tab. 2.6: Konstruktionsklasse Kon₁: Kriterien für die Konstruktion und Bemessung gemäß [14, S. 8]

Konstruktionsklasse Kon₁	
Mindest-Bauteildicke abhängig vom Wasserdruck (ohne Berücksichtigung der statischen, herstellungstechnischen und konstruktiven Erfordernisse)	
Wasserdruckhöhe 5 - 10 m	≥ 0,35 m
Maximal zulässige Frischbetontemperatur für den Betonstandard BS 1 PLUS abhängig vom Bemessungsmodell	
„Weiße Wanne klassisch“	25 °C
„Weiße Wanne optimiert“	22 °C
Maximal zulässige Bauteiltemperatur	
Allgemein	45 °C
Bodenplatte mit Gleitschicht	50 °C
Nachweis der Gebrauchstauglichkeit bei überwiegender Lastbeanspruchung	
Rissbreitenbegrenzung auf	≤ 0,20 mm
Nachweis der Gebrauchstauglichkeit bei Zwang aus abfließender Hydratationswärme abhängig vom Bemessungsmodell	
„Weiße Wanne klassisch“	Bemessungsdiagramme für Rissbreitenbegrenzung auf ≤ 0,20 mm
„Weiße Wanne optimiert“	Analytische Bemessung oder Numerische Simulation
Sonstige konstruktive Erfordernisse	
Empfohlene Abstände der Dehnfugen: 15 bis 30 m (Bei besonderen Maßnahmen, z.B. gemeinsames Betonieren von Bodenplatte und Wänden, können auch größere Bauteillängen ausgeführt werden.) Bei Ausführung als Verbundsystem (enge Verzahnung mit einer Außenwand) Dehnfugenabstand ≤ 40 m. Höhensprünge angerampt, Neigung ca. 30° Bei Anwendung des Bemessungsmodells „Weiße Wanne optimiert“ werden zusätzlich für Wände unabhängig von der Konstruktionsklasse Betonierabschnittslängen ≤ 15 m empfohlen. Die Bewehrung ist so zu konstruieren und anzuordnen, dass eventuell auftretende Risse möglichst fein verteilt werden (Mindestanforderung quadratisches Netz a = 15 cm).	

2.6.3 Zulässige Rissbreite

Für Bauwerke der Konstruktionsklasse Kon₁ sind laut Tab. 2.6 die Rissbreiten bei Lastbeanspruchung und/oder Zwangbeanspruchung auf $w_k = 0,20$ mm zu begrenzen.

3 Bemessung gemäß öbv-Richtlinie WW

3.1 Allgemeines

3.1.1 Behandlung der Zwangbeanspruchung

Die Zwangbeanspruchung wird bei den in [14] enthaltenen Bemessungsverfahren in unterschiedlicher Art und Weise ermittelt bzw. berücksichtigt.

Das Bemessungsverfahren „Bemessungsdiagramme“ sieht keine explizite Quantifizierung der zu erwartenden Zwangbeanspruchung vor. Die Bemessung erfolgt in allen Fällen auf Grundlage der Risschnittgröße des jeweiligen Betonquerschnitts. Bei der Anwendung des Bemessungsverfahrens „Analytische Bemessung“ wird die erhärtungsbedingte, eigenspannungsfreie Zwangbeanspruchung mittels der in [13] bereitgestellten Bestimmungsgleichungen quantifiziert. Dabei wird das bauteiltypische Verhalten und die tatsächliche Behinderungssituation berücksichtigt. Die Eigenspannungen im Betonquerschnitt werden bei diesem Verfahren gemäß [11] nicht betrachtet, da diese zur Beurteilung der Makrorissgefahr und somit auch für die Dichtigkeit der Wanne vernachlässigbar sind. Beim Bemessungsverfahren „Numerische Simulation“ erfolgt die Quantifizierung der Zwangbeanspruchung mit Hilfe von thermomechanischen Berechnungsmodellen. Ermittelt wird die Spannungsentwicklung im Zeitverlauf mit und ohne Eigenspannungen. Dadurch ist neben der Beurteilung der Makrorissgefahr durch den Makrorissindex auch die Beurteilung der Gefahr vor lokaler Rissbildung durch den allgemeinen Rissindex möglich.

Bei allen drei Bemessungsverfahren bildet die um den nichtlinearen Anteil bereinigte Spannungsverteilung im Betonquerschnitt (siehe Abb. 3.1 rechts) die Grundlage für die Bemessung. Die Dichtigkeit der Wanne wird, wie bereits erwähnt, durch Makrorisse beeinträchtigt. Diese bilden sich bei einem Spannungsniveau, bei dem lokale Rissbildung bereits stattgefunden haben muss. Da Eigenspannungen immer eine Gleichgewichtsgruppe bilden, kann davon ausgegangen werden, dass sich diese bei lokaler Rissbildung bereits vollständig abgebaut haben.

Die nachfolgende Abbildung verdeutlicht die Bedeutung der Bereinigung der Spannungsverteilung zur Beurteilung der Makrorissgefahr. Bei Mitberücksichtigung der Eigenspannungen könnte hier die tatsächliche Gefahr einer Makrorissbildung unterschätzt werden.

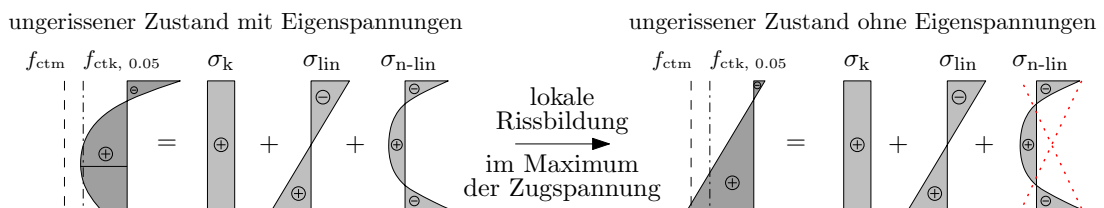


Abb. 3.1: Einfluss der Eigenspannungen auf die Bewertung der Rissgefahr gemäß [11]

Kann die Bildung von Makrorissen ausgeschlossen werden, so ist eine konstruktive Oberflächenbewehrung ausreichend. Diese dient zur Begrenzung der Rissbreite infolge der Eigenspannungen und zur Sicherstellung einer robusten Randzone. Die Oberflächenbewehrung muss in der Lage sein, die maximale Zugkeilkraft aus den Eigenspannungen aufzunehmen, ohne dabei zu fließen. Entsprechend kann der in der Bestimmungsgleichung auftretende Faktor von 0,07 erklärt werden: Der Faktor ergibt sich aus dem Produkt von 0,2 (ca. 20 % der Querschnittsfläche; wird immer vom Zugeigenspannungskeil eingenommen), 0,5 (Fläche des Keils wird dreiecksförmig angenähert) und 0,7 (Umrechnung der mittleren Zugfestigkeit auf die 5 %-Fraktile der Zugfestigkeit). Die Bestimmungsgleichung ist in den nachfolgenden Berechnungen zu finden.

3.1.2 Überlagerung Last und Zwang

Im Zuge der Nachweisführung der Gebrauchstauglichkeit ist gemäß [7, S. 37] die Rissbreite für den größeren Wert der Spannung aus Zwang- oder Lastbeanspruchung zu ermitteln, sofern die resultierende Zwangdehnung 0,8 ‰ nicht überschreitet.

Die Überlagerung von Last und Zwang ist aus diesem Grund in dieser Arbeit nicht notwendig. Die Nachweisführung kann für beide Beanspruchungsszenarien getrennt erfolgen. Die maßgebende Bewehrungsmenge entspricht dem maximal ermittelten Wert. So kann beispielsweise der Wasserdruck an der Bodenplattenunterseite die maßgebende Bewehrungsmenge an der Plattenoberseite trotz einwirkender Zwangbeanspruchung bestimmen.

Eine entsprechende Anmerkung ist ebenfalls in [14, S. 18] zu finden.

3.2 Bemessungsdiagramme Zwang („WW klassisch“)

3.2.1 Kurze Beschreibung der Bemessungsphilosophie „Risskraft“

Die derzeitig normativ in [8, S. 131 - 134] enthaltene Bemessungsregel zur Bestimmung der erforderlichen Mindestbewehrung für die Begrenzung der Rissbreite lautet folgendermaßen:

$$A_{s,\min} = k \cdot k_c \cdot f_{ct,\text{eff}} \cdot \frac{A_{ct}}{\sigma_{s,\text{zul}}} \quad (3.1)$$

- $A_{s,\min}$ Mindestquerschnittsfläche der Betonstahlbewehrung
- k Faktor zur Berücksichtigung der nichtlinear verteilten Betonzugspannungen (Eigenspannungen)
- k_c Faktor zur Berücksichtigung der Spannungsverteilung im Querschnitt vor Erstrissbildung sowie der Änderung des inneren Hebelarms
- $f_{ct,\text{eff}}$ mittlere Zugfestigkeit des Betons zum Zeitpunkt der Rissbildung
- A_{ct} Fläche der Betonzugzone im ungerissenen Zustand
- $\sigma_{s,\text{zul}}$ maximale Stahlspannung zur Einhaltung des Rissbreitenkriteriums

Grundlage der Bemessungsgleichung ist die durch vielseitige Forschungsaktivität gewonnene Erkenntnis, dass die Zwangsschnittgröße bei Verformungseinwirkungen bis ca. 0,8 ‰ dank der sukzessiven Rissbildung auf die Risschnittgröße begrenzt bleibt. Eine Verformungseinwirkung von 0,8 ‰ entspricht einer äquivalenten Temperatureinwirkung von ca. 80 °C und, da gewöhnliche Betonbauteile weder im Erhärungszeitraum noch im Nutzungszeitraum Verformungseinwirkungen dieser Größenordnung erfahren, wird die Mindestbewehrung für die Aufnahme der Risschnittgröße ausgelegt, vgl. [11, S. 3].

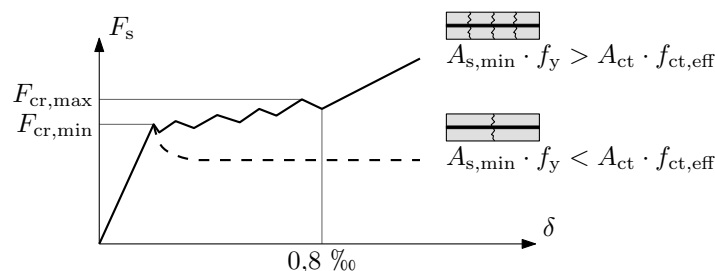


Abb. 3.2: Begrenzung der Zwangsschnittgröße auf die Risskraft durch sukzessive Rissbildung aus [11]

In der oben angeführten Gleichung basieren die Faktoren k_c und $\sigma_{s,\text{zul}}$ auf mechanischen Modellen. Die empirisch festgelegten Faktoren k und $f_{ct,\text{eff}}$ werden in Abs. 3.2.2 näher diskutiert.

Das hier beschriebene Bemessungsverfahren ist für zwangbeanspruchte, dünne Stahlbetonbauteile geeignet. Wird es auf dicke Bauteile übertragen, so ergeben sich unwirtschaftliche Bewehrungsmengen. Die praktische Erfahrung zeigt, dass bei dicken Bauteilen mit geringeren Bewehrungsmengen das angestrebte Ziel der Rissbreitenbegrenzung erreicht werden kann, vgl. [15, S. 222].

3.2.2 Vereinfachungen und Annahmen, die aus der Richtlinie nicht ersichtlich sind

Die Bemessungsdiagramme in [14] basieren auf folgenden Vereinfachungen und Annahmen:

- Unendlich langes Bauteil
Das tatsächliche bauteiltypische Verhalten wird vernachlässigt. Grundlage der Bemessung ist, wie bereits erwähnt, die Risschnittgröße des jeweiligen Betonquerschnitts. Diese Annahme liegt in den meisten Fällen deutlich auf der sicheren Seite.
- Keine Unterscheidung zwischen Primär- und Sekundärrissbildung
Bei dicken Bauteilen ist das Rissbild durch geometrisch vorgegebene Primärrisse und mögliche erzwungene Sekundärrisse charakterisiert, vgl. [1] und [11].
- Empirische Modifikation der mittleren Zugfestigkeit des Betons
In der Richtlinie wird ein Skalierungsfaktor von 0,3 zur Abschätzung der Zugfestigkeit zum Zeitpunkt der Rissbildung angenommen. Die Annahme beruht auf Erfahrungswerten. Da bei massigen Bauteilen, bei denen die Mindestbewehrung oft maßgebend ist, die Rissbildung erst relativ spät eintritt, ist die Zugfestigkeit zum Risszeitpunkt häufig deutlich höher.
- Beschränkung der erforderlichen Mindestbewehrung auf $\varnothing 14/10$ bzw. $\varnothing 16/10$
- Faktor zur Berücksichtigung der nichtlinear verteilten Betonzugspannungen k streng genommen nur für Erwärmungsphase gültig, vgl. [15]
Die Eigenspannungen wechseln ihr Vorzeichen sowohl im Rand- als auch im Kernbereich im Verlauf der Betonerhärtung. In der Phase der Temperaturzunahme im Kernbereich erhält der Randbereich eine Zugbeanspruchung und während der Phase des Temperatúrausgleichs eine Druckbeanspruchung. Dadurch sind folgende zwei Situationen möglich:
 - Die Randzugspannung während der Erwärmungsphase ist groß, so dass Oberflächenrisse auftreten. Diese führen zu einer Verkleinerung der Querschnittsfläche um ca. 40 %.
 - Die Randzone weist keine Risse auf und wird durch Behinderung der Abkühlung des Kernbereichs überdrückt, während der Kernbereich selbst auf Zug beansprucht wird. Die Zugspannung im Kernbereich ist bei allen Bauteildicken relativ gering, sodass eine Rissbildung infolge der Eigenspannung allein ausgeschlossen werden kann. Bei überwiegend zentrischer Zwangbeanspruchung kann der Einfluss der Eigenspannung auf die Risschnittgröße vereinfachend durch Integration des Zugkeils im Kernbereich berücksichtigt werden. Der Reduzierungsfaktor ergibt sich dabei zu ca. 0,8.

3.3 Analytische Bemessung Zwang („WW optimiert“ gemäß öbv-Merkblatt)

3.3.1 Allgemeine Beschreibung der Vorgehensweise

Die nachfolgende Abbildung beschreibt die allgemeine Vorgehensweise bei der Anwendung des Bemessungsverfahrens „Analytische Bemessung“.

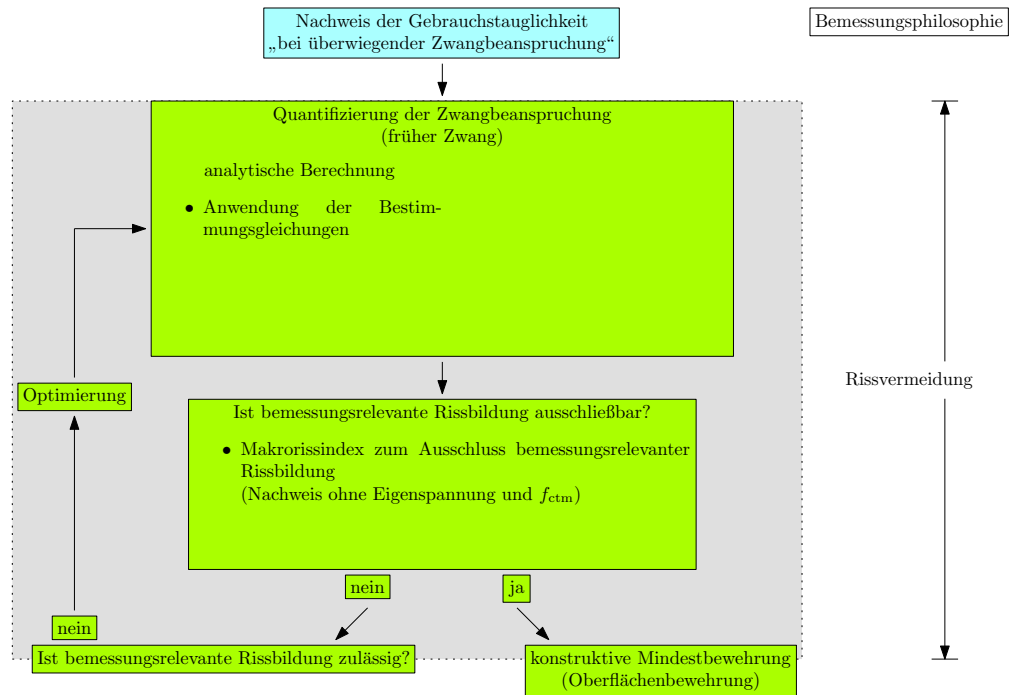


Abb. 3.3: Vorgehensweise „Analytische Bemessung“

3.3.2 Vereinfachungen, die aus dem Merkblatt nicht ersichtlich sind

Die Ausführungen in [13] unterliegen unter anderem folgenden Vereinfachungen:

- Bestimmungsgleichungen wurden aus einer umfangreichen Parameterstudie mit festgelegten Randbedingungen abgeleitet
- Vereinfachte Berücksichtigung des Einflusses der klimatischen Randbedingungen und der Frischbetontemperatur durch ein Vorhaltemaß
- Zurückführung des dreidimensionalen Problems auf vereinfachte, eindimensionale statische Systeme
- Vernachlässigung des günstigen Einflusses der Setzungsmulde auf die Aktivierung des Eigengewichts
- Vernachlässigung des günstigen Einflusses des Querdehnverhaltens des Betons bei Wänden mit verhältnismäßig kleinem L/H
Der Ansatz $\nu = 0$ führt zu Zwangbeanspruchungen auf der sicheren Seite (siehe [12]).

- Vernachlässigung etwaiger Nachgiebigkeiten bei Wänden mit verhältnismäßig kleinem L/H infolge:
 - des Scheibenspannungszustands in der freien oberen Wandecke
 - des Schlupfs zwischen Wand und Fundament am freien Ende der Wand
 - eines möglichen Aufiegens der Bodenplatte am freien Ende ab einem gewissen Abstand zur Wand in Querrichtung

3.4 Numerische Simulation Zwang („WW optimiert“ allgemein)

3.4.1 Allgemeine Beschreibung der Vorgehensweise

Die nachfolgende Abbildung beschreibt die allgemeine Vorgehensweise bei der Anwendung des Bemessungsverfahrens „Numerische Simulation“.

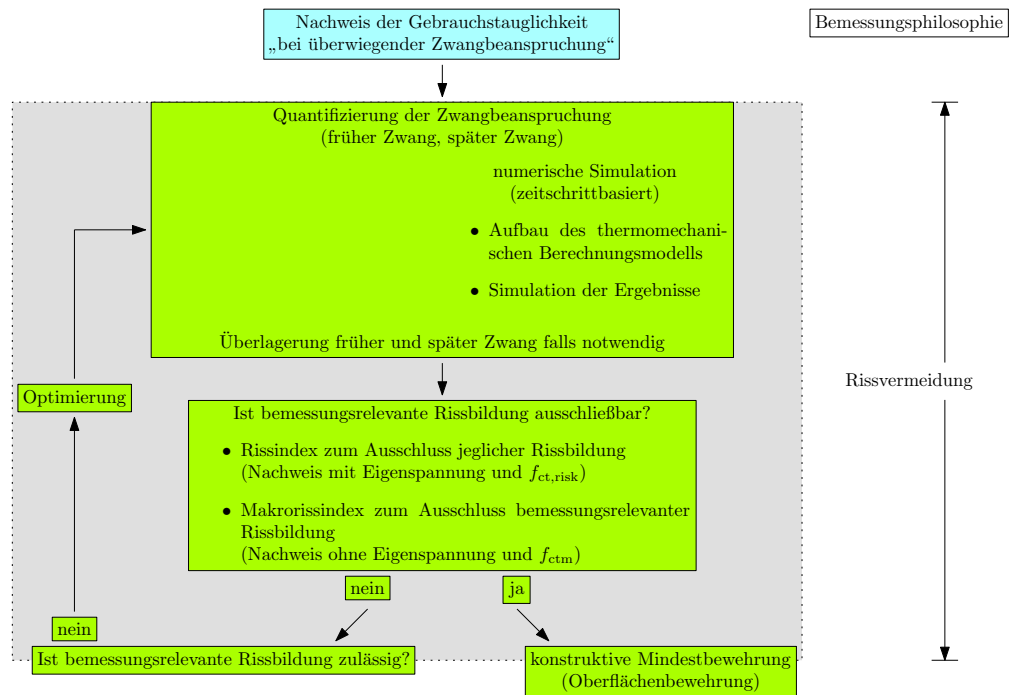


Abb. 3.4: Vorgehensweise „Numerische Simulation“

Um die sich im Zeitverlauf aufbauende Zwangbeanspruchung in der Stahlbetonkonstruktion quantifizieren zu können, müssen mehrere Bauphasen betrachtet werden. Diese werden in Kapitel 6 und Kapitel 7 durch verschiedene thermomechanische Berechnungsmodelle abgebildet. Die Simulationsergebnisse der einzelnen Modelle müssen schlussendlich entsprechend dem Bauablauf überlagert werden.

Zu den relevanten Bauphasen zählen:

1. Herstellung der Bodenplatte mit zugehörigem Erhärtungszeitraum (siehe Abb. 6.4 (links)/ Abb. 7.1 (links))
2. Herstellung der Wand auf der Bodenplatte mit zugehörigem Erhärtungszeitraum (siehe Abb. 6.5 (links)/ Abb. 7.2 (links))
3. Hinterfüllung der Stahlbetonkonstruktion mit Nutzungszeitraum (gemäß [14] nur für Dehnfugenabstand > 15 m erforderlich, wird hier aber zu Vergleichszwecken auch für einen Dehnfugenabstand von genau 15 m mitbetrachtet) (siehe Abb. 6.4 (rechts)/ Abb. 7.1 (rechts) und Abb. 6.5 (rechts)/ Abb. 7.2 (rechts))

Es kann davon ausgegangen werden, dass das Bauwerk bis zum Ende der Nutzungsdauer den Zustand nach der letzten Bauphase beibehält. Demnach sind die oben angeführten Modelle

ausreichend, um die ungünstigsten Zwangbeanspruchungen innerhalb der Lebensdauer des Bauwerks feststellen zu können.

Bei der Überlagerung der Simulationsergebnisse ist folgendes zu beachten: Das Berechnungsmodell zur Bauphase 1 liefert Ergebnisse für die Bodenplatte, welche zu berücksichtigen sind. Das Berechnungsmodell zur Bauphase 2 liefert Ergebnisse für die Bodenplatte und die Wand. Berücksichtigt werden jedoch nur die Ergebnisse für die Wand. Bei den Ergebnissen für die Bodenplatte handelt es sich an den maßgebenden Materialpunkten immer um günstige Druckspannungen, die daher auf der sicheren Seite vernachlässigt werden. Das Berechnungsmodell zur Bauphase 3 liefert erneut Ergebnisse für die Bodenplatte und die Wand. Beide sind bei der Überlagerung zu berücksichtigen.

3.4.2 Aufbau eines thermomechanischen Berechnungsmodells

Ein thermomechanisches Berechnungsmodell zur Ermittlung der Zwangbeanspruchung von Betonbauteilen muss so aufgebaut sein, dass eine schrittweise numerische Simulation möglich ist und die zeitliche Synchronisation der spannungsunabhängigen Materialeigenschaften und der klimatischen Randbedingungen gegeben ist. Zudem muss das Modell die fünf wesentlichen Teile der Simulation enthalten:

1. Aufbau des Modells (Geometrie, Material)

Meist handelt es sich um eine räumliche Diskretisierung mit Volumenelementen, wobei die Abbildung der zeitlich veränderlichen Betoneigenschaften elementweise mit den in Abs. 3.4.4 beschriebenen Materialmodellen erfolgt.
2. Simulation der Temperaturentwicklung

Es wird die Temperaturentwicklung aller Bauteile im Zeitverlauf simuliert, wobei die Hydratationswärme freisetzung, die thermischen Kenngrößen und die klimatischen Randbedingungen berücksichtigt werden.
3. Simulation der Spannungsentwicklung

Es wird die mit der Verformungseinwirkung (Temperaturdehnung, Schwindverkürzung) einhergehende Spannungsentwicklung im Zeitverlauf simuliert. Berücksichtigt werden insbesondere die sich verändernde Systemsteifigkeit, das Eigengewicht und die Lagerung.
4. Berechnung der Spannungsentwicklung ohne Eigenspannungen

Die Spannungsverläufe werden um die Eigenspannungen bereinigt. Dies erfolgt durch die Definition einer Schnittebene, die Integration der Spannungen zu Normalkraft und Momenten um den Schwerpunkt des Querschnitts und die anschließende Berechnung der eigenspannungsfreien Spannungsverläufe an repräsentativen Punkten.
5. Berechnung der Zugfestigkeitsentwicklung und Ausgabe der Simulationsergebnisse

Es wird die Zugfestigkeitsentwicklung im Zeitverlauf berechnet. Zudem werden die Simulationsergebnisse an maßgebenden Materialpunkten im maßgebenden Querschnitt ausgegeben. Zu den Simulationsergebnissen zählen die Temperaturentwicklung, die Spannungsentwicklung mit und ohne Eigenspannungen und die Indices zur Beurteilung der Rissgefahr (Rissindex und Makrorissindex).

Numerische Simulationen an thermomechanischen Berechnungsmodellen können mit mehreren Programmen durchgeführt werden.

Im Rahmen dieser Arbeit werden die Berechnungsmodelle mit der Programmgruppe SOFiSTiK erstellt. Die Eingabe erfolgt über den Texteditor Teddy. Eingesetzt werden die Module AQUA (Materialien und Querschnitte), SOFiMSHA (Import und Export Finiter Elemente und Stabwerke), HYDRA (Grundwasser- und Wärmemodelle), DYNR (Grafische Ausgabe instationärer Berechnungen und Antwortspektren), ASE (Allgemeine Statik Finiter Element Strukturen) und SIR (Schnitte im Raum).

Es wird empfohlen, die Aussagequalität der thermomechanischen Berechnungsmodelle an Benchmarks zu überprüfen. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde auf ein Berechnungssystem aus [11] zurückgegriffen, welches anhand des COST TU1404 [4] Benchmarks verifiziert wurde.

3.4.3 Mindestanforderungen an die geometrische Idealisierung

Die geometrische Idealisierung des realen Bauwerks erfolgt in den meisten Fällen durch ein volumetrisches Berechnungsmodell. Dieses ist notwendig, da bei massigen Bauteilen der Wärmefluss hauptsächlich in der Querschnittsfläche stattfindet, während die maßgebliche Beanspruchungsrichtung in der Regel normal dazu liegt. Zudem ermöglicht das Volumenmodell die einfachste Form der Lösung von multiphysikalischen Problemen, die dadurch gekennzeichnet sind, dass verschiedene physikalische Prozesse gekoppelt ablaufen.

Abb. 3.5 zeigt ein Viertel der in dieser Arbeit untersuchten Bodenplatte. Der Wärmefluss ist, wie am dargestellten Temperaturfeld erkennbar, hauptsächlich vertikal ausgerichtet. Die größten Zwangbeanspruchungen treten stets normal dazu in den beiden horizontalen Richtungen auf.

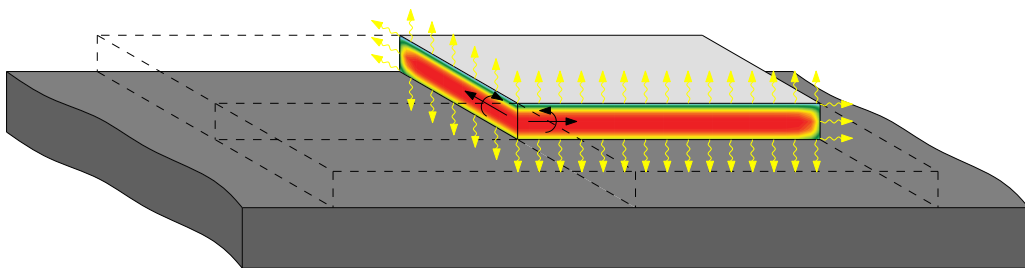


Abb. 3.5: Unterschiedliche Ausrichtungen von Wärmefluss und Zwangbeanspruchung - Bodenplatte

Aufgrund der Temperaturunterschiede über die Querschnittshöhe unterscheiden sich die Verformungseinwirkung, die mechanischen Eigenschaften und in Folge dessen auch die Zwangbeanspruchung erheblich in vertikaler Richtung. In horizontaler Richtung sind diese hingegen, wie am Temperaturfeld ersichtlich, bis auf die Randbereiche homogen.

Abb. 3.6 zeigt die Hälfte einer Wand mit zugehörigem Fundament. Erneut lässt das dargestellte Temperaturfeld erkennen, dass der Wärmefluss hauptsächlich in der Querschnittsebene stattfindet. Die größte Zwangbeanspruchung tritt normal dazu in Längsrichtung auf.

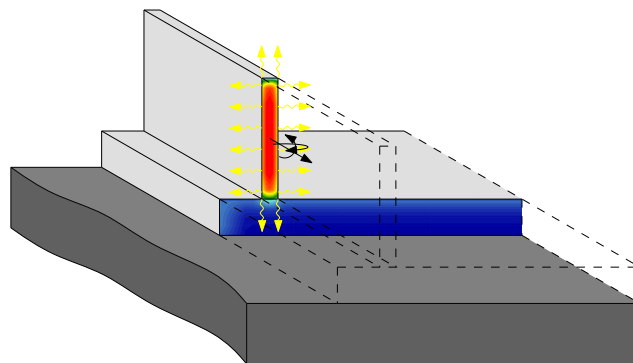


Abb. 3.6: Unterschiedliche Ausrichtungen von Wärmefluss und Zwangbeanspruchung - Wand

Für das Untersuchungsbeispiel sind alle Bauteile und der Bodenkörper (nur für die thermische Berechnung erforderlich) durch Volumenelemente abzubilden. Zur Definition der

Bereiche, an denen klimatische Randbedingungen zu berücksichtigen sind, werden Flächenelemente verwendet.

Um die Eigengewichtsaktivierung infolge Verkrümmung realistisch abbilden zu können, erfolgt die vertikale Lagerung der Bodenplatte durch nichtlineare Bettungsfedern, die bei Zugbeanspruchung ausfallen.

Die horizontale Wechselwirkung zwischen Bodenplatte und Baugrund wird in dieser Arbeit durch die starre Kopplung ersterer mit 2D-Scheibenelementen realisiert. Die Dehnsteifigkeit der Scheibenelemente wird in beiden Richtungen unterschiedlich gemäß [13, S. 10] gewählt.

Um den Rechenaufwand möglichst gering zu halten, wird die Symmetrie des Untersuchungsbeispiels ausgenutzt. Die Knoten in den Symmetrieflächen werden normal zu diesen unverschieblich gelagert. Durch die Knotenfesthaltung über die Querschnittshöhe kann zudem die in der Realität vorhandene Einspannung abgebildet werden.

Die Elementteilung muss so gewählt werden, dass die simulierte Temperaturentwicklung im Bauteil möglichst realitätsnah ausfällt. Daher ist in der Regel für die Randbereiche eine sehr feine Diskretisierung vorzusehen, während im Mittenbereich diese deutlich gröber ausfallen kann.

3.4.4 Kurze Beschreibung des Materialmodells

Die zwangbeanspruchungsrelevanten Materialeigenschaften des Betons verändern sich während des Erhärtungsprozesses zum Teil erheblich. Dadurch verändert sich neben der Verformungseinwirkung (Temperaturdehnung, Schwindverkürzung) auch die Behinderungssituation fortlaufend. Wie bereits erwähnt, resultieren Zwangbeanspruchungen aus behinderten Verformungseinwirkungen. Um also die Zwangbeanspruchung zu einem bestimmten Zeitpunkt ermitteln zu können, wird es notwendig, das Zusammenspiel von Einwirkung und Behinderung im Zeitverlauf zu kennen.

Die Berechnung der erhärtungsbedingten Zwangbeanspruchung muss in der numerischen Simulation demnach schrittweise erfolgen. Die Simulationsdauer wird durch die Wahl von Zeitschritten in Intervalle zerlegt. Ermittelt werden nun die Verformungseinwirkungen auf das System in jedem Intervall. Durch die Berücksichtigung der vorherrschenden Behinderungssituation im jeweiligen Zeitabschnitt kann somit die Zwangspannungsentwicklung im Zeitverlauf diskret bestimmt werden.

Die numerische Simulation erfordert ein Materialmodell, welches die Veränderung bzw. Entwicklung der Materialeigenschaften im Erhärtungszeitraum abbildet. Der Erhärtungsprozess selbst ist ein sehr komplexer Vorgang. Das Materialmodell muss in der Lage sein, diesen ausreichend genau zu beschreiben. Zudem müssen die Entwicklungen der spannungsunabhängigen Materialeigenschaften über einen Zustandsparameter für den Erhärtungsfortschritt gekoppelt sein. Damit wird es möglich, die vom Erhärtungszustand abhängigen Eigenschaften zu synchronisieren.

Zur Beschreibung der Entwicklungen der zwangbeanspruchungsrelevanten Materialeigenschaften werden im Nachfolgenden bewährte Ansätze verwendet. Die Anpassung derselben an die verwendete Betonsorte erfolgt durch die Wahl geeigneter freier Parameter im Zuge der Kalibrierung.

Effektives Betonalter

Das effektive Betonalter ist ein sinnvoller Parameter zur Beschreibung des Erhärtungsfortschritts des Betons. Die Erhärtungsgeschwindigkeit und damit auch die Alterung des Betons hängt maßgeblich vom Temperaturniveau im Materialpunkt ab. Bei höheren Temperaturen beschleunigt sich der Erhärtungsprozess, wohingegen bei niedrigeren Temperaturen dieser langsamer abläuft. Durch den schnelleren Erhärtungsfortschritt bei höheren Temperaturen wird auch die Wärmefreisetzung beschleunigt. Dies führt im Weiteren zu einem schnelleren Temperaturanstieg und damit zu einer sogenannten Selbstbeschleunigung des Betons.

Die Funktion zur Berechnung des effektiven Betonalters beschreibt diese Zusammenhänge. Das effektive Betonalter selbst ist ein fiktives Alter, das neben der tatsächlich vergangenen Zeit auch den Einfluss der Betontemperatur auf den Erhärtungszustand des Betons widerspiegelt, vgl. [11, S. 10]. Es kann mit der Reifefunktion von Freiesleben et al. ([3]) folgendermaßen berechnet werden:

$$t_{\text{eff}} = \int \exp \left[\frac{E_A}{R} \cdot \left(\frac{1}{293} - \frac{1}{273 + T(t)} \right) \right] dt \quad (3.2)$$

t_{eff}	effektives Betonalter
E_A	Aktivierungsenergie Versuchsbeton: $E_A = 33500 \text{ J/mol}$
R	universelle Gaskonstante $R = 8,3143 \text{ J/molK}$
$T(t)$	Betontemperatur
t	tatsächliche Zeit

Erfolgt die Erhärtung bei isothermen Bedingungen und einer Betontemperatur von $T(t) = 20 \text{ °C}$, so entspricht das effektive Betonalter der tatsächlich vergangenen Zeit.

Für die numerische Simulation wird zur Berechnung des effektiven Betonalters der Ansatz nach Jonasson gewählt. Dabei handelt es sich um die Reifefunktion von Freiesleben et al. mit kleinen Modifikationen.

Wärmefreisetzung infolge Hydratation

Der zeitliche Verlauf der Wärmefreisetzung im Hydratationsprozess kann mit dem Ansatz nach Jonasson ([5]) beschrieben werden:

$$Q(t_{\text{eff}}) = Q_{\infty} \cdot \exp \left\{ A \cdot \left[\ln \left(1 + \frac{t_{\text{eff}}}{t_k} \right) \right]^{c_1} \right\} \quad (3.3)$$

$Q(t_{\text{eff}})$	freigesetzte Hydratationswärme bezogen auf das effektive Betonalter
Q_{∞}	maximale freigesetzte Hydratationswärme des Betons
A, t_k, c_1	freie Parameter zur Anpassung an den Versuchsbeton
t_{eff}	effektives Betonalter

Neben diesem Modell gibt es noch zahlreiche andere Ansätze, welche auf unterschiedlichen Entwicklungsfunktionen beruhen.

Wärmespeicherkapazität und Wärmeleitfähigkeit

Wärmespeicherkapazität und Wärmeleitfähigkeit weisen eine Feuchte- und Temperaturabhängigkeit auf und unterliegen Veränderungen im Hydratationsprozess, vgl. [11, S. 14]. In den nachfolgenden Betrachtungen werden beide Materialeigenschaften als konstant angenommen.

Für die Quantifizierung der Zwangbeanspruchungen zur Beurteilung der Rissgefahr ist die Annahme einer konstanten Wärmeleitfähigkeit eine sinnvolle Vereinfachung. Zum Nachrechnen von Messergebnissen ist der Ansatz einer konstanten Wärmeleitfähigkeit jedoch nicht geeignet.

Festigkeitsentwicklung

In der Vergangenheit erfolgte die Beschreibung der Festigkeitsentwicklung von erhärtendem Beton häufig über den Hydratationsgrad. Dieser ist definiert als das Verhältnis aus der bisher freigesetzten Hydratationswärme zur maximal freisetzbaren Hydratationswärme. Laut Definition ist also bei Wärmefreisetzung zwangsläufig mit fortschreitender Festigkeitsentwicklung zu rechnen. Sobald keine Wärmefreisetzung mehr erfolgt, ist die Festigkeitsentwicklung als abgeschlossen zu betrachten.

Bei Beton mit latent hydraulischen Zusatzstoffen, der häufig zur Reduktion von Zwangbeanspruchung aufgrund geringerer Hydratationswärmefreisetzung eingesetzt wird, ist der Hydratationsgrad kein sinnvoller Ansatz zur Beschreibung der Festigkeitsentwicklung. Es besteht in diesem Fall nämlich kein direkter Zusammenhang zwischen Wärmefreisetzung und Festigkeitsentwicklung. Auch zur Beschreibung der Nacherhärtung des Betons, welche ohne signifikante Wärmefreisetzung stattfindet, ist der Hydratationsgrad nicht geeignet.

Es wird daher zur Modellierung der Festigkeitsentwicklung das Modell von Wesche ([16]) herangezogen. Mit diesem Ansatz ist es möglich, die Entwicklungen der einzelnen Festigkeitseigenschaften (Druckfestigkeit, Elastizitätsmodul und Zugfestigkeit) geschlossen zu beschreiben. Grundlage dafür ist der sogenannte Zeitbeiwert:

$$f_{\beta}(t_{\text{eff}}) = \exp \left[-a \cdot w/b \cdot \left(t_{\text{eff}}^{-b} - 28^{-b} \right) \right] \quad (3.4)$$

$f_{\beta}(t_{\text{eff}})$	Zeitbeiwert
a, b	Beiwerte zur Festigkeitsentwicklung
w/b	Wasser-Bindemittel-Wert der Betonrezeptur
t_{eff}	effektives Betonalter in Tagen

Wie in Glg. (3.4) ersichtlich, bezieht sich auch dieser Ansatz auf das effektive Betonalter. Damit ist die Synchronisation von Wärmefreisetzung und Festigkeitsentwicklung möglich.

Die Entwicklung des Elastizitätsmoduls und der Zugfestigkeit können gemäß Ansatz folgendermaßen berechnet werden:

$$E_{cm}(t_{\text{eff}}) = E_{cm} \cdot [f_{\beta}(t_{\text{eff}})]^{1/3} \quad (3.5)$$

$E_{cm}(t_{\text{eff}})$ mittlerer Elastizitätsmodul bezogen auf das effektive Betonalter
 E_{cm} mittlerer Elastizitätsmodul nach 28 Tagen
 $f_{\beta}(t_{\text{eff}})$ Zeitbeiwert

$$f_{ctm}(t_{\text{eff}}) = f_{ctm} \cdot [f_{\beta}(t_{\text{eff}})]^{2/3} \quad (3.6)$$

$f_{ctm}(t_{\text{eff}})$ mittlere Zugfestigkeit bezogen auf das effektive Betonalter
 f_{ctm} mittlere Zugfestigkeit nach 28 Tagen
 $f_{\beta}(t_{\text{eff}})$ Zeitbeiwert

Zur Beurteilung der Rissgefahr ist die 5 %-Fraktile der Zugfestigkeit erforderlich. Gemäß [8] lässt sich der Fraktilwert aus der mittleren Zugfestigkeit bestimmen:

$$f_{ctk, 0.05}(t_{\text{eff}}) = 0,7 \cdot f_{ctm}(t_{\text{eff}}) \quad (3.7)$$

$f_{ctk, 0.05}(t_{\text{eff}})$ 5 %-Fraktile der Zugfestigkeit bezogen auf das effektive Betonalter
 $f_{ctm}(t_{\text{eff}})$ mittlere Zugfestigkeit bezogen auf das effektive Betonalter

Damit die Rissbildung mit Sicherheit ausgeschlossen werden kann, wird in Anlehnung an [11] ein zusätzlicher Sicherheitsfaktor von 0,8 eingeführt:

$$f_{ct,risk}(t_{\text{eff}}) = 0,8 \cdot f_{ctk, 0.05}(t_{\text{eff}}) \quad (3.8)$$

$f_{ct,risk}(t_{\text{eff}})$ Zugfestigkeit zur Beurteilung der Rissgefahr bezogen auf das effektive Betonalter
 $f_{ctk, 0.05}(t_{\text{eff}})$ 5 %-Fraktile der Zugfestigkeit bezogen auf das effektive Betonalter

Querdehnzahl und Wärmeausdehnungskoeffizient

Die Querdehnzahl und der Wärmeausdehnungskoeffizient werden näherungsweise konstant mit den für erhärteten Beton gültigen Werten angenommen. Auch wenn in sehr frühem Betonalter die tatsächlichen Größen von den angenommenen Werten deutlich abweichen, ist die Vereinfachung vertretbar, da bis zum Beginn der Festigkeitsentwicklung die Unterschiede weitgehend abgebaut werden.

Schwinden

Gemäß [8, S. 32] setzt sich die Schwinddehnung aus der Trocknungsschwinddehnung des Betons und der autogenen Schwinddehnung zusammen.

- Trocknungsschwinden

Das Trocknungsschwinden des Betons resultiert aus dem Ausdiffundieren von chemisch nicht gebundenem Wasser, vgl. [11, S. 20]. Es beginnt mit dem Ausschalen bzw. der Beendigung der Nachbehandlungsmaßnahme. Demnach vollzieht sich dieser Vorgang vorwiegend im Nutzungszeitraum.

Da Trocknungsschwinden gemäß [11, S. 21] bei massigen Querschnitten als Oberflächenproblem betrachtet werden kann, wird auf die Abbildung desselben in den nachfolgenden Betrachtungen verzichtet.

- Autogenes Schwinden

Das autogene Schwinden ist eine Folge der Hydratation und tritt maßgeblich im Erhärungszeitraum auf.

Die gesamte autogene Schwinddehnung kann gemäß [8, S. 33] wie folgt ermittelt werden:

$$\varepsilon_{ca,\infty} = 2,5 \cdot (f_{ck} - 10) \cdot 10^{-6} \quad (3.9)$$

$\varepsilon_{ca,\infty}$ gesamte autogene Schwinddehnung
 f_{ck} charakteristische Zylinderdruckfestigkeit nach 28 Tagen

Der zeitliche Verlauf der autogenen Schwinddehnung wird im Nachfolgenden mit dem Hydratationsgrad modelliert. Die Tatsache, dass die auftretenden Schwinddehnungen bei Betontemperaturen oberhalb von ca. 40 °C damit nicht richtig abgebildet werden können, wird so hingenommen. Der Zeitraum, in dem sich das Bauteil auf dem genannten Temperaturniveau befindet, ist verhältnismäßig kurz.

[10] empfiehlt die normativ vorgegebene gesamte autogene Schwinddehnung für Untersuchungen innerhalb der ersten 15 Tage nach Betoneinbau mit einem Korrekturfaktor von 0,775 zu skalieren, sofern die relative Luftfeuchtigkeit der Umgebung zwischen 40 und 60 % liegt und die Druckfestigkeit des Betons $f_{ck} < 40 \text{ N/mm}^2$ ist. Aus diesem Grund wird die gesamte Schwinddehnung mit 0,8 multipliziert. Zudem konvergiert im vorliegenden Fall der Hydratationsgrad gegen 0,95, weshalb folgende Anpassung notwendig wird:

$$\varepsilon_{ca,\infty} = 2,5 \cdot (f_{ck} - 10) \cdot 10^{-6} \cdot 0,8/0,95 \quad (3.10)$$

$\varepsilon_{ca,\infty}$ gesamte autogene Schwinddehnung
 f_{ck} charakteristische Zylinderdruckfestigkeit nach 28 Tagen

$$\varepsilon_{ca}(t_{\text{eff}}) = \varepsilon_{ca,\infty} \cdot \frac{Q(t_{\text{eff}})}{Q_{\infty}} \quad (3.11)$$

- $\varepsilon_{ca}(t_{\text{eff}})$ autogene Schwinddehnung bezogen auf das effektive Betonalter
- $\varepsilon_{ca,\infty}$ gesamte autogene Schwinddehnung
- $Q(t_{\text{eff}})$ freigesetzte Hydratationswärme bezogen auf das effektive Betonalter
- Q_{∞} maximale freigesetzte Hydratationswärme des Betons

In der numerischen Simulation wird das autogene Schwinden folgendermaßen berücksichtigt: In jedem Zeitschritt wird auf jedes einzelne Element ein prozentueller Anteil der gesamten autogenen Schwinddehnung als Verformungseinwirkung aufgebracht. Der prozentuelle Anteil kann sich je Element unterscheiden und entspricht dem Fortschritt des Hydratationsgrads im jeweiligen Element.

Die elementweise Betrachtung ist erforderlich, da im Bauteil in der Regel unterschiedliche Temperaturen vorherrschen und damit der Fortschritt des Hydratationsgrads elementweise unterschiedlich ausfällt. Zu berücksichtigen ist, dass im Erhärtungszeitraum die Verformungseinwirkung auf sich erst entwickelnde mechanische Eigenschaften trifft.

Viskoelastizität

Die Auswirkung der viskoelastischen Betoneigenschaften auf die Höhe der Zwangbeanspruchung wird in den nachfolgenden Betrachtungen nur im Erhärtungszeitraum berücksichtigt. Im Nutzungszeitraum werden die viskoelastischen Effekte vernachlässigt.

In der analytischen Bemessung erfolgt die Berücksichtigung durch Koeffizienten, welche in den Bestimmungsgleichungen für die äquivalenten Temperatureinwirkungen enthalten sind. Tab. 3.1 gibt einen Überblick über die Reduktionsfaktoren im Erhärtungszeitraum.

Tab. 3.1: Koeffizienten zur Berücksichtigung der viskoelastischen Effekte

Größenname	Symbol	Wert	Einheit
Koeffizient Plattenoberseite	$k_{\text{visko},F,o}$	0,6	[-]
Koeffizient Plattenunterseite	$k_{\text{visko},F,u}$	0,8	[-]
Koeffizient Wand	$k_{\text{visko},W}$	0,7	[-]

Die viskoelastischen Betoneigenschaften werden in der numerischen Simulation nicht diskret abgebildet. Die Auswirkung derselben wird jedoch in einem zweiten Schritt erfasst. Dazu werden die um die Eigenspannung bereinigten elastischen Spannungen (= Simulationsergebnis) mit den in Tab. 3.1 angeführten Konstanten multipliziert.

3.4.5 Auswertung und Interpretation

Zur Beurteilung der Rissgefahr ist die Auswertung der Simulationsergebnisse notwendig. Sowohl die Spannungen als auch die Indices ermöglichen die Urteilsfindung in der vorliegenden Arbeit.

In [6] werden mehrere Kriterien zur Beurteilung der Rissgefahr erwähnt. Dazu zählt neben dem Temperaturkriterium und dem Dehnungskriterium das gebräuchliche Spannungskriterium, welches auch in dieser Arbeit verwendet wird.

Betrachtet werden die maßgebenden Materialpunkte im maßgebenden Querschnitt. Im ersten Schritt wird für die ausgewählten Punkte der Rissindex im Zeitverlauf berechnet. Dieser ist folgendermaßen definiert:

$$\frac{\sigma_{c,i}(t)}{f_{ctm,i}(t)} \leq 0,56 \quad (3.12)$$

$\sigma_{c,i}(t)$ Spannung am Materialpunkt i zum Zeitpunkt t (ungerissenes System)

$f_{ctm,i}(t)$ mittlere Zugfestigkeit am Materialpunkt i zum Zeitpunkt t

Sofern der Rissindex zu keinem Zeitpunkt den Grenzwert von 0,56 ($= 0,8 \cdot 0,7$) überschreitet, kann **mit Sicherheit** jegliche Rissbildung ausgeschlossen werden.

Ist dies nicht der Fall, so muss mit lokaler Rissbildung gerechnet werden, die in weiterer Folge zum Abbau der Eigenspannungen führt. Grund für den Abbau ist die Tatsache, dass Eigenspannungen immer eine Gleichgewichtsgruppe bilden. Der sogenannte Makrorissindex dient zur Beurteilung der Gefahr von Biege- oder Trennrissbildung. Er ist folgendermaßen definiert:

$$\frac{\sigma_{c,N+M,i}(t)}{f_{ctm,i}(t)} \leq 1,0 \quad (3.13)$$

$\sigma_{c,N+M,i}(t)$ Spannung ohne Eigenspannung am Materialpunkt i zum Zeitpunkt t (ungerissenes System)

$f_{ctm,i}(t)$ mittlere Zugfestigkeit am Materialpunkt i zum Zeitpunkt t

Im zweiten Schritt wird deshalb an repräsentativen Punkten der Makrorissindex im Zeitverlauf berechnet. Sofern der Makrorissindex zu keinem Zeitpunkt den Grenzwert von 1,0 überschreitet, kann die Bildung von Biege- oder Trennrissen ausgeschlossen werden.

ANHANG 3 der Richtlinie sieht für die Nachweisführung ausschließlich die Gegenüberstellung des Rissindex mit dem Grenzwert 0,7 vor. Dadurch ist es jedoch, entsprechend den aktuellen Erkenntnissen, nicht möglich, die Rissbildung (lokale Rissbildung und in weiterer Folge mögliche Makrorissbildung) sicher auszuschließen. Zudem kann dies zu konservativen Ergebnissen führen, da der Makrorissindex nicht betrachtet wird, und nur der allgemeine Rissindex zur endgültigen Urteilsfindung dient. Schlussendlich ist jedoch der Ausschluss von Makrorissen (Biege- oder Trennrissen) relevant für die Dichtigkeit der Wanne. Aus den genannten Gründen wird daher im Zuge der Nachweisführung von den Vorgaben in [14] abgewichen.

4 Bewehrungsermittlung „WW klassisch“

In diesem Kapitel wird das Bemessungsmodell „Weiße Wanne klassisch“ für die Nachweisführung der Gebrauchstauglichkeit „bei überwiegender Zwangbeanspruchung“ des in Kapitel 2 beschriebenen Untersuchungsbeispiels herangezogen.

Für den Nachweis „früher Zwang“ werden die in [14, S. 14 - 17] enthaltenen Bemessungsdiagramme verwendet. Der Nachweis „später Zwang“ entfällt bei Dehnfugenabständen ≤ 30 m und wird deshalb im Nachfolgenden nicht geführt. Die Sicherstellung der Gebrauchstauglichkeit ist also mit den in Abs. 4.1 für die Bodenplatte und Abs. 4.2 für die Wand bestimmten erforderlichen Bewehrungsmengen für die Stahlbetonkonstruktion mit vorgesehenen Dehnfugenabständen von 15 m und 30 m möglich.

Die Mindestbewehrung (Nachweis „früher Zwang“) ergibt sich aus dem Bemessungsdiagramm, gültig für eine Rissbreite von $w_k = 0,20$ mm, eine Betondeckung von $c_{\text{nom}} = 4,0$ cm und Betonfestigkeitsklassen bis C25/30(56), in Abhängigkeit von der Bauteildicke. Die Ermittlung derselben kann in den nachfolgenden Diagrammen nachvollzogen werden.

Anzumerken ist, dass mit dem Bemessungsmodell „Weiße Wanne klassisch“ das Auftreten von einzelnen Rissen mit einer größeren Rissbreite als der der Bemessung zu Grunde gelegten nicht ausgeschlossen werden kann (vgl. [14, S. 14]). Der Grund dafür liegt in den getroffenen Annahmen (Abs. 3.2.2), welche eine wirtschaftliche Bewehrungsermittlung möglich machen sollen. [14, S. 14] sieht vor, dies so hinzunehmen und auftretende Risse mit unzulässigen Rissbreiten nachträglich zu injizieren.

4.1 Bodenplatte

Die erforderliche Bewehrungsmenge pro Bauteiloberfläche und Richtung beträgt:

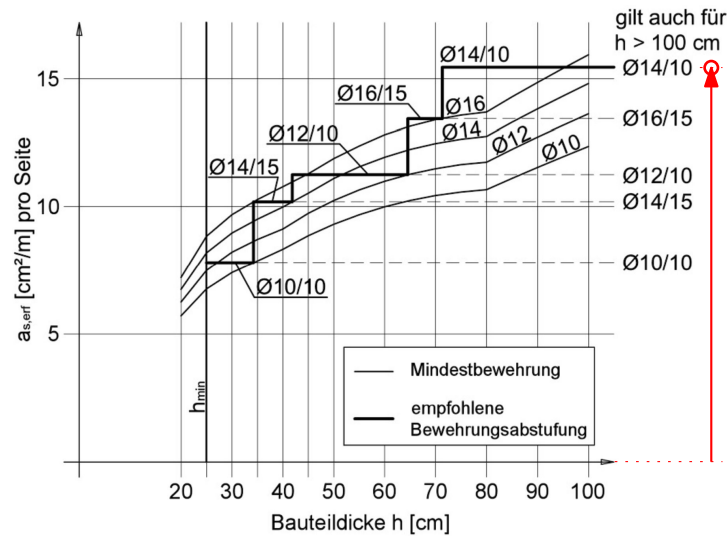


Abb. 4.1: Mindestbewehrung Bodenplatte (Nachweis „früher Zwang“) gemäß [14, S. 15]
 Rissbreite $w_k = 0,20$ mm, Betondeckung $c_{nom} = 4,0$ cm

Die gewählte Bewehrung pro Bauteiloberfläche und Richtung entspricht:

$$a_{s,gew} = 15,39 \text{ cm}^2/\text{m}$$

$$\text{Ø}14/10$$

4.2 Wand

Die erforderliche Bewehrungsmenge pro Bauteiloberfläche und Richtung beträgt:

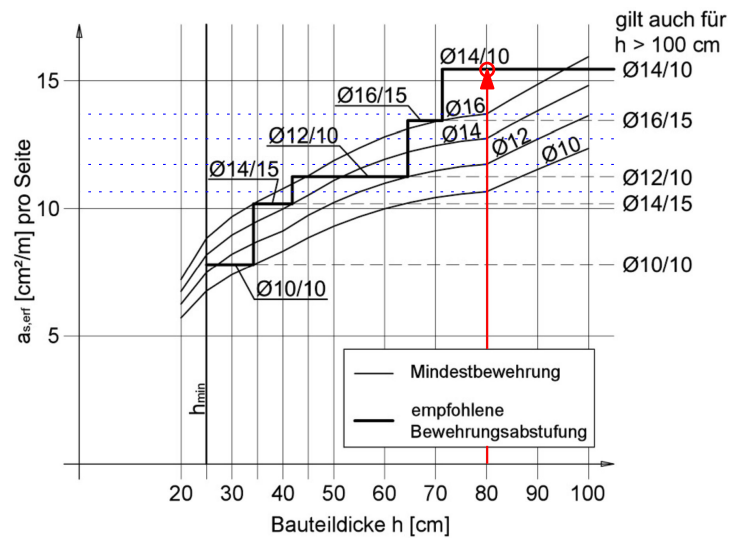


Abb. 4.2: Mindestbewehrung Wand (Nachweis „früher Zwang“) gemäß [14, S. 15]
Rissbreite $w_k = 0,20$ mm, Betondeckung $c_{nom} = 4,0$ cm

Die gewählte Bewehrung pro Bauteiloberfläche und Richtung entspricht:

$$a_{s,gew} = 15,39 \text{ cm}^2/\text{m}$$

$$\text{Ø}14/10$$

5 Bewehrungsermittlung „WW optimiert“ gemäß öbv-Merkblatt

Die nachfolgende Ausführung folgt der Beschreibung der Vorgehensweise in Abs. 3.3.1 und entspricht den Festlegungen in [13]. Bemessen wird das in Kapitel 2 beschriebene Untersuchungsbeispiel mit einem Dehnfugenabstand von 15 m.

Da die in [13] angeführten Bestimmungsgleichungen, wie bereits in Abs. 3.3.2 erwähnt, einer umfangreichen Parameterstudie zu Grunde liegen, und sich diese nicht vollkommen von den dabei gewählten Randbedingungen entkoppeln lassen, muss deren projektspezifische Anwendbarkeit stets zunächst geprüft werden. Das Merkblatt nennt neben den allgemeinen Voraussetzungen für die Anwendbarkeit des Bemessungsmodells „Weiße Wanne optimiert“, welche auch das Bemessungsverfahren „Numerische Simulation“ betreffen, auch materialspezifische Anwendungsvoraussetzungen.

Zu den allgemeinen Voraussetzungen zählen gemäß [13, S. 2]:

- die Verwendung des Betonstandards „BS 1 PLUS“,
- die Einhaltung von Frischbetontemperaturen ≤ 22 °C und
- die Anordnung von Fugenabständen gemäß [14], Kapitel 4.5.2.2:
Beanspruchungen infolge späten Zwangs müssen bei Einhaltung von Bewegungsfugenabständen ≤ 15 m nicht gesondert nachgewiesen werden.

Alle hier genannten Anwendungsvoraussetzungen sind für den konkreten Fall erfüllt.

Die Prüfung der materialspezifischen Voraussetzungen erfolgt mit den Eingangsgrößen entsprechend Abs. 2.3, welche von einem Experten für Betontechnik bestimmt wurden. Die Nachweisführung kann in den nachfolgenden Diagrammen für die Wärmeentwicklung (Abb. 5.1), für die Entwicklung des Elastizitätsmoduls (Abb. 5.2) und für die Entwicklung der Zugfestigkeit (Abb. 5.3) des Betons nachvollzogen werden. Zusätzlich wird der 70 h-Wert in der Langavantmessung dem in [13, S. 3] genannten Maximalwert gegenübergestellt.

$$Q_{70h} = 185,0 \text{ kJ/kg} \leq Q_{70h,\max} = 270,0 \text{ kJ/kg}$$

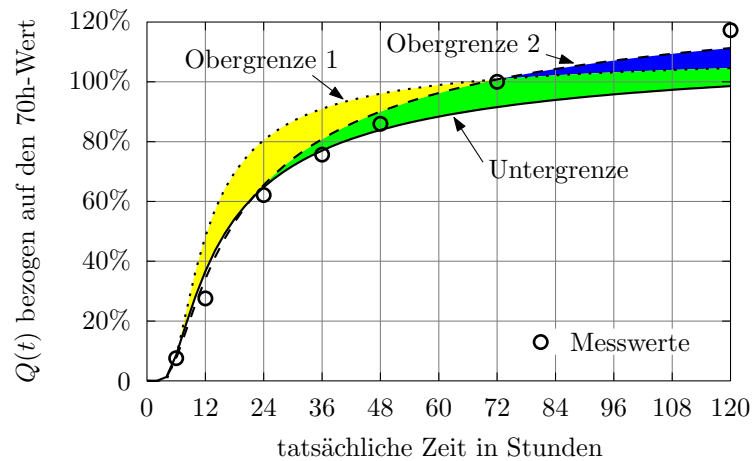


Abb. 5.1: Überprüfung der Anwendungsvoraussetzung Wärmeentwicklung gemäß [13, S. 3]

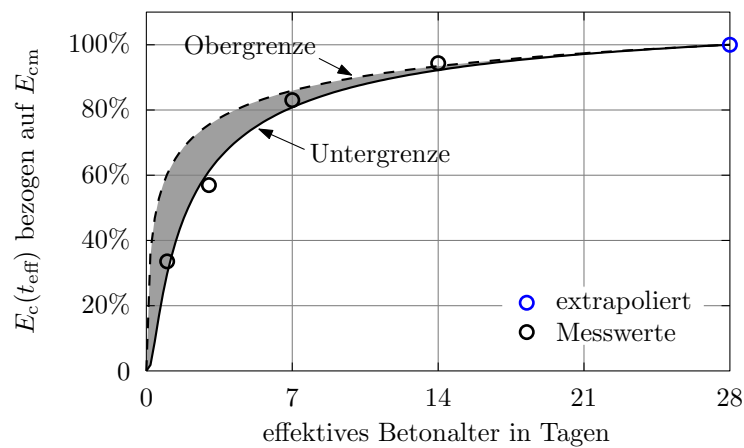


Abb. 5.2: Überprüfung der Anwendungsvoraussetzung Entwicklung des Elastizitätsmoduls gemäß [13, S. 4]

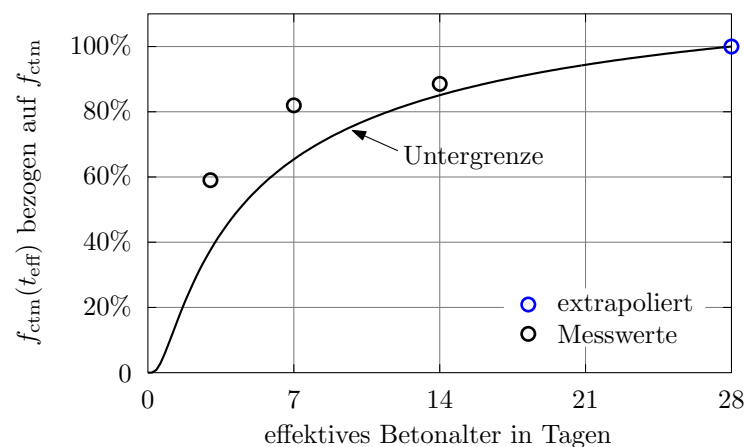


Abb. 5.3: Überprüfung der Anwendungsvoraussetzung Entwicklung der Zugfestigkeit gemäß [13, S. 4]

Die verwendete Regelbetonsorte BS 1 C PLUS/Typ 5 erfüllt alle Voraussetzungen.

In den folgenden beiden Abschnitten wird zunächst für die Bodenplatte und anschließend für die Wand die Gefahr erhärtungsbedingter Trennrissbildung beurteilt und die erforderliche Bewehrungsmenge ermittelt. Wenn sich die Ausführung des Bauteils ohne Makrorissbildung nachweisen lässt, ist eine konstruktive Mindestbewehrung ausreichend.

Die maximale Temperaturzunahme des verwendeten Betons gemäß Langavant ergibt sich aus der im Versuch festgestellten maximalen Hydratationswärme, der Bindemittelmenge und der Wärmespeicherkapazität des Betons:

$$\Delta T_{Q,\max} = \frac{Q_{\max}}{S_c} \cdot m_{\text{BM}} = \frac{255,0}{2400} \cdot 330 = 35,06 \text{ °C} \quad (5.1)$$

Die im Langavantversuch festgestellte maximale Hydratationswärme von 255,0 kJ/kg kann aus dem Diagramm mit den Messwerten zur Wärmeentwicklung des Betons infolge Betonerhärtung (Abb. 2.2) in Abs. 2.3 entnommen werden.

5.1 Bodenplatte

5.1.1 Rissgefahr

Aufgrund der vorgesehenen Nachbehandlungsdauer von 168 h darf in Abhängigkeit der Plattendicke nachfolgender Reduktionsfaktor ermittelt werden:

$$k_{\text{NB}} = \left(1 - \frac{1}{(0,9 + h_{\text{F}})^4} \right) = \left(1 - \frac{1}{(0,9 + 1,8)^4} \right) = 0,98 \quad (5.2)$$

Das Temperaturäquivalent für die Beurteilung von Biegerissgefahr an der Plattenoberseite beträgt unter Berücksichtigung des Reduktionsfaktors:

$$\begin{aligned} \Delta T_{\text{M,eq,F,o}} &= 0,6 \cdot \left[\Delta T_{\text{nom}} + \Delta T_{\text{Q,max}} \cdot \left(0,8 - \frac{1,1}{1,2 + h_{\text{F}}} \right) + \frac{\Delta T_{\text{a,var}}}{(0,8 + h_{\text{F}})^4} \right] \cdot k_{\text{NB}} = \\ &= 0,6 \cdot \left[5 + 35,06 \cdot \left(0,8 - \frac{1,1}{1,2 + 1,8} \right) + \frac{10}{(0,8 + 1,8)^4} \right] \cdot 0,98 = 12,02 \text{ °C} \end{aligned} \quad (5.3)$$

Die Biegespannungen im gedachten Verformungsruhepunkt der Bodenplatte haben damit in Längs- und Querrichtung eine Größe von:

$$\begin{aligned} \sigma_{\text{F,o,x}} &= \frac{\alpha_{\text{T}} \cdot \Delta T_{\text{M,eq,F,o}}}{2} \cdot E_{\text{F}} \leq 3 \cdot \frac{\gamma_{\text{c}} \cdot L_{\text{F,x,eff}}^2}{h_{\text{F}}} \\ &= \frac{8 \cdot 10^{-6} \cdot 12,02}{2} \cdot 26500 = 1,27 \text{ N/mm}^2 \leq 3 \cdot \frac{0,025 \cdot (15/2)^2}{1,8} = 2,34 \text{ N/mm}^2 \end{aligned} \quad (5.4)$$

$$\begin{aligned}
 \sigma_{F,o,y} &= \frac{\alpha_T \cdot \Delta T_{M,eq,F,o}}{2} \cdot E_F \leq 3 \cdot \frac{\gamma_c \cdot L_{F,y,eff}^2}{h_F} \\
 &= \frac{8 \cdot 10^{-6} \cdot 12,02}{2} \cdot 26500 = 1,27 \text{ N/mm}^2 \leq 3 \cdot \frac{0,025 \cdot (30/2)^2}{1,8} = 9,38 \text{ N/mm}^2
 \end{aligned}
 \tag{5.5}$$

Die Gleichungen liefern folgende Erkenntnis: Die resultierende Verkrümmung wird sowohl in Längs- als auch in Querrichtung auf Grund der geometrischen Abmessungen vollständig behindert. Das Eigengewicht wird in beiden Richtungen maximal möglich aktiviert.

Die zugehörige Zugfestigkeit an der Plattenoberseite zum kritischen Zeitpunkt beträgt:

$$\begin{aligned}
 f_{ct,zugh,F,o} &= f_{ctm} \cdot \left(1,3 - \frac{1,2}{0,8 + h_F} \right) \leq f_{ctm} \\
 &= 3,05 \cdot \left(1,3 - \frac{1,2}{0,8 + 1,8} \right) = 2,56 \text{ N/mm}^2 \leq 3,05 \text{ N/mm}^2
 \end{aligned}
 \tag{5.6}$$

Für Biegerisse an der Plattenoberseite liegt der Makrorissindex bei:

$$\frac{\sigma_{F,o,x/y}}{f_{ct,zugh,F,o}} = \frac{1,27}{2,56} = 0,50 \leq 1,0
 \tag{5.7}$$

Der Nachweis zum Ausschluss von Biegerissen an der Plattenoberseite kann mit einer Sicherheit von ca. 2,01 erbracht werden.

Die Temperaturäquivalente zur Beurteilung der Gefahr von Biegerissen an der Plattenunterseite sowie Trennrissen bei Erreichen der Ausgleichstemperatur werden unabhängig voneinander ermittelt:

$$\begin{aligned}
 \Delta T_{M,eq,F,u} &= -0,8 \cdot \left[\Delta T_{nom} + \Delta T_{Q,max} \cdot \left(0,8 - \frac{0,6}{0,5 + h_F} \right) + \frac{2 \cdot \Delta T_{a,var}}{(0,8 + h_F)^4} \right] + \Delta T_{M,eq,F,o} = \\
 &= -0,8 \cdot \left[5 + 35,06 \cdot \left(0,8 - \frac{0,6}{0,5 + 1,8} \right) + \frac{2 \cdot 10}{(0,8 + 1,8)^4} \right] + 12,02 = -7,46 \text{ °C}
 \end{aligned}
 \tag{5.8}$$

$$\begin{aligned}
 \Delta T_{N,eq,F} &= -0,8 \cdot \left[\Delta T_{nom} + \Delta T_{Q,max} \cdot \left(1 - \frac{0,6}{0,5 + h_F} \right) + \frac{\Delta T_{a,var}/2}{(0,8 + h_F)^4} \right] = \\
 &= -0,8 \cdot \left[5 + 35,06 \cdot \left(1 - \frac{0,6}{0,5 + 1,8} \right) + \frac{10/2}{(0,8 + 1,8)^4} \right] = -24,82 \text{ °C}
 \end{aligned}
 \tag{5.9}$$

Die Biegespannungen im gedachten Verformungsruhepunkt der Bodenplatte betragen in Längs- und Querrichtung:

$$\begin{aligned}\sigma_{M_{F,u,x}} &= -\frac{\alpha_T \cdot \Delta T_{M,eq,F,u}}{2} \cdot E_F \leq 3 \cdot \frac{\gamma_c \cdot L_{F,x,eff}^2}{h_F} \\ &= -\frac{8 \cdot 10^{-6} \cdot -7,46}{2} \cdot 26500 = 0,79 \text{ N/mm}^2 \leq 3 \cdot \frac{0,025 \cdot (15/2)^2}{1,8} = 2,34 \text{ N/mm}^2\end{aligned}\quad (5.10)$$

$$\begin{aligned}\sigma_{M_{F,u,y}} &= -\frac{\alpha_T \cdot \Delta T_{M,eq,F,u}}{2} \cdot E_F \leq 3 \cdot \frac{\gamma_c \cdot L_{F,y,eff}^2}{h_F} \\ &= -\frac{8 \cdot 10^{-6} \cdot -7,46}{2} \cdot 26500 = 0,79 \text{ N/mm}^2 \leq 3 \cdot \frac{0,025 \cdot (30/2)^2}{1,8} = 9,38 \text{ N/mm}^2\end{aligned}\quad (5.11)$$

Die Gleichungen liefern erneut folgende Erkenntnis: Die resultierende Verkrümmung wird sowohl in Längs- als auch in Querrichtung auf Grund der geometrischen Abmessungen vollständig behindert. Das Eigengewicht wird in beiden Richtungen maximal möglich aktiviert.

Die Normalspannungen infolge externer Behinderung des konstanten Temperaturanteils werden unter Berücksichtigung des Behinderungsgrads für die horizontale Verkürzung der Bodenplatte folgendermaßen berechnet:

$$\begin{aligned}\sigma_{N_{F,u,x}} &= -\alpha_T \cdot \Delta T_{N,eq,F} \cdot E_F \cdot \frac{1}{1 + \frac{E_F \cdot A_F}{E_B \cdot (L_{F,y} + 2 \cdot 0,6 \cdot \frac{2}{3} \cdot L_{F,x,eff}) \cdot \frac{2}{3} \cdot L_{F,x,eff}}} = \\ &= -8 \cdot 10^{-6} \cdot -24,82 \cdot 26500 \cdot \frac{1}{1 + \frac{26500 \cdot 30 \cdot 1,8}{100 \cdot (30 + 2 \cdot 0,6 \cdot \frac{2}{3} \cdot 15/2) \cdot \frac{2}{3} \cdot 15/2}} = 0,07 \text{ N/mm}^2\end{aligned}\quad (5.12)$$

$$\begin{aligned}\sigma_{N_{F,u,y}} &= -\alpha_T \cdot \Delta T_{N,eq,F} \cdot E_F \cdot \frac{1}{1 + \frac{E_F \cdot A_F}{E_B \cdot (L_{F,x} + 2 \cdot 0,6 \cdot \frac{2}{3} \cdot L_{F,y,eff}) \cdot \frac{2}{3} \cdot L_{F,y,eff}}} = \\ &= -8 \cdot 10^{-6} \cdot -24,82 \cdot 26500 \cdot \frac{1}{1 + \frac{26500 \cdot 15 \cdot 1,8}{100 \cdot (15 + 2 \cdot 0,6 \cdot \frac{2}{3} \cdot 30/2) \cdot \frac{2}{3} \cdot 30/2}} = 0,19 \text{ N/mm}^2\end{aligned}\quad (5.13)$$

Aus der Überlagerung von Biegezwang und zentrischem Zwang ergeben sich in Längs- und Querrichtung folgende Spannungen an der Plattenunterseite:

$$\sigma_{F,u,x} = \sigma_{M_{F,u,x}} + \sigma_{N_{F,u,x}} = 0,79 + 0,07 = 0,86 \text{ N/mm}^2 \quad (5.14)$$

$$\sigma_{F,u,y} = \sigma_{M_{F,u,y}} + \sigma_{N_{F,u,y}} = 0,79 + 0,19 = 0,98 \text{ N/mm}^2 \quad (5.15)$$

Die zugehörige Zugfestigkeit an der Plattenunterseite beträgt für Bauteildicken $\geq 0,5$ m zum kritischen Zeitpunkt:

$$h_F = 1,8 \text{ m} \geq 0,5 \text{ m} \quad (5.16)$$

$$f_{ct,zugh,F,u} = f_{ctm} = 3,05 \text{ N/mm}^2 \quad (5.17)$$

Für Rissbildung an der Plattenunterseite liegt der Makrorissindex bei:

$$\frac{\sigma_{F,u,y}}{f_{ct,zugh,F,u}} = \frac{0,98}{3,05} = 0,32 \leq 1,0 \quad (5.18)$$

Der Nachweis zum Ausschluss von Biegerissen an der Plattenunterseite in Kombination mit Trennrissen in der Bodenplatte kann mit einer Sicherheit von ca. 3,11 erbracht werden.

5.1.2 Erforderliche Mindestbewehrung zur Begrenzung der Rissbreite

Eine konstruktive Mindestbewehrung ist stets vorzusehen. Die erforderliche Bewehrungsmenge pro Bauteiloberfläche und Richtung beträgt:

$$a_{s,\min,\text{erf}} = 0,07 \cdot h_F \cdot \frac{f_{ctm}}{f_{yk}} = 0,07 \cdot 1,8 \cdot \frac{3,05}{550} \cdot 10^4 = 6,99 \text{ cm}^2/\text{m} \quad (5.19)$$

Die gewählte Bewehrung pro Bauteiloberfläche und Richtung entspricht:

$$a_{s,\min,\text{gew}} = 7,85 \text{ cm}^2/\text{m} \quad \varnothing 10/10$$

5.2 Wand

Voraussetzung für die Anwendbarkeit der in [13] angegebenen Bestimmungsgleichungen für Wände auf Fundamenten ist die Einhaltung des Schlankheitskriteriums:

$$h_W/b_W = 6/0,8 = 7,5 \geq 3 \quad (5.20)$$

5.2.1 Rissgefahr

Das Temperaturäquivalent für die Beurteilung von Trennrissgefahr in der Wand beträgt:

$$\begin{aligned} \Delta T_{N,eq,W} &= -0,7 \cdot \left[\Delta T_{nom} + \Delta T_{Q,max} \cdot \left(0,8 - \frac{0,75}{1,1 + b_W} \right) + \frac{\Delta T_{a,var}}{(0,8 + b_W)^4} \right] = \\ &= -0,7 \cdot \left[5 + 35,06 \cdot \left(0,8 - \frac{0,75}{1,1 + 0,8} \right) + \frac{10}{(0,8 + 0,8)^4} \right] = -14,51 \text{ °C} \end{aligned} \quad (5.21)$$

Die maximal mitwirkende Breite der Bodenplatte in Querrichtung beträgt unter Berücksichtigung des Spannungsausbreitungswinkels von 45° bei ungerissenen Systemen:

$$\begin{aligned} b_{F,eff,max} &= b_W + \sum b_{F,max,i} \leq b_F \\ &= 0,8 + 2,1 + 7,5 = 10,4 \text{ m} \leq 30 \text{ m} \\ \text{mit: } b_{F,max,i} &= x \leq b_{F,i} \\ b_{F,max,1} &= 15/2 = 7,5 \text{ m} \leq 2,1 \text{ m} \\ b_{F,max,2} &= 15/2 = 7,5 \text{ m} \leq 30 - 2,1 - 0,8 = 27,1 \text{ m} \end{aligned} \quad (5.22)$$

Die inneren Zwangsschnittgrößen infolge Querschnittskompatibilität betragen:

$$\begin{aligned} N_W &= -\alpha_T \cdot \Delta T_{N,eq,W} \cdot \left(\frac{1}{E_F \cdot A_F} + \frac{1}{E_W \cdot A_W} + \frac{y_1^2}{E_F \cdot I_F + E_W \cdot I_W} \right)^{-1} = \\ &= -8 \cdot 10^{-6} \cdot -14,51 \cdot \left[\frac{1}{26500} \cdot \left(\frac{1}{10,4 \cdot 1,8} + \frac{1}{0,8 \cdot 6} + \frac{\left(\frac{6+1,8}{2}\right)^2}{\frac{10,4 \cdot 1,8^3}{12} + \frac{0,8 \cdot 6^3}{12}} \right) \right]^{-1} = \\ &= 2,95 \text{ MN} \end{aligned} \quad (5.23)$$

$$M_W = N_W \cdot y_1 \cdot \frac{1}{1 + \frac{E_F \cdot I_F}{E_W \cdot I_W}} = 2,95 \cdot \frac{6 + 1,8}{2} \cdot \frac{1}{1 + \frac{26500 \cdot \frac{10,4 \cdot 1,8^3}{12}}{26500 \cdot \frac{0,8 \cdot 6^3}{12}}} = 8,51 \text{ MNm} \quad (5.24)$$

Das äußere Moment infolge Eigengewichtsaktivierung entspricht unter Berücksichtigung der maximal aktivierbaren Bauteillänge:

$$\begin{aligned}
 M_G &= \gamma_c \cdot \left[\frac{A_{\text{ges,eff}} \cdot L_{\text{eff,max}}^2}{2} + A_{\text{zus}} \cdot \Delta L \cdot \left(L_{\text{eff,max}} + \frac{\Delta L}{2} \right) \right] \leq M_W \cdot \frac{I_{i,\text{eff}}}{I_W} \\
 &= 0,025 \cdot \frac{(10,4 \cdot 1,8 + 0,8 \cdot 6) \cdot 7,5^2}{2} = 16,54 \text{ MNm} \leq 8,51 \cdot \frac{77,56}{\frac{0,8 \cdot 6^3}{12}} = 45,85 \text{ MNm} \\
 &\text{mit: } I_{i,\text{eff}} = 77,56 \text{ m}^4 \\
 &\text{und: } z_{i,\text{eff}} = 0,10 \text{ m}
 \end{aligned} \tag{5.25}$$

$$\begin{aligned}
 L_{\text{eff,max}} &= \sqrt{\frac{2 \cdot M_W}{\gamma_c \cdot A_{\text{ges,eff}}} \cdot \frac{I_{i,\text{eff}}}{I_W} + \frac{A_{\text{zus}}}{A_{\text{ges,eff}}} \cdot \Delta L^2 \cdot \left(\frac{A_{\text{zus}}}{A_{\text{ges,eff}}} - 1 \right) - \frac{A_{\text{zus}}}{A_{\text{ges,eff}}} \cdot \Delta L} \leq x \\
 &= \sqrt{\frac{2 \cdot 8,51}{0,025 \cdot (10,4 \cdot 1,8 + 0,8 \cdot 6)} \cdot \frac{77,56}{\frac{0,8 \cdot 6^3}{12}}} = 12,49 \text{ m} \leq 15/2 = 7,5 \text{ m}
 \end{aligned} \tag{5.26}$$

Die Spannungsverteilung im gedachten Verformungsruehpunkt der Wand kann über die Spannung an Wandfuß und Wandkopf eindeutig beschrieben werden:

$$\begin{aligned}
 \sigma_{W,u} &= \frac{N_W}{A_W} + \frac{M_W}{I_W} \cdot z_{W,u} - \frac{M_G}{I_{i,\text{eff}}} \cdot z_{i,u} = \\
 &= \frac{2,95}{0,8 \cdot 6} + \frac{8,51}{\frac{0,8 \cdot 6^3}{12}} \cdot 6/2 - \frac{16,54}{77,56} \cdot (-0,10) = 2,41 \text{ N/mm}^2 \\
 &\text{mit: } z_{i,u} = -0,10 \text{ m}
 \end{aligned} \tag{5.27}$$

$$\begin{aligned}
 \sigma_{W,o} &= \frac{N_W}{A_W} + \frac{M_W}{I_W} \cdot z_{W,o} - \frac{M_G}{I_{i,\text{eff}}} \cdot z_{i,o} = \\
 &= \frac{2,95}{0,8 \cdot 6} + \frac{8,51}{\frac{0,8 \cdot 6^3}{12}} \cdot (-6/2) - \frac{16,54}{77,56} \cdot (-6,10) = 0,14 \text{ N/mm}^2 \\
 &\text{mit: } z_{i,o} = -6,10 \text{ m}
 \end{aligned} \tag{5.28}$$

Die Nachweisstelle kann ingenieurmäßig abgeschätzt werden:

$$\begin{aligned}
 h_1 &= 0,6 \cdot \frac{w_k}{\sigma_{W,u}/E_W} \leq \frac{h_W}{3} \\
 &= 0,6 \cdot \frac{0,20 \cdot 10^{-3}}{2,41/26500} = 1,32 \text{ m} \leq \frac{6}{3} = 2 \text{ m}
 \end{aligned} \tag{5.29}$$

Die Spannung an der Nachweisstelle beträgt:

$$\sigma_W(h_1) = \sigma_{W,u} - \frac{\sigma_{W,u} - \sigma_{W,o}}{h_W} \cdot h_1 = 2,41 - \frac{2,41 - 0,14}{6} \cdot 1,32 = 1,91 \text{ N/mm}^2 \tag{5.30}$$

Die Spannungsverteilung über die Wandhöhe ist in der nachfolgenden Abbildung ersichtlich. Dargestellt ist der Spannungsanteil aus den inneren Zwangsschnittgrößen infolge Querschnittskompatibilität zwischen Bodenplatte und Wand, der Spannungsanteil aus dem äußeren Moment infolge Eigengewichtsaktivierung in Längsrichtung und die daraus resultierende Spannungsverteilung. Die Spannung an der Nachweisstelle kann ebenfalls abgelesen werden.

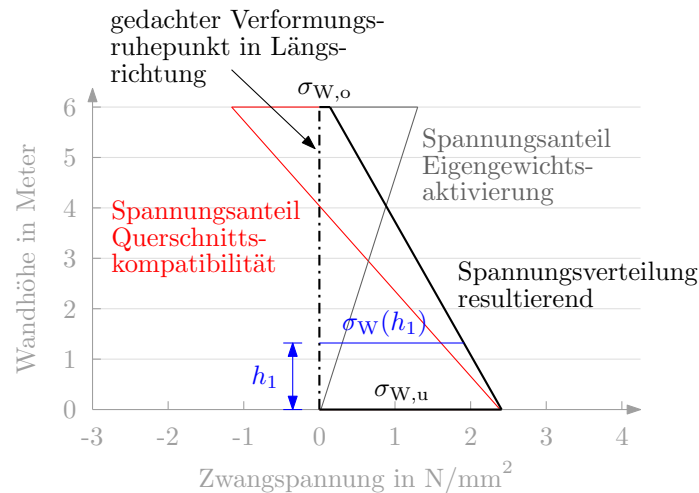


Abb. 5.4: Spannungsverteilung über die Wandhöhe

Für die zugehörige Zugfestigkeit zum Bemessungszeitpunkt gilt:

$$\begin{aligned} f_{ct,zugh,W} &= f_{ctm} \cdot \left(1,3 - \frac{1}{1 + b_W}\right) \leq f_{ctm} \\ &= 3,05 \cdot \left(1,3 - \frac{1}{1 + 0,8}\right) = 2,27 \text{ N/mm}^2 \leq 3,05 \text{ N/mm}^2 \end{aligned} \quad (5.31)$$

Für Rissbildung in der Wand liegt der Makrorissindex bei:

$$\frac{\sigma_W(h_1)}{f_{ct,zugh,W}} = \frac{1,91}{2,27} = 0,84 \leq 1,0 \quad (5.32)$$

Der Nachweis zum Ausschluss von Trennrissen in der Wand kann mit einer Sicherheit von ca. 1,19 erbracht werden.

5.2.2 Erforderliche Mindestbewehrung zur Begrenzung der Rissbreite

Eine konstruktive Mindestbewehrung ist stets vorzusehen. Die erforderliche Bewehrungsmenge pro Bauteiloberfläche und Richtung beträgt:

$$a_{s,\min,\text{erf}} = 0,07 \cdot b_W \cdot \frac{f_{ctm}}{f_{yk}} = 0,07 \cdot 0,8 \cdot \frac{3,05}{550} \cdot 10^4 = 3,11 \text{ cm}^2/\text{m} \quad (5.33)$$

Die gewählte Bewehrung pro Bauteiloberfläche und Richtung entspricht:

$$a_{s,\min,\text{gew}} = 3,35 \text{ cm}^2/\text{m} \quad \emptyset 8/15$$

6 Bewehrungsermittlung „WW optimiert“ allgemein, $L = 15$ m

Dieses Kapitel veranschaulicht die Anwendung des Bemessungsverfahrens „Numerische Simulation“ zum neu eingeführten Bemessungsmodell „Weiße Wanne optimiert“. Die Reihenfolge und der Inhalt der nachfolgenden Abschnitte folgt der Beschreibung der Vorgehensweise in Abs. 3.4.1. Die Empfehlungen in [14] werden im Zuge der Ausarbeitung berücksichtigt.

Bemessen wird das in Kapitel 2 beschriebene Untersuchungsbeispiel mit einem Dehnfugenabstand von 15 m. Laut Tab. 1.1 entfällt bei Dehnfugenabständen ≤ 15 m der Nachweis „später Zwang“. Aus diesem Grund werden die Simulationsergebnisse im Nutzungszeitraum bei der Bemessung nicht mitberücksichtigt und der Vollständigkeit halber als Zusatz in Abs. 6.4 angeführt.

Die Überprüfung der allgemeinen Voraussetzungen für die Anwendbarkeit des Bemessungsmodells „Weiße Wanne optimiert“ erfolgte bereits in Kapitel 5. Für den konkreten Fall sind alle Anwendungsvoraussetzungen erfüllt.

6.1 Berechnungsmodell

Abb. 6.1, Abb. 6.2 und Abb. 6.3 zeigen die verwendeten Materialmodelle im Erhärungszeitraum. Dazu zählen das Materialmodell zur Wärmeentwicklung, zur Entwicklung des Elastizitätsmoduls und zur Entwicklung der Zugfestigkeit des Betons infolge Betonerhärtung. Die gewählten Parameter zur Anpassung der in Abs. 3.4.4 genannten Ansätze an die Messwerte sind ebenfalls angeführt. Um die Simulationsergebnisse auf der sicheren Seite zu erhalten, wird bei der Anpassung darauf geachtet, dass das Materialmodell zur Wärmeentwicklung und zur Entwicklung des Elastizitätsmoduls die Messwerte nicht unterschätzt und zur Entwicklung der Zugfestigkeit die Messwerte nicht überschätzt. Die Implementierung der Materialmodelle erfolgt elementweise (siehe Abs. 3.4.2).

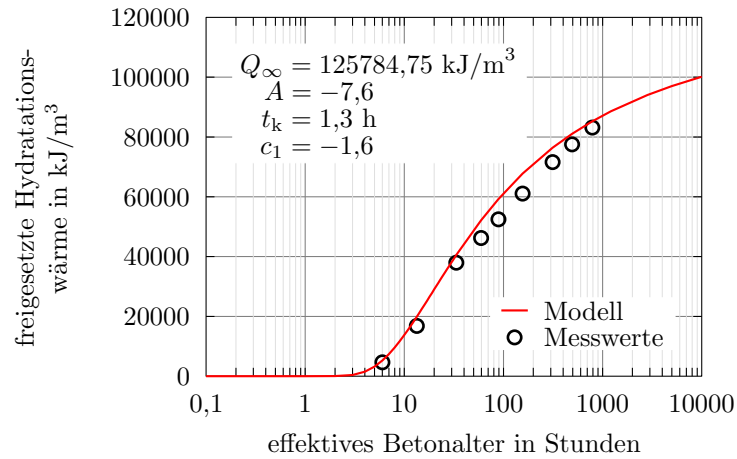


Abb. 6.1: Materialmodell zur Wärmeentwicklung des Betons infolge Betonerhärtung

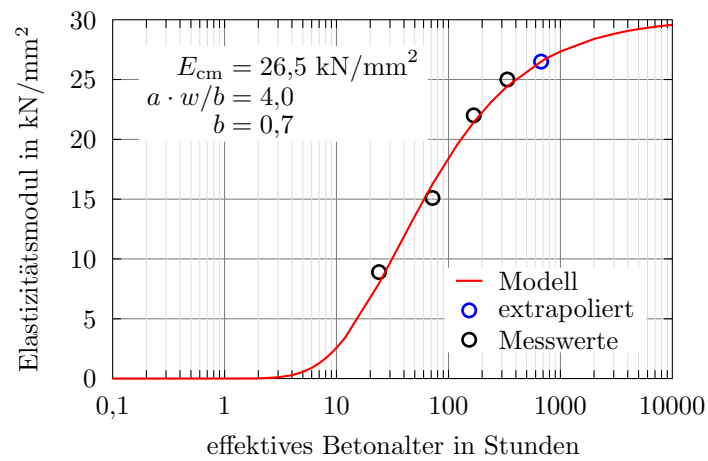


Abb. 6.2: Materialmodell zur Entwicklung des Elastizitätsmoduls des Betons infolge Betonerhärtung

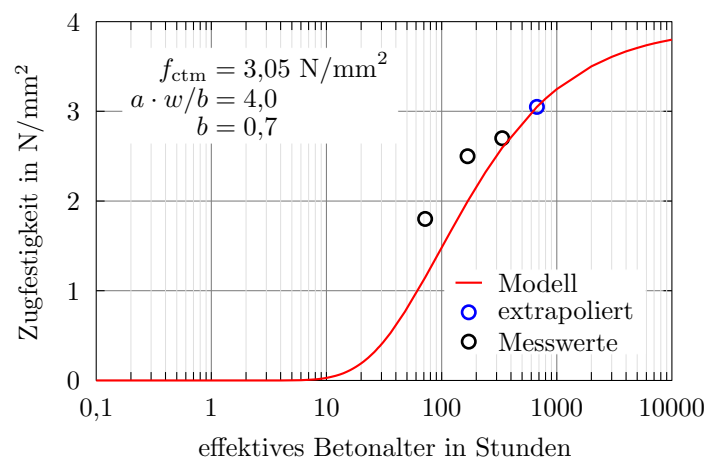


Abb. 6.3: Materialmodell zur Entwicklung der Zugfestigkeit des Betons infolge Betonerhärtung

Im Nachfolgenden wird auf die thermomechanischen Berechnungsmodelle für die Bodenplatte und die Wand näher eingegangen. Bei beiden Bauteilen wird zwischen dem Modell im Erhärtungszeitraum und dem Modell im Nutzungszeitraum unterschieden. Da im Nutzungszeitraum das fertiggestellte Bauwerk betrachtet wird, liefert das zugehörige Modell sowohl Ergebnisse für die Bodenplatte als auch für die Wand. Schlussendlich werden also drei verschiedene Berechnungsmodelle beschrieben.

6.1.1 Bodenplatte

Modell Erhärtungszeitraum

Abb. 6.4 (links) zeigt das Berechnungsmodell für die Bodenplatte im Erhärtungszeitraum. Es wird die Symmetrie des Untersuchungsbeispiels in x und y ausgenutzt, weshalb lediglich ein Viertel des gesamten Bauwerks abgebildet wird. Die Diskretisierung des Bodenkörpers und der Bodenplatte erfolgt mit Volumenelementen. Der Bodenkörper wird mit seitlichem Überstand modelliert, um die thermischen Randbedingungen realitätsnah darzustellen. Die lagenweise Herstellung der Bodenplatte wird in der Simulation vernachlässigt. Es wird davon ausgegangen, dass zum Betoneinbauzeitpunkt das gesamte Massenbetonbauteil eingebaut wird. Des Weiteren wird auf eine sinnvolle Elementteilung geachtet (siehe Abs. 3.4.3). Daher wird für die Randbereiche der Bodenplatte eine feinere Diskretisierung gewählt als für den Mittenbereich. Die geometrischen Abmessungen sind in Tab. 2.1 angeführt.

An den Bereichen, an denen klimatische Randbedingungen vorherrschen, werden Flächenelemente modelliert. Dies gilt sowohl für die Oberseite und die Schalseiten der Bodenplatte als auch für die Oberseite des Bodenkörpers. Die Art und Dauer der zu berücksichtigenden klimatischen Randbedingungen sind in Abb. 6.4 (links) ersichtlich.

Die Lagerung des Bauteils in horizontaler Richtung erfolgt durch die Festhaltung aller Knoten in den Symmetrieebenen normal zu diesen. In der Lagerfuge werden nichtlineare Bettungsfedern in Eigengewichtsrichtung angeordnet. Dadurch kann sich die Verkrümmungsbehinderung erst mit zunehmendem Randabstand aufgrund der fortschreitenden Aktivierung des Eigengewichts aufbauen. Um die horizontale Wechselwirkung der Bodenplatte mit dem Baugrund im Modell zu erfassen, werden zusätzlich 2D-Scheibenelemente mit starrer Kopplung an der Bodenplattenunterseite vorgesehen.

Im Erhärtungszeitraum wird die zeitliche Entwicklung der spannungsunabhängigen Materialeigenschaften berücksichtigt. Die Materialkenngrößen (Tab. 2.2), die erweiterten Materialkenngrößen (Tab. 2.3), die klimatischen Randbedingungen und die thermischen Kenngrößen (Tab. 2.4) können Kapitel 2 entnommen werden.

Die Simulationsergebnisse werden an den drei maßgebenden Materialpunkten (Auswertungsknoten: unten, mitte, oben), welche sich entlang der Schnittgeraden der Symmetrieebenen befinden, ausgegeben.

Modell Nutzungszeitraum

Abb. 6.4 (rechts) zeigt das Berechnungsmodell für die Bodenplatte im Nutzungszeitraum. Im Nutzungszeitraum erfolgt die numerische Simulation am fertiggestellten Bauwerk. Es handelt sich dabei um das Berechnungsmodell für die Wand im Erhärtungszeitraum unter Berücksichtigung der Hinterfüllung der Stahlbetonkonstruktion. Dazu wird der mit Volumenelementen modellierte Bodenkörper für die thermische Berechnung an der Außenseite der Konstruktion über die Bodenplatten- und Wandhöhe erweitert. Der Bodenüberstand in Längsrichtung wird nicht abgebildet, da das Modell im Nutzungszeitraum aufgrund der geplanten Aneinanderreihung der Wannenblöcke eine zusätzliche Symmetrieebene in x aufweist.

Dies hat außerdem zur Folge, dass die klimatischen Randbedingungen nur an der Oberseite der Bodenplatte, der Wand und des Bodenkörpers und an der Innenseite der Wand zu berücksichtigen sind. Die Art und Dauer der zu berücksichtigenden klimatischen Randbedingungen sind in Abb. 6.4 (rechts) ersichtlich.

Die horizontale Wechselwirkung der Bodenplatte mit dem Baugrund wird im Modell mit abgebildet.

Im Gegensatz zum Erhärtungszeitraum wird im Nutzungszeitraum von konstanten mechanischen Materialeigenschaften im Zeitverlauf ausgegangen. Die Hydratationswärmeabfuhr und die autogene Schwindeinwirkung entfallen. Zur Ermittlung der sich im Nutzungszeitraum aufbauenden Zwangbeanspruchung zu einem bestimmten Zeitpunkt ist die Kenntnis der absoluten Größe der Verformungseinwirkung (Temperaturdehnung) zu diesem Zeitpunkt erforderlich. Dazu muss das entsprechende Temperaturfeld bekannt sein. Dieses lässt sich nur mit einer zeitschrittbasierter numerischer Simulation ermitteln. Demnach ist auch bei konstanten mechanischen Materialeigenschaften die zeitschrittbasierter Betrachtung unumgänglich. Die Materialkenngrößen (Tab. 2.2), die erweiterten Materialkenngrößen (Tab. 2.3), die klimatischen Randbedingungen und die thermischen Kenngrößen (Tab. 2.4) können Kapitel 2 entnommen werden.

Die Simulationsergebnisse werden an den drei maßgebenden Materialpunkten (Auswertungsknoten: unten, **mitte**, **oben**), welche sich entlang der Schnittgeraden der Symmetrieebenen befinden, ausgegeben.

6.1.2 Wand

Modell Erhärungszeitraum

Abb. 6.5 (links) zeigt das Berechnungsmodell für die Wand im Erhärungszeitraum. Es wird die Symmetrie des Untersuchungsbeispiels in x und y ausgenutzt, weshalb lediglich ein Viertel des gesamten Bauwerks abgebildet wird. Die Diskretisierung des Bodenkörpers, der Bodenplatte und der Wand erfolgt mit Volumenelementen. Der Bodenkörper wird mit Überstand in Längsrichtung modelliert, um die thermischen Randbedingungen realitätsnah darzustellen. Die lagenweise Herstellung der Wand wird in der Simulation vernachlässigt. Es wird davon ausgegangen, dass zum Betoneinbauzeitpunkt das gesamte Massenbetonbauteil hergestellt ist. Des Weiteren wird auf eine sinnvolle Elementteilung geachtet (siehe Abs. 3.4.3). Daher wird für die Randbereiche eine feinere Diskretisierung gewählt als für die Mittenbereiche. Die geometrischen Abmessungen sind in Tab. 2.1 angeführt.

An den Bereichen, an denen klimatische Randbedingungen vorherrschen, werden Flächenelemente modelliert. Dazu zählen die Oberseite des Bodenkörpers, die Oberseite und die Seitenflächen der Bodenplatte und die Oberseite und die Schalseiten der Wand. Die Art und Dauer der zu berücksichtigenden klimatischen Randbedingungen sind in Abb. 6.5 (links) ersichtlich.

Die Lagerung der Bauteile in horizontaler Richtung erfolgt durch die Festhaltung aller Knoten in den Symmetriefflächen normal zu diesen. In der Lagerfuge werden nichtlineare Bettungsfedern in Eigengewichtsrichtung angeordnet.

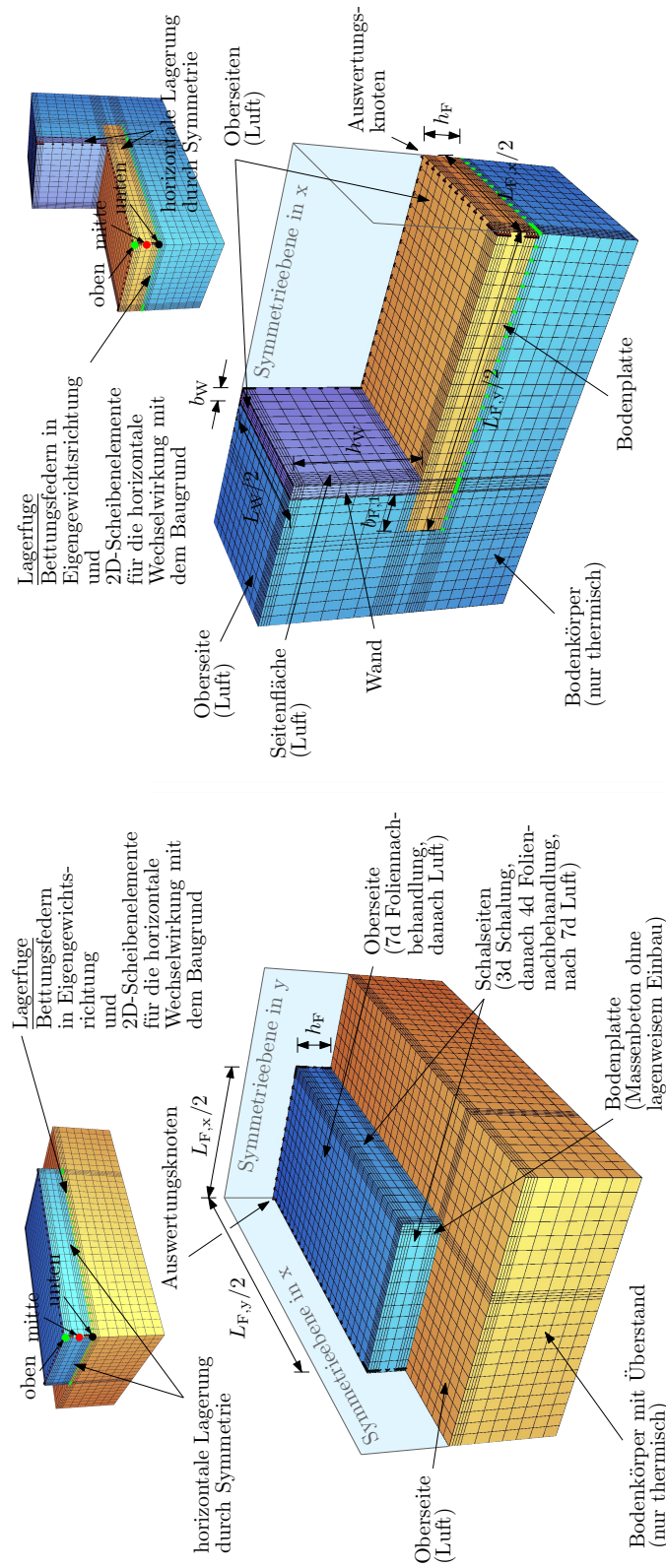
Im Erhärungszeitraum wird die zeitliche Entwicklung der spannungsunabhängigen Materialeigenschaften berücksichtigt. Bei der Bodenplatte wird von konstanten mechanischen Materialeigenschaften im Zeitverlauf ausgegangen. Die Materialkenngrößen (Tab. 2.2), die erweiterten Materialkenngrößen (Tab. 2.3), die klimatischen Randbedingungen und die thermischen Kenngrößen (Tab. 2.4) können Kapitel 2 entnommen werden.

Die Simulationsergebnisse werden an den vier maßgebenden Materialpunkten (Auswertungsknoten: #1, #2, #3, #4), welche sich entlang der Schnittgeraden der Schwerebene der Wand und der Symmetrieebene in x befinden, ausgegeben.

Modell Nutzungszeitraum

Abb. 6.5 (rechts) zeigt das Berechnungsmodell für die Wand im Nutzungszeitraum. Wie bereits erwähnt entspricht das Berechnungsmodell dem in Abs. 6.1.1 beschriebenen Modell im Nutzungszeitraum. Der einzige Unterschied betrifft die Lage der Auswertungsknoten.

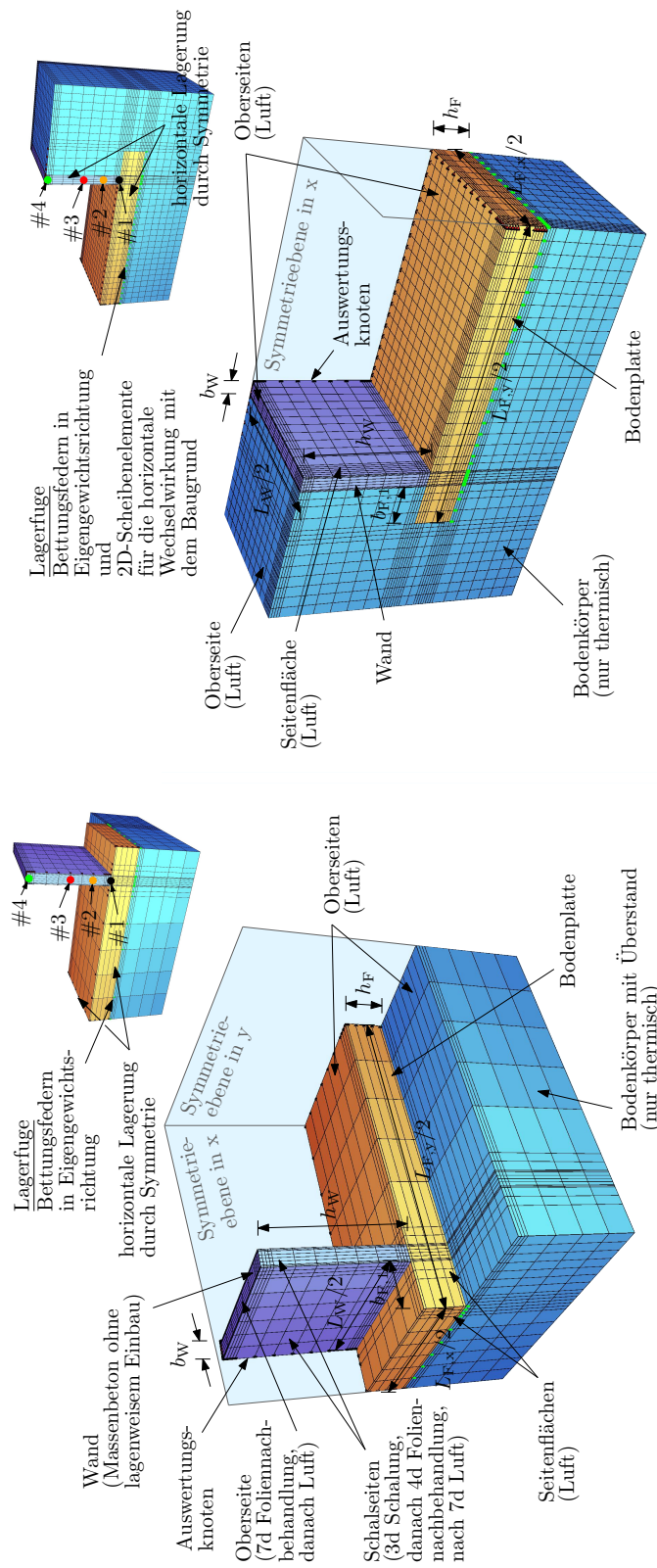
Die Simulationsergebnisse werden an den vier maßgebenden Materialpunkten (Auswertungsknoten: #1, #2, #3, #4), welche sich entlang der Schnittgeraden der Schwerebene der Wand und der Symmetrieebene in x befinden, ausgegeben.



(b) Modell Nutzungszeitraum

(a) Modell Erhärtungszeitraum

Abb. 6.4: Berechnungsmodelle Bodenplatte



(a) Modell Erhärtungszeitraum

(b) Modell Nutzungszeitraum

Abb. 6.5: Berechnungsmodelle Wand

6.2 Simulationsergebnisse

In dieser Arbeit handelt es sich bei den dargestellten Simulationsergebnissen um Knotenwerte und nicht um mittlere Elementwerte.

6.2.1 Bodenplatte

Die im Nachfolgenden abgebildeten Simulationsergebnisse werden mit dem in Abb. 6.4 (links) dargestellten thermomechanischen Berechnungsmodell gewonnen.

6.2.1.1 Temperaturen

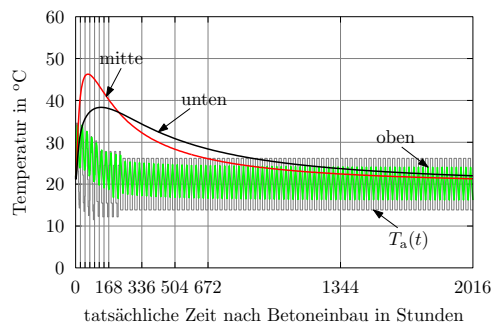


Abb. 6.6: Temperatur Bodenplatte

6.2.1.2 Spannungen

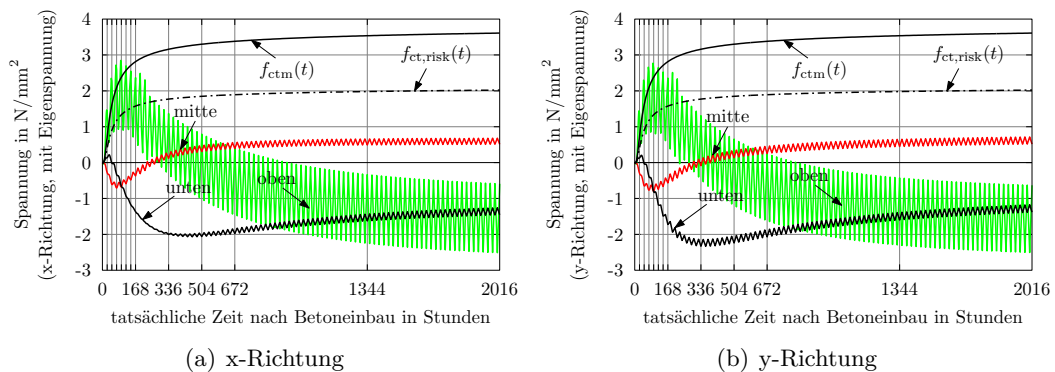


Abb. 6.7: Spannung mit Eigenspannung Bodenplatte

Die in den nachfolgenden Diagrammen abgebildeten eigenspannungsfreien Spannungsverläufe entsprechen den Ergebniswerten an der Plattenunterseite, der Plattenmitte und der Plattenoberseite. Die Spannungsverläufe repräsentieren den konstanten und die linearen Anteile der Zwangspannungsverteilung im maßgebenden Querschnitt.

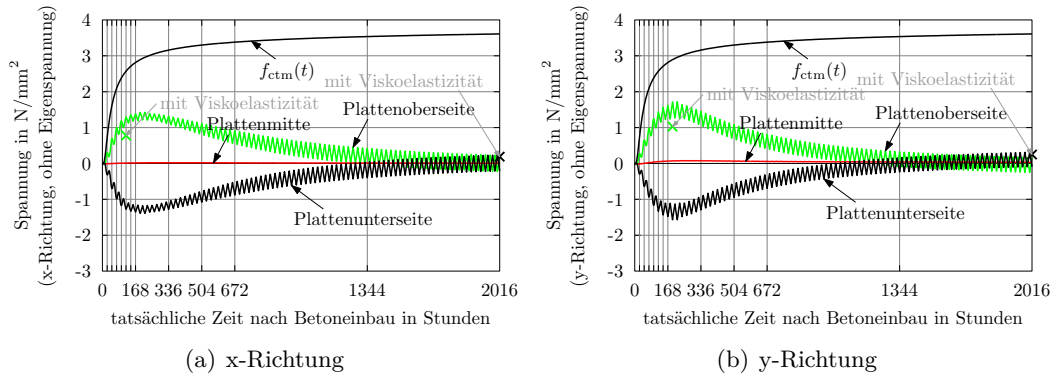


Abb. 6.8: Spannung ohne Eigenspannung Bodenplatte

6.2.1.3 Rissgefahr

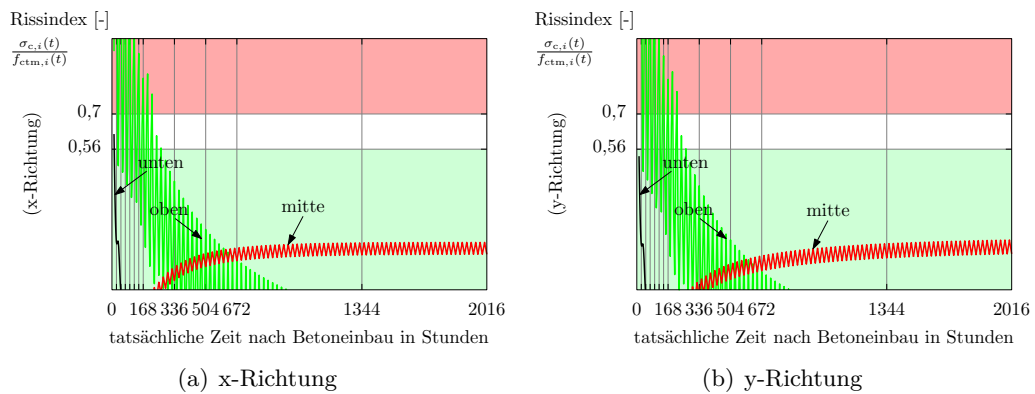


Abb. 6.9: Rissindex Bodenplatte

Der Auswertung des allgemeinen Rissindex ist zu entnehmen, dass an der Oberseite zu einem sehr frühen Zeitpunkt mit Mikrorissen und etwaigen lokal begrenzten Schalenrissen zu rechnen ist.

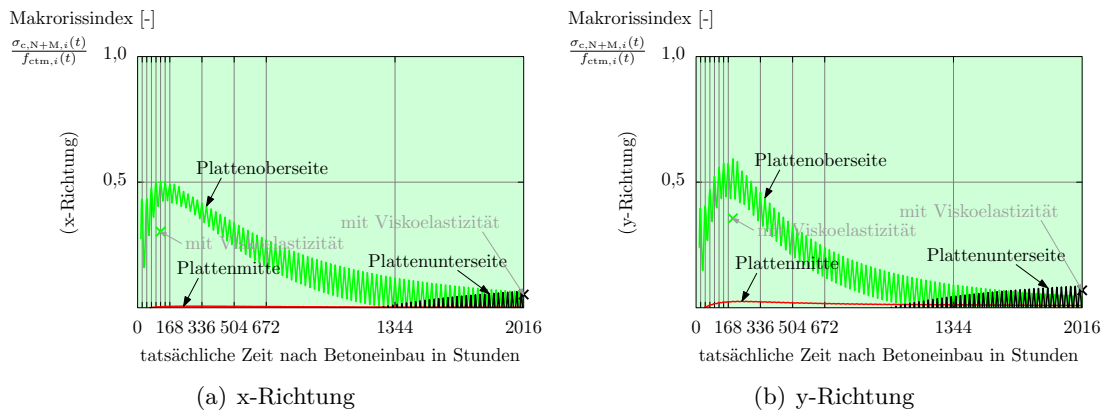


Abb. 6.10: Makrorissindex Bodenplatte

Die Diagramme zum Makrorissindex zeigen, dass Biegerisse und Trennrisse in der Bodenplatte ausgeschlossen werden können.

6.2.2 Wand

Die im Nachfolgenden abgebildeten Simulationsergebnisse werden mit dem in Abb. 6.5 (links) dargestellten thermomechanischen Berechnungsmodell gewonnen.

6.2.2.1 Temperaturen

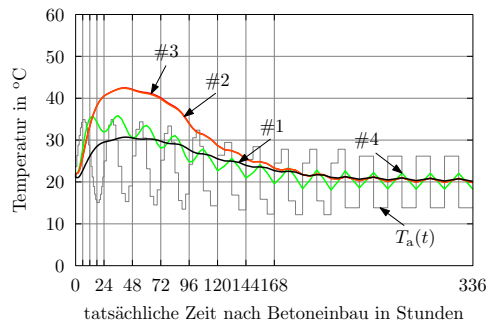


Abb. 6.11: Temperatur Wand

6.2.2.2 Spannungen

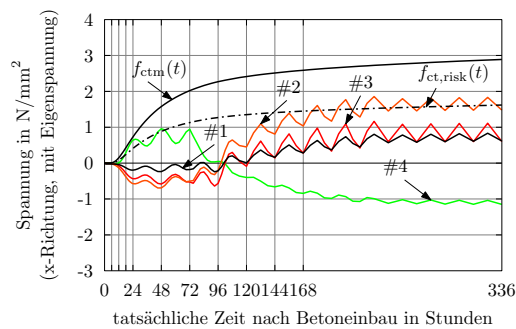


Abb. 6.12: Spannung mit Eigenspannung Wand

Die im nachfolgenden Diagramm abgebildeten eigenspannungsfreien Spannungsverläufe entsprechen den Ergebniswerten an den vier Eckpunkten der Wand. Die Spannungsverläufe repräsentieren den konstanten und die linearen Anteile der Zwangspannungsverteilung im maßgebenden Querschnitt.

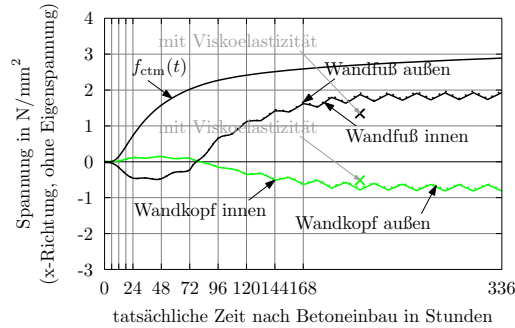


Abb. 6.13: Spannung ohne Eigenspannung Wand

6.2.2.3 Rissgefahr

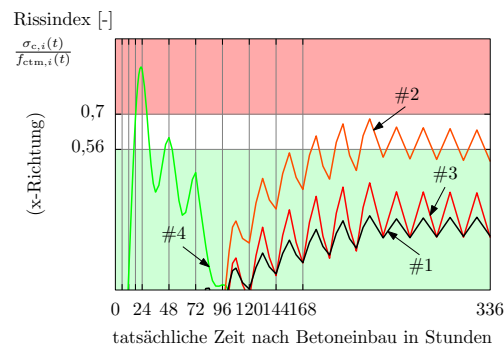


Abb. 6.14: Rissindex Wand

Der Auswertung des allgemeinen Rissindex ist zu entnehmen, dass an der Oberseite zu einem sehr frühen Zeitpunkt mit Mikrorissen zu rechnen ist.

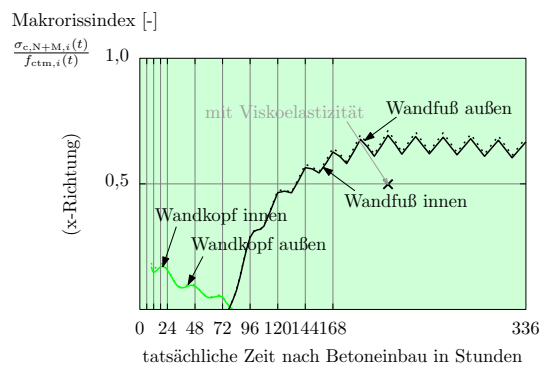


Abb. 6.15: Makrorissindex Wand

Das Diagramm zum Makrorissindex zeigt, dass Trennrisse in der Wand ausgeschlossen werden können.

6.3 Erforderliche Mindestbewehrung zur Begrenzung der Rissbreite

Bodenplatte

Eine konstruktive Mindestbewehrung ist stets vorzusehen. Die erforderliche Bewehrungsmenge pro Bauteiloberfläche und Richtung beträgt:

$$a_{s,\min,\text{erf}} = 0,07 \cdot h_F \cdot \frac{f_{ctm}}{f_{yk}} = 0,07 \cdot 1,8 \cdot \frac{3,05}{550} \cdot 10^4 = 6,99 \text{ cm}^2/\text{m} \quad (6.1)$$

Die gewählte Bewehrung pro Bauteiloberfläche und Richtung entspricht:

$$a_{s,\min,\text{gew}} = 7,85 \text{ cm}^2/\text{m} \quad \text{Ø10/10}$$

Wand

Eine konstruktive Mindestbewehrung ist stets vorzusehen. Die erforderliche Bewehrungsmenge pro Bauteiloberfläche und Richtung beträgt:

$$a_{s,\min,\text{erf}} = 0,07 \cdot b_W \cdot \frac{f_{ctm}}{f_{yk}} = 0,07 \cdot 0,8 \cdot \frac{3,05}{550} \cdot 10^4 = 3,11 \text{ cm}^2/\text{m} \quad (6.2)$$

Die gewählte Bewehrung pro Bauteiloberfläche und Richtung entspricht:

$$a_{s,\min,\text{gew}} = 3,35 \text{ cm}^2/\text{m} \quad \text{Ø8/15}$$

6.4 Zusatzbetrachtung später Zwang

Die im Nachfolgenden abgebildeten Simulationsergebnisse werden mit den in Abb. 6.4 (rechts) und Abb. 6.5 (rechts) dargestellten thermomechanischen Berechnungsmodellen gewonnen.

- Jahresgang ohne Tagesgang

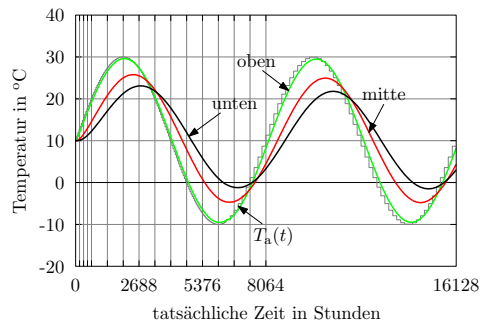


Abb. 6.16: Temperatur Bodenplatte

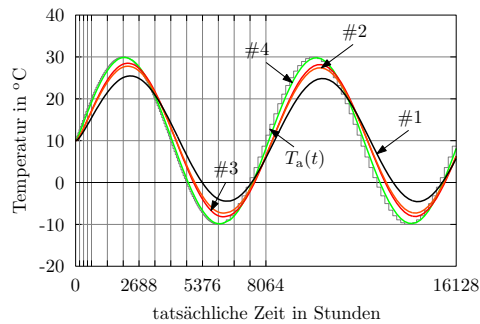


Abb. 6.17: Temperatur Wand

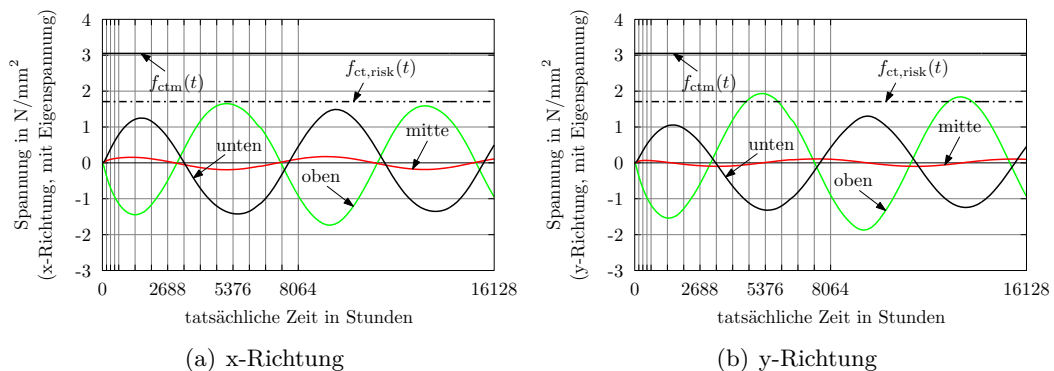


Abb. 6.18: Spannung mit Eigenspannung Bodenplatte

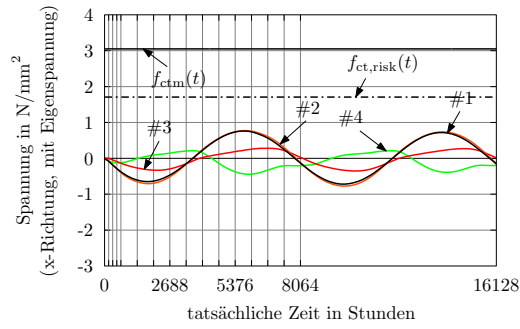


Abb. 6.19: Spannung mit Eigenspannung Wand

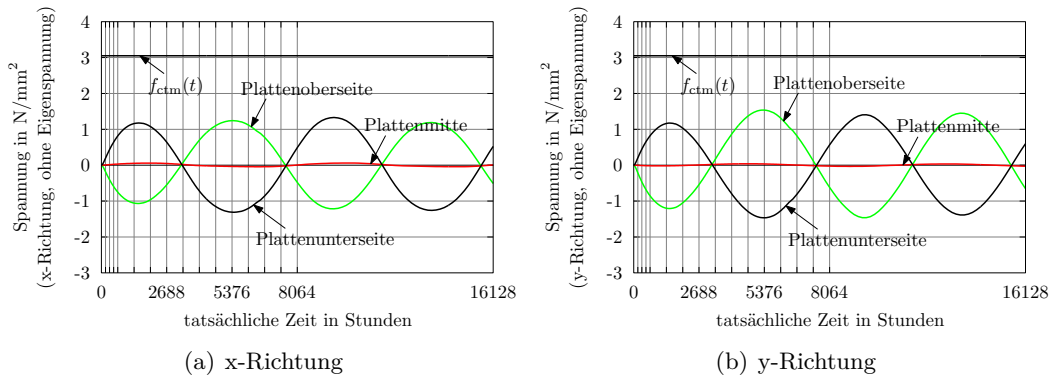


Abb. 6.20: Spannung ohne Eigenspannung Bodenplatte

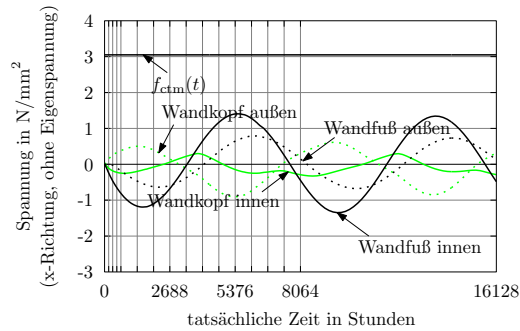


Abb. 6.21: Spannung ohne Eigenspannung Wand

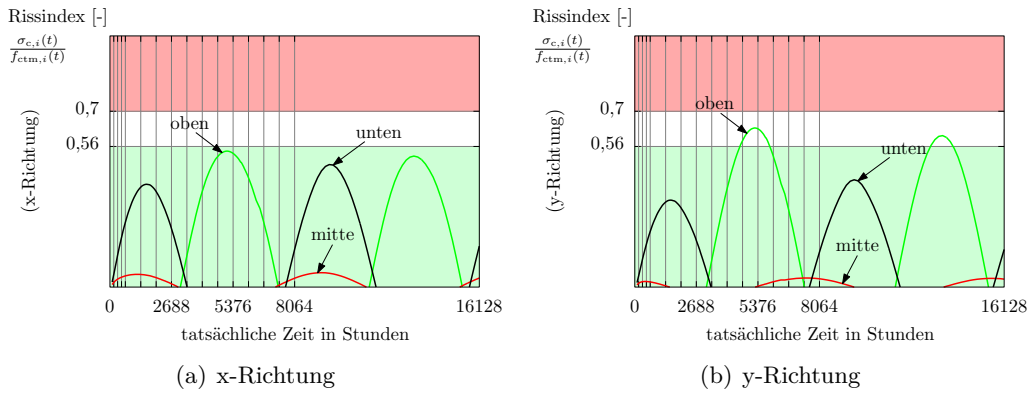


Abb. 6.22: Rissindex Bodenplatte

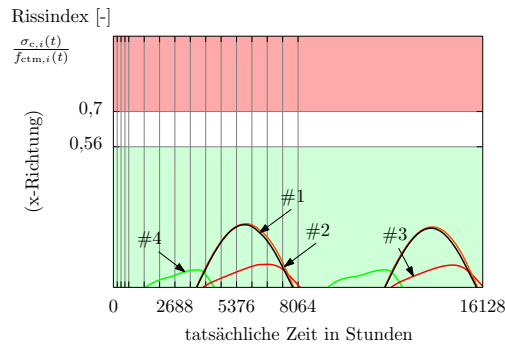


Abb. 6.23: Rissindex Wand

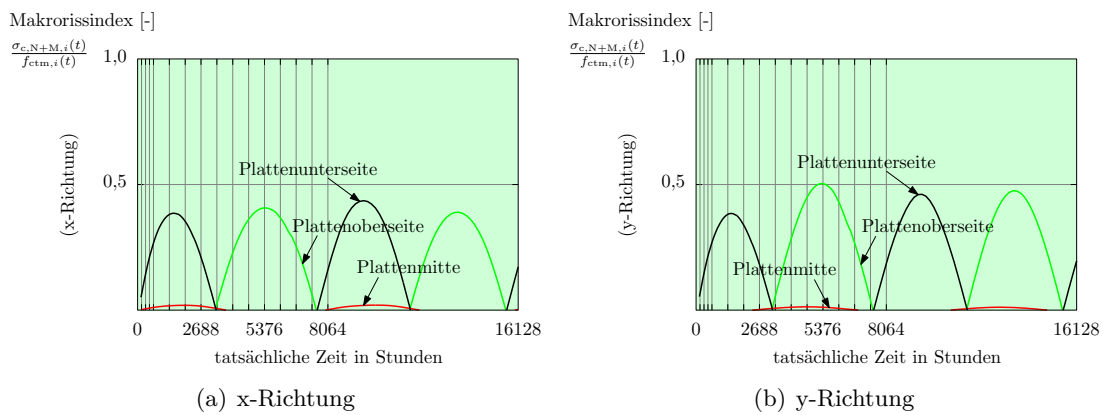


Abb. 6.24: Makrorissindex Bodenplatte

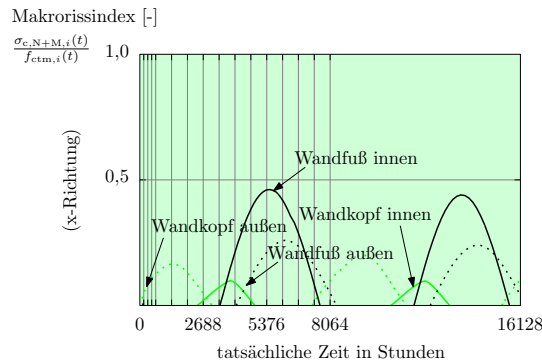


Abb. 6.25: Makrorissindex Wand

Die Simulationsergebnisse zeigen, dass sich das System zunächst einpendeln muss. Anschließend ist mit jährlich gleichen Ergebnisverläufen zu rechnen. Aufgrund der geringen Bedeutung des Einpendeleffekts für diese Arbeit wird nicht näher darauf eingegangen.

Die Spannungsverteilung über die Wandhöhe (ausschließlich später Zwang) zum ungünstigsten Zeitpunkt lässt erkennen, dass bei Dehnfugenabständen $\leq 15 \text{ m}$ die maximale Höhe mit auftretender Zugspannung über die volle Querschnittsbreite verhältnismäßig klein ist. Die Formierung von Makrorissen, ausgehend vom Wandfuß, mit einer Rissbreite, bei der die Dichtigkeit der Wanne beeinträchtigt werden würde, ist bei Zugspannungen bis zu dieser Wandhöhe auszuschließen. Grund dafür ist die schubfeste Verbindung zwischen Bodenplatte und Wand am Wandfuß. Die mögliche Anrisshöhe reicht im konkreten Fall nicht aus, um entsprechende Rissbreiten auszubilden. Die gesamte Zwangbeanspruchung (Überlagerung früher und später Zwang) ist aus demselben Grund nicht weiter relevant. Der späte Zwang hat keinen Einfluss auf die Dichtigkeit der Wanne. Damit bestätigt sich die Gültigkeit der in [14, S. 17] genannten Bedingung (siehe Tab. 1.1), dass bei Dehnfugenabständen $\leq 15 \text{ m}$ der Nachweis „später Zwang“ entfallen kann.

- Extremfall Sommer

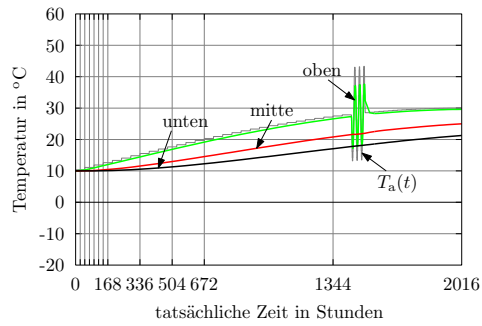


Abb. 6.26: Temperatur Bodenplatte

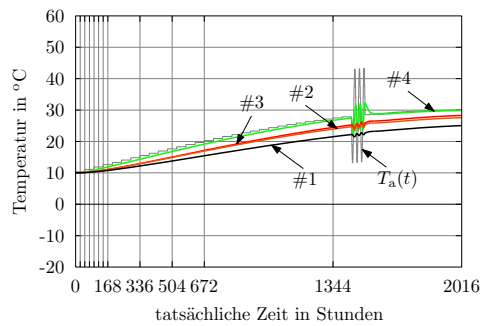


Abb. 6.27: Temperatur Wand

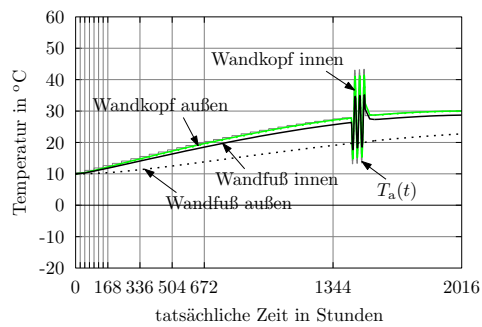


Abb. 6.28: Temperatur Wand

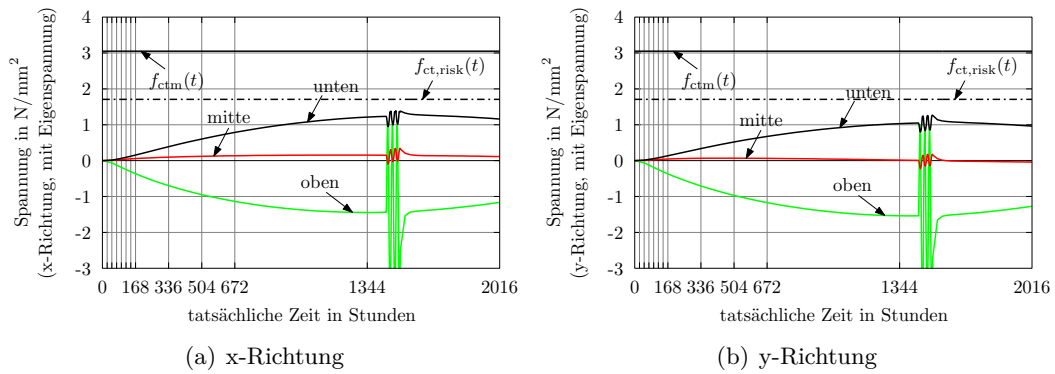


Abb. 6.29: Spannung mit Eigenspannung Bodenplatte

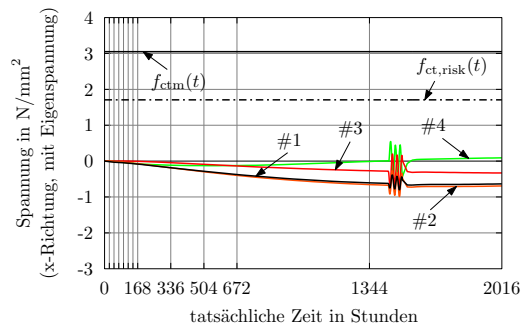


Abb. 6.30: Spannung mit Eigenspannung Wand

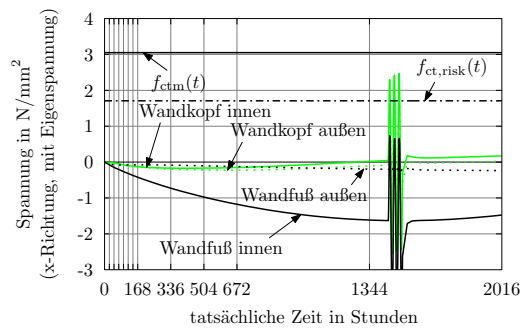


Abb. 6.31: Spannung mit Eigenspannung Wand

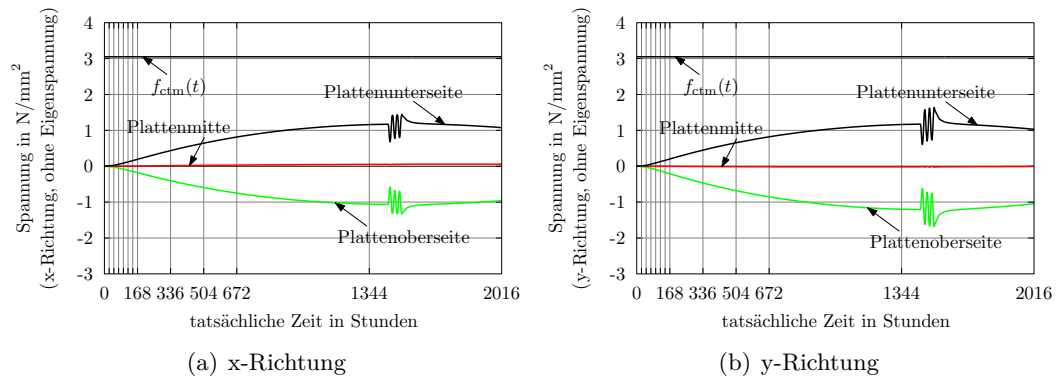


Abb. 6.32: Spannung ohne Eigenspannung Bodenplatte

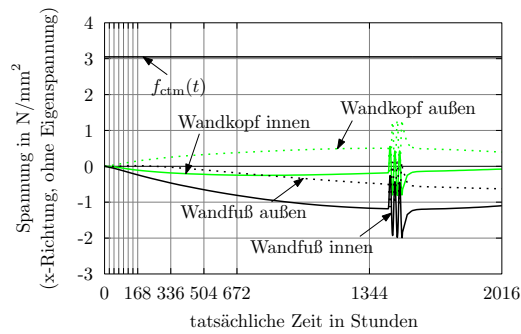


Abb. 6.33: Spannung ohne Eigenspannung Wand

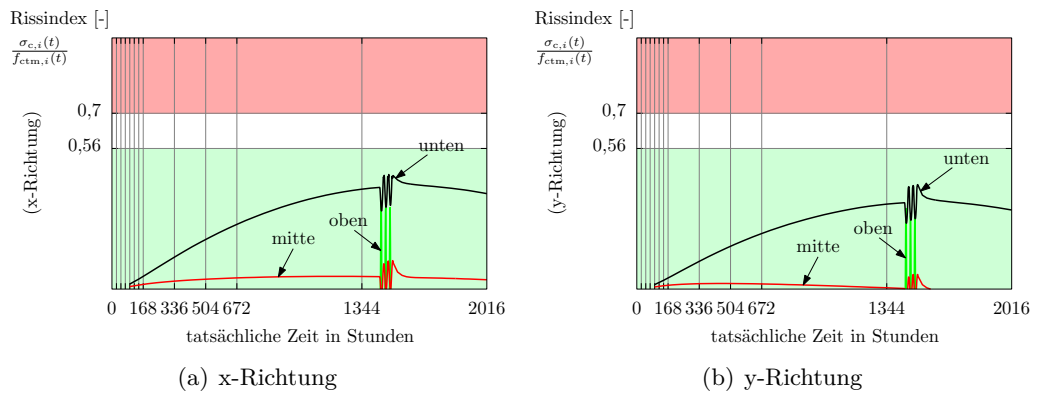


Abb. 6.34: Rissindex Bodenplatte

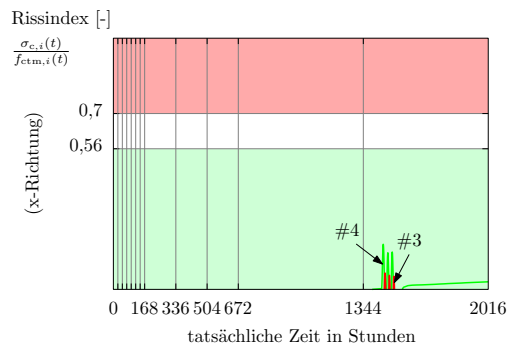


Abb. 6.35: Rissindex Wand

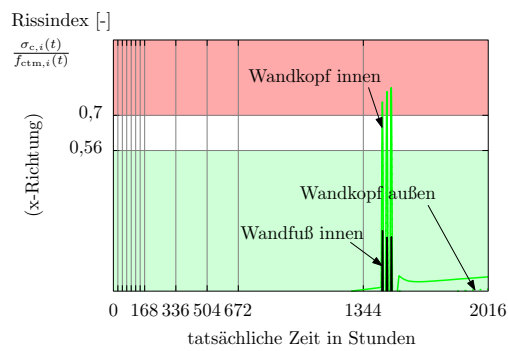


Abb. 6.36: Rissindex Wand

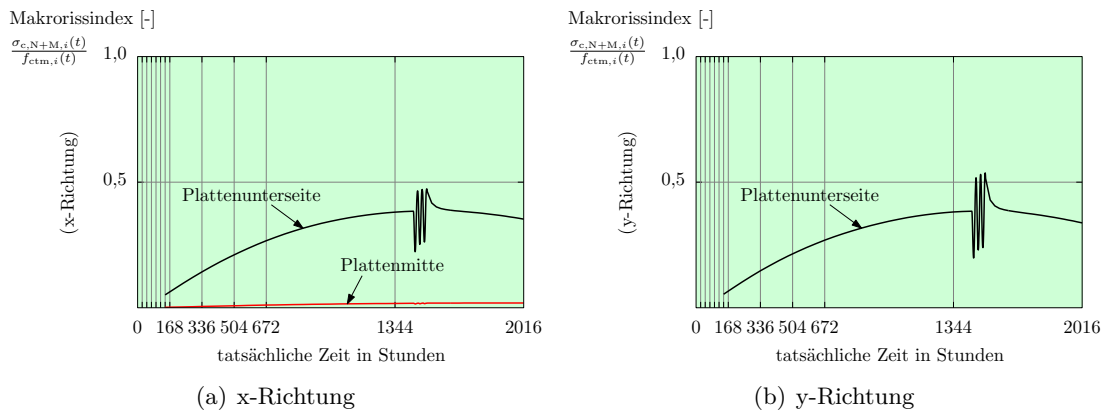


Abb. 6.37: Makrorissindex Bodenplatte

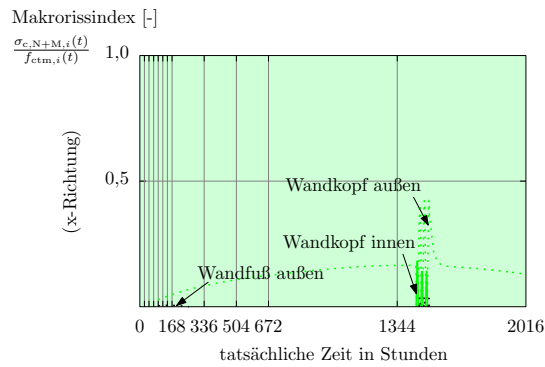


Abb. 6.38: Makrorissindex Wand

- Extremfall Winter

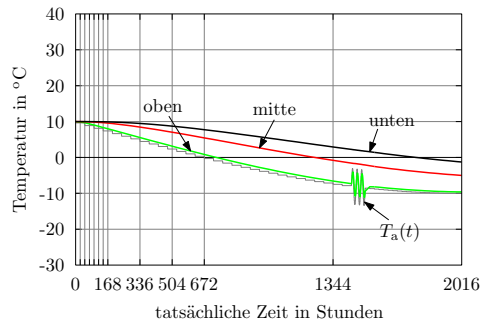


Abb. 6.39: Temperatur Bodenplatte

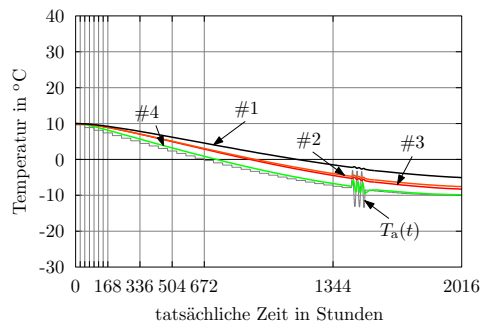


Abb. 6.40: Temperatur Wand

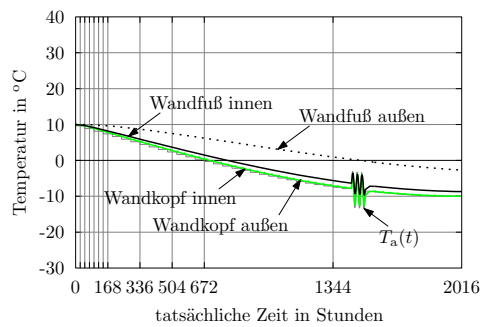


Abb. 6.41: Temperatur Wand

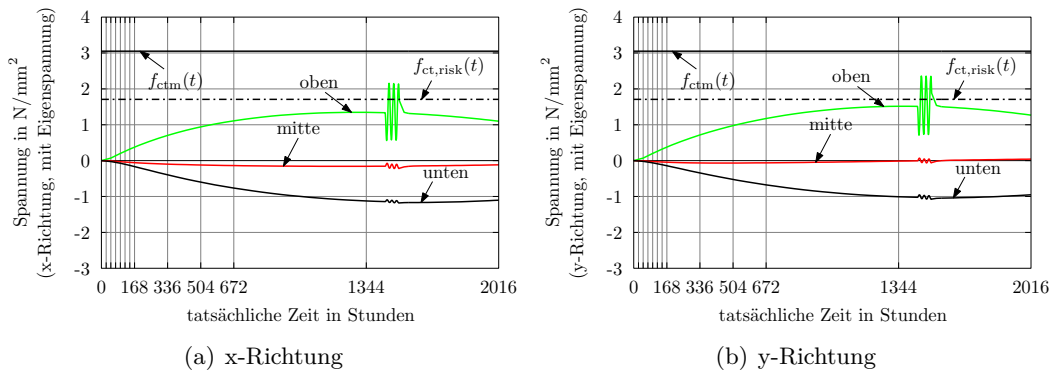


Abb. 6.42: Spannung mit Eigenspannung Bodenplatte

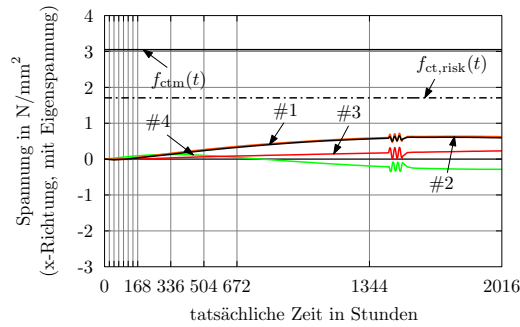


Abb. 6.43: Spannung mit Eigenspannung Wand

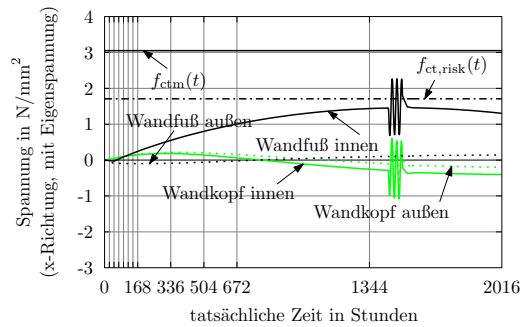


Abb. 6.44: Spannung mit Eigenspannung Wand

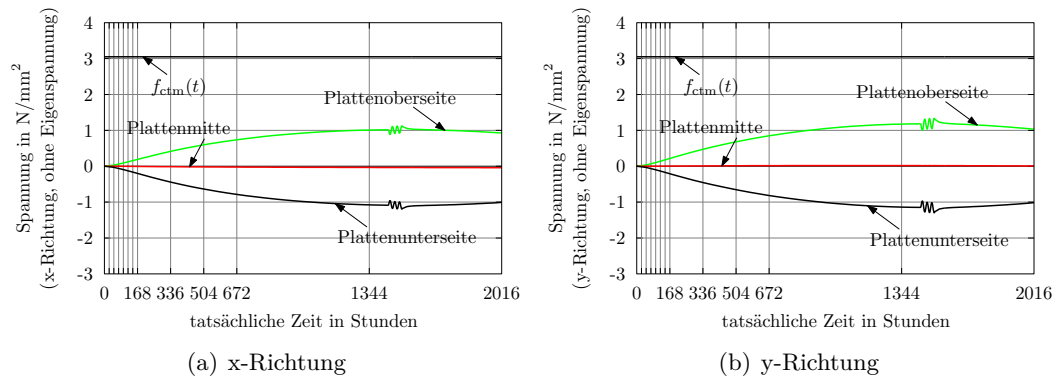


Abb. 6.45: Spannung ohne Eigenspannung Bodenplatte

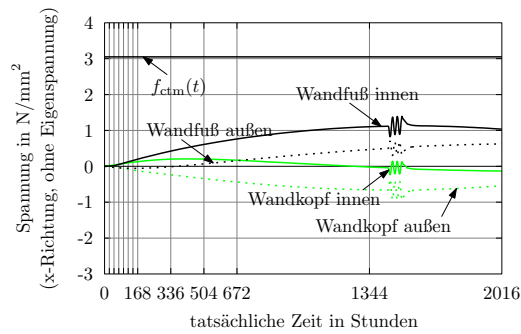


Abb. 6.46: Spannung ohne Eigenspannung Wand

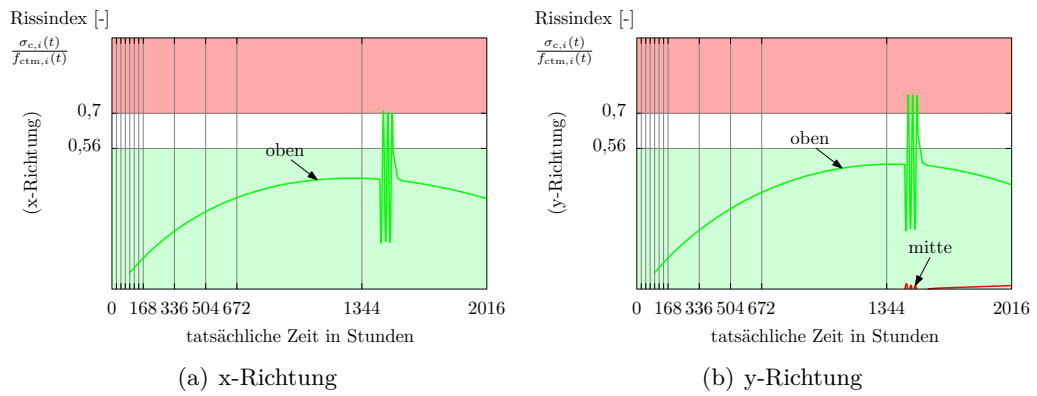


Abb. 6.47: Rissindex Bodenplatte

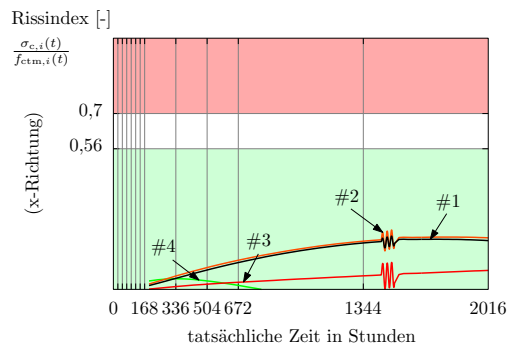


Abb. 6.48: Rissindex Wand

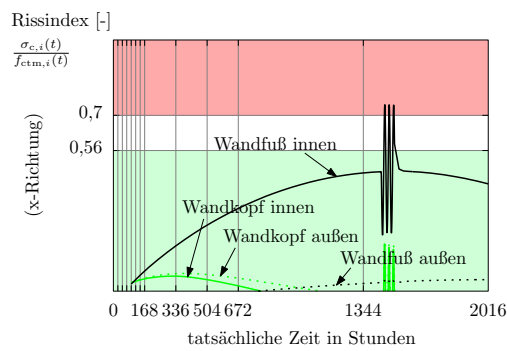


Abb. 6.49: Rissindex Wand

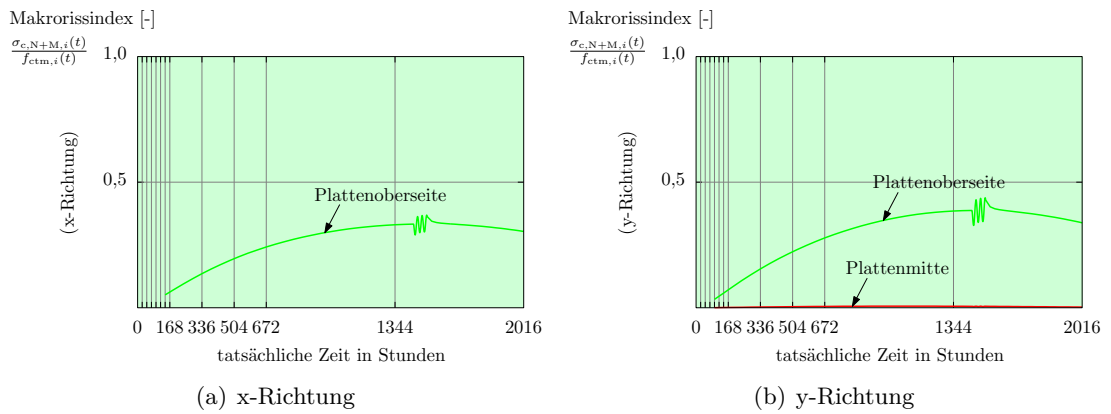


Abb. 6.50: Makrorissindex Bodenplatte

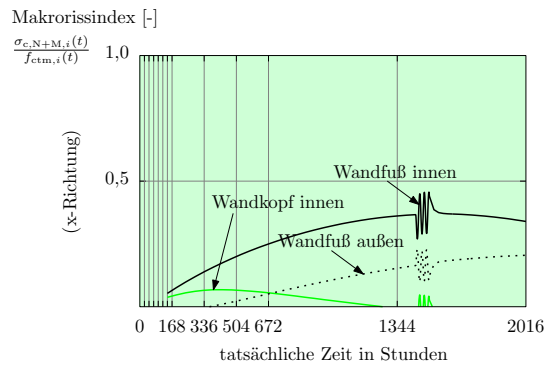


Abb. 6.51: Makrorissindex Wand

7 Bewehrungsermittlung „WW optimiert“ allgemein, $L = 30 \text{ m}$

In diesem Kapitel wird das in Kapitel 2 beschriebene Untersuchungsbeispiel erneut durch die Anwendung des Bemessungsverfahrens „Numerische Simulation“ zum neu eingeführten Bemessungsmodell „Weiße Wanne optimiert“ bemessen. Im Unterschied zur Ausführung in Kapitel 6 wird der Dehnfugenabstand auf 30 m verdoppelt.

Laut Tab. 1.1 muss nun der Nachweis „später Zwang“ ebenfalls geführt werden. Aus diesem Grund werden die Simulationsergebnisse im Nutzungszeitraum bei der Bemessung mitberücksichtigt. Die Auswertung erfolgt erneut grafisch mittels Diagrammen, welche sich aus den Simulationsergebnissen im Erhärungszeitraum und Nutzungszeitraum zusammensetzen.

7.1 Berechnungsmodell

Abb. 6.1, Abb. 6.2 und Abb. 6.3 in Kapitel 6 zeigen die verwendeten Materialmodelle im Erhärungszeitraum. Dazu zählen das Materialmodell zur Wärmeentwicklung, zur Entwicklung des Elastizitätsmoduls und zur Entwicklung der Zugfestigkeit des Betons infolge Betonerhärtung. Die Implementierung der Materialmodelle erfolgt elementweise (siehe Abs. 3.4.2).

Im Nachfolgenden wird auf die thermomechanischen Berechnungsmodelle für die Bodenplatte und die Wand näher eingegangen. Bei beiden Bauteilen wird zwischen dem Modell im Erhärungszeitraum und dem Modell im Nutzungszeitraum unterschieden. Da im Nutzungszeitraum das fertiggestellte Bauwerk betrachtet wird, liefert das zugehörige Modell sowohl Ergebnisse für die Bodenplatte als auch für die Wand.

7.1.1 Bodenplatte

Modell Erhärungszeitraum

Abb. 7.1 (links) zeigt das Berechnungsmodell für die Bodenplatte im Erhärungszeitraum. Für nähere Erläuterungen wird auf Abs. 6.1.1 verwiesen. Das Modell in Kapitel 6 unterscheidet sich ausschließlich durch den unterschiedlichen Dehnfugenabstand.

Die Simulationsergebnisse werden an den drei maßgebenden Materialpunkten (Auswertungsknoten: unten, **mitte**, **oben**), welche sich entlang der Schnittgeraden der Symmetrieebenen befinden, ausgegeben.

Modell Nutzungszeitraum

Abb. 7.1 (rechts) zeigt das Berechnungsmodell für die Bodenplatte im Nutzungszeitraum. Für nähere Erläuterungen wird auf Abs. 6.1.1 verwiesen. Das Modell in Kapitel 6 unterscheidet sich ausschließlich durch den unterschiedlichen Dehnfugenabstand.

Die Simulationsergebnisse werden an den drei maßgebenden Materialpunkten (Auswertungsknoten: unten, **mitte**, **oben**), welche sich entlang der Schnittgeraden der Symmetrieebenen befinden, ausgegeben.

7.1.2 Wand

Modell Erhärungszeitraum

Abb. 7.2 (links) zeigt das Berechnungsmodell für die Wand im Erhärungszeitraum. Für nähere Erläuterungen wird auf Abs. 6.1.2 verwiesen. Das Modell in Kapitel 6 unterscheidet sich ausschließlich durch den unterschiedlichen Dehnfugenabstand.

Die Simulationsergebnisse werden an den vier maßgebenden Materialpunkten (Auswertungsknoten: #1, **#2**, **#3**, **#4**), welche sich entlang der Schnittgeraden der Schwerebene der Wand und der Symmetrieebene in x befinden, ausgegeben.

Modell Nutzungszeitraum

Abb. 7.2 (rechts) zeigt das Berechnungsmodell für die Wand im Nutzungszeitraum. Für nähere Erläuterungen wird auf Abs. 6.1.2 verwiesen. Das Modell in Kapitel 6 unterscheidet sich ausschließlich durch den unterschiedlichen Dehnfugenabstand.

Die Simulationsergebnisse werden an den vier maßgebenden Materialpunkten (Auswertungsknoten: #1, **#2**, **#3**, **#4**), welche sich entlang der Schnittgeraden der Schwerebene der Wand und der Symmetrieebene in x befinden, ausgegeben.

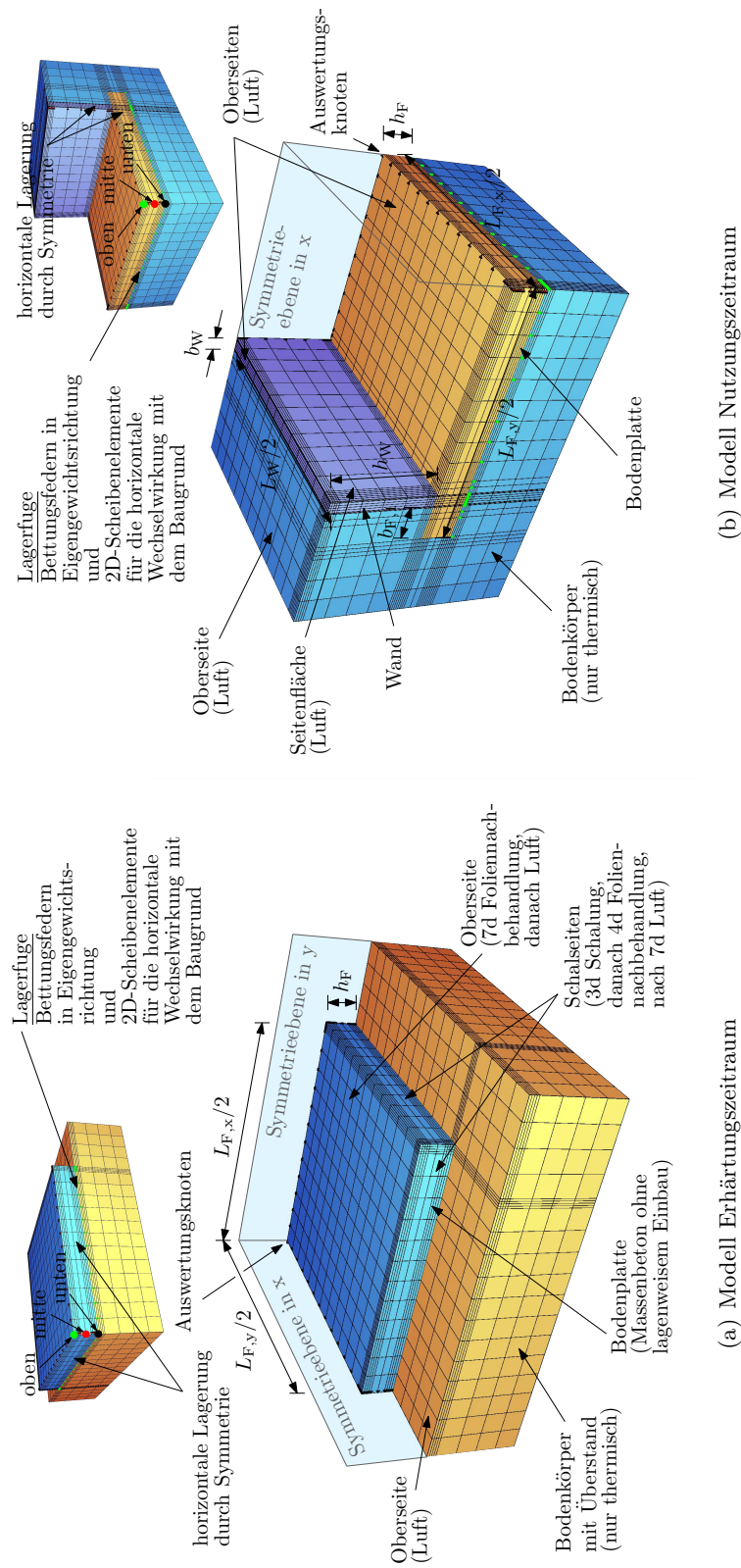


Abb. 7.1: Berechnungsmodelle Bodenplatte

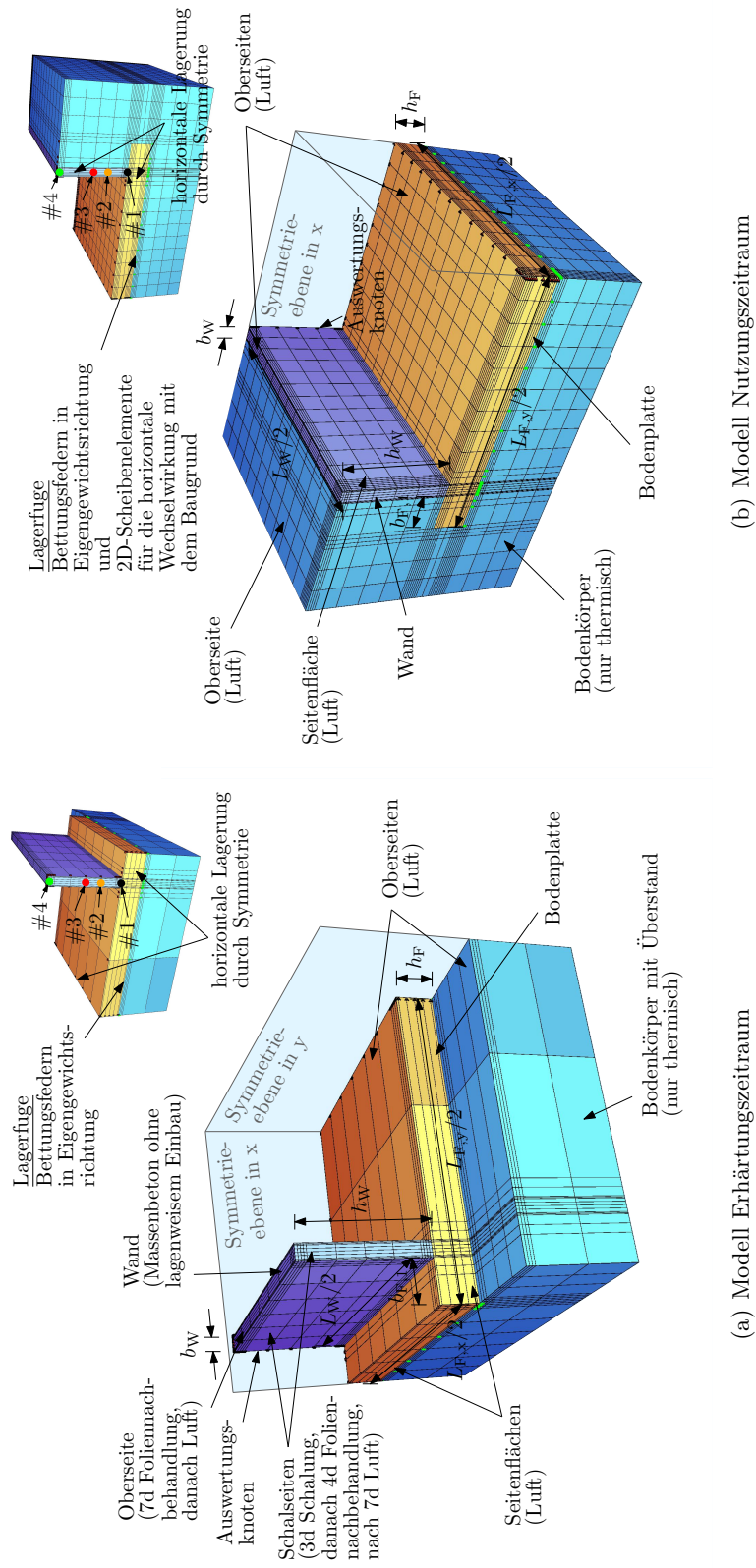


Abb. 7.2: Berechnungsmodelle Wand

7.2 Simulationsergebnisse

In dieser Arbeit handelt es sich bei den dargestellten Simulationsergebnissen um Knotenwerte und nicht um mittlere Elementwerte.

7.2.1 Bodenplatte

Die im Nachfolgenden abgebildeten Simulationsergebnisse werden mit den in Abb. 7.1 dargestellten thermomechanischen Berechnungsmodellen gewonnen.

7.2.1.1 Temperaturen

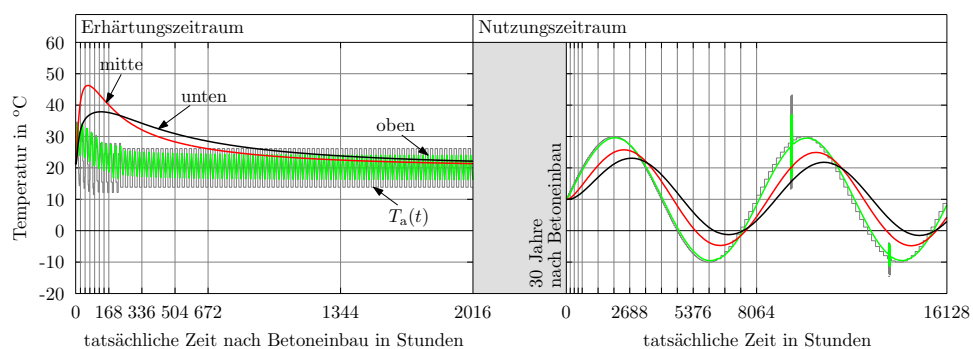


Abb. 7.3: Temperatur Bodenplatte

7.2.1.2 Spannungen

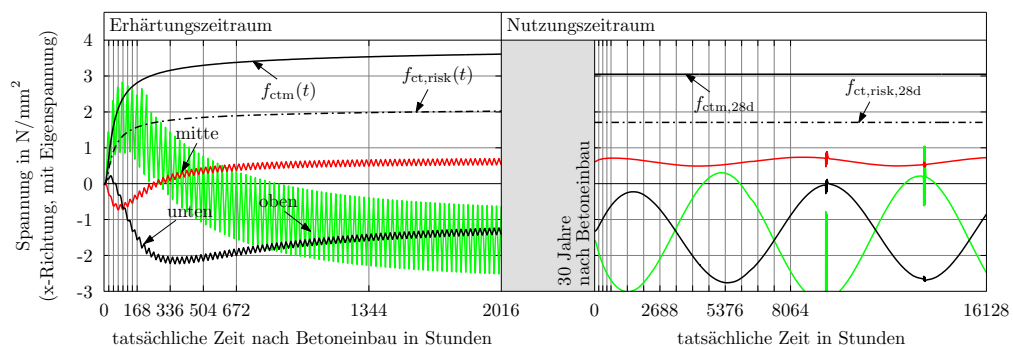
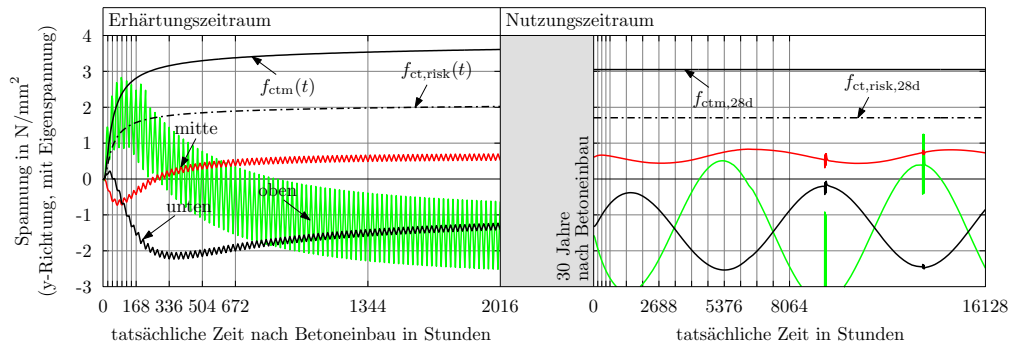
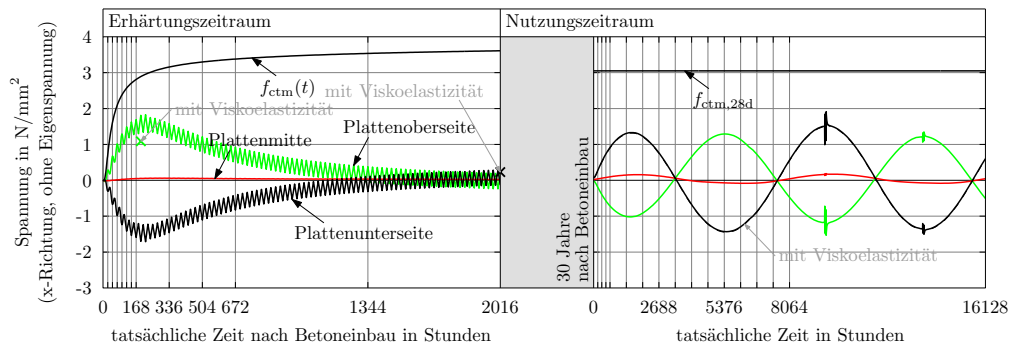
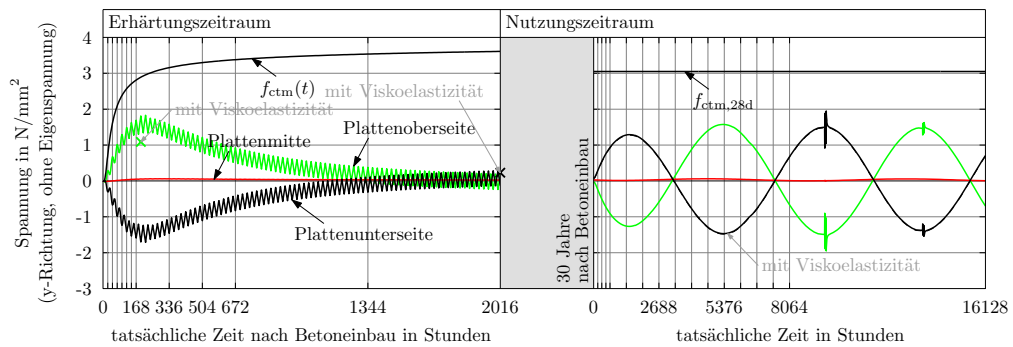


Abb. 7.4: Spannung mit Eigenspannung Bodenplatte x-Richtung


Abb. 7.5: Spannung mit Eigenspannung Bodenplatte y-Richtung

Die in den nachfolgenden Diagrammen abgebildeten eigenspannungsfreien Spannungsverläufe entsprechen den Ergebniswerten an der Plattenunterseite, der Plattenmitte und der Plattenoberseite. Die Spannungsverläufe repräsentieren den konstanten und die linearen Anteile der Zwangspannungsverteilung im maßgebenden Querschnitt.


Abb. 7.6: Spannung ohne Eigenspannung Bodenplatte x-Richtung

Abb. 7.7: Spannung ohne Eigenspannung Bodenplatte y-Richtung

Die Diagramme zeigen, dass Biegerisse und Trennrisse in der Bodenplatte ausgeschlossen werden können.

7.2.2 Wand

Die im Nachfolgenden abgebildeten Simulationsergebnisse werden mit den in Abb. 7.2 dargestellten thermomechanischen Berechnungsmodellen gewonnen.

7.2.2.1 Temperaturen

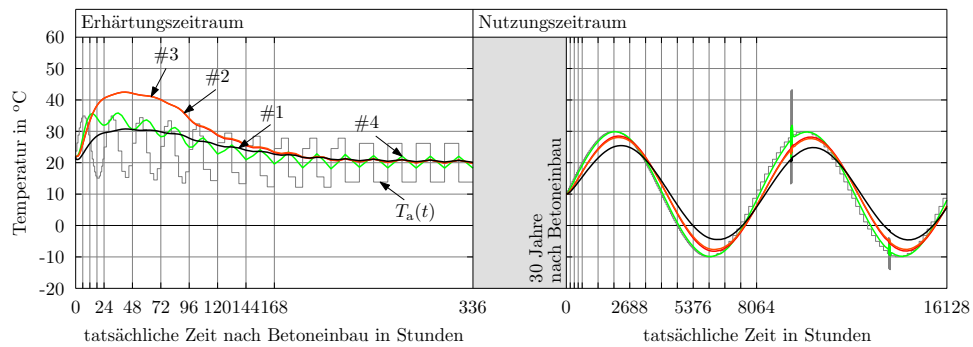


Abb. 7.8: Temperatur Wand

7.2.2.2 Spannungen

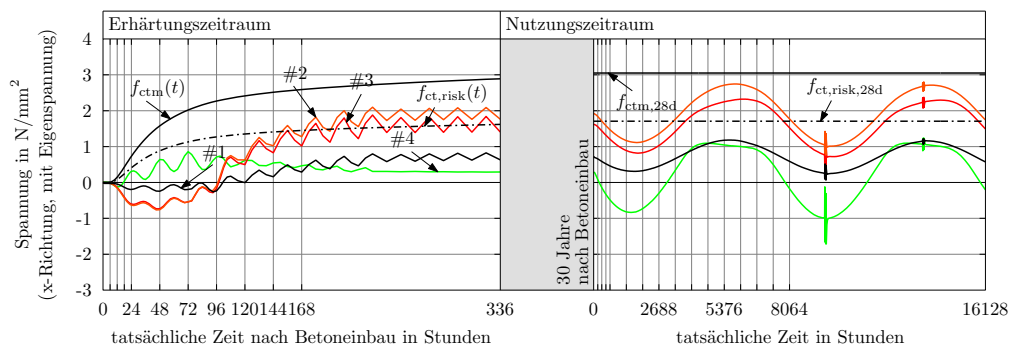


Abb. 7.9: Spannung mit Eigenspannung Wand

Die im nachfolgenden Diagramm abgebildeten eigenspannungsfreien Spannungsverläufe entsprechen den Ergebniswerten an den vier Eckpunkten der Wand. Die Spannungsverläufe repräsentieren den konstanten und die linearen Anteile der Zwangspannungsverteilung im maßgebenden Querschnitt.

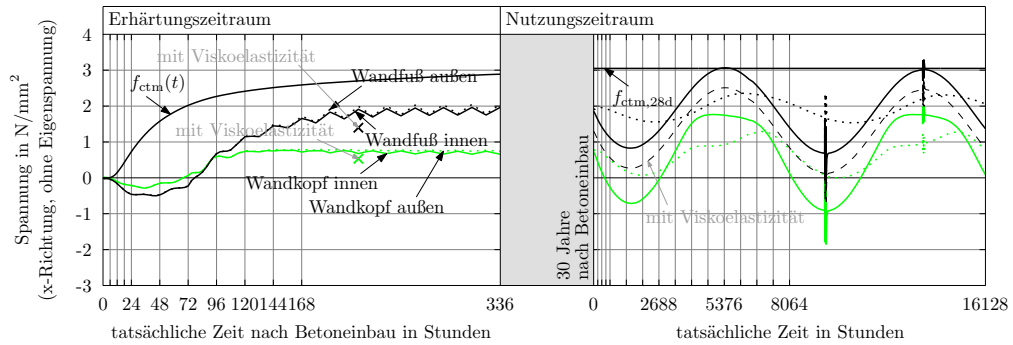


Abb. 7.10: Spannung ohne Eigenspannung Wand

Das Diagramm zeigt, dass Trennrisse in der Wand ausgeschlossen werden können.

7.3 Erforderliche Mindestbewehrung zur Begrenzung der Rissbreite

Bodenplatte

Eine konstruktive Mindestbewehrung ist stets vorzusehen. Die erforderliche Bewehrungsmenge pro Bauteiloberfläche und Richtung beträgt:

$$a_{s,\min,\text{erf}} = 0,07 \cdot h_F \cdot \frac{f_{ctm}}{f_{yk}} = 0,07 \cdot 1,8 \cdot \frac{3,05}{550} \cdot 10^4 = 6,99 \text{ cm}^2/\text{m} \quad (7.1)$$

Die gewählte Bewehrung pro Bauteiloberfläche und Richtung entspricht:

$$a_{s,\min,\text{gew}} = 7,85 \text{ cm}^2/\text{m} \quad \text{Ø10/10}$$

Wand

Eine konstruktive Mindestbewehrung ist stets vorzusehen. Die erforderliche Bewehrungsmenge pro Bauteiloberfläche und Richtung beträgt:

$$a_{s,\min,\text{erf}} = 0,07 \cdot b_W \cdot \frac{f_{ctm}}{f_{yk}} = 0,07 \cdot 0,8 \cdot \frac{3,05}{550} \cdot 10^4 = 3,11 \text{ cm}^2/\text{m} \quad (7.2)$$

Die gewählte Bewehrung pro Bauteiloberfläche und Richtung entspricht:

$$a_{s,\min,\text{gew}} = 3,35 \text{ cm}^2/\text{m} \quad \text{Ø8/15}$$

8 Bewehrungsermittlung gemäß BAWMerkblatt Zwang, $L = \infty$

Abschließend werden die Bodenplatte und die Wände des in Kapitel 2 beschriebenen Untersuchungsbeispiels mit einem Dehnfugenabstand von ∞ (monolithische Bauweise) auf frühen und späten Zwang bemessen. Dazu wird das derzeit noch unveröffentlichte BAWMerkblatt Zwang [2] herangezogen.

Die Voraussetzungen für die Anwendbarkeit von [2] sind für den konkreten Fall erfüllt. Dazu zählt insbesondere die Bedingung: kleinste Querschnittsabmessung des Bauteils $\geq 0,8$ m (um mögliche Sekundärrissbildung unterstellen zu können). Zudem weisen die einzelnen Stahlbetonbauteile homogene Querschnitte auf.

Das vereinzelte Auftreten von Rissen am Bauwerk mit einer größeren Rissbreite als die rechnerisch ermittelte Rissbreite kann auch mit diesem Bemessungsverfahren nicht ausgeschlossen werden. Dies ist vor allem den getroffenen Annahmen und der großen Streuung der Bemessungsparameter geschuldet.

Die Bewehrung wird, so wie in [2, S. 25] empfohlen, möglichst randnah angeordnet (unter Einhaltung der Dauerhaftigkeitskriterien), um wirtschaftliche Bewehrungsmengen zu erreichen.

8.1 Bemessungsphilosophie

Die nachfolgende Abbildung beschreibt die allgemeine Vorgehensweise bei der Anwendung des Bemessungsverfahrens „BAWMerkblatt Zwang“.

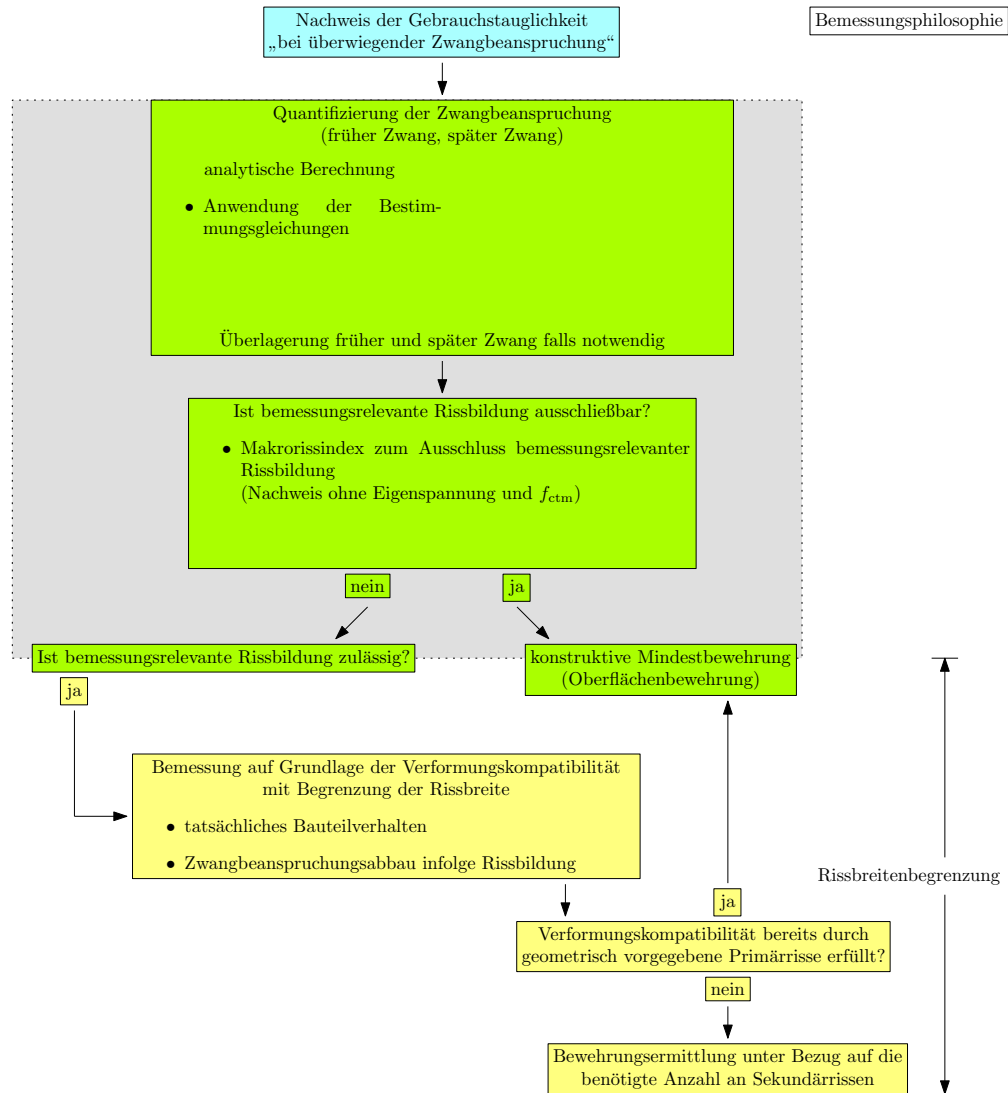


Abb. 8.1: Vorgehensweise „BAWMerkblatt Zwang“

Bei diesem Bemessungsverfahren ist Rissbildung infolge Zwang generell zulässig, sofern diese mit einer geeigneten Bewehrung entsprechend begrenzt wird. Aufgrund der Empfehlung in [2] erfolgt die nachfolgende Bemessung der Bauteile immer nach denselben Schritten:

1. Ermittlung der äquivalenten Temperatureinwirkung im Erhärtungszeitraum
2. Ermittlung der äquivalenten Temperatureinwirkung im Nutzungszeitraum
3. Ermittlung der Zwangbeanspruchung im Erhärtungs- und Nutzungszeitraum
4. Ermittlung des Primärrissabstands
5. Ermittlung der erforderlichen Bewehrung

Da für den verwendeten Beton die adiabatische Temperaturentwicklung aus Messungen nicht bekannt ist, wird der für die Anwendung des Bemessungsverfahrens erforderliche Betonkennwert $\Delta T_{\text{adiab},7\text{d}}$ angenommen.

$$\Delta T_{\text{adiab},7\text{d}} = \Delta T_{Q,\text{max}} = \frac{Q_{\text{max}}}{S_c} \cdot m_{\text{BM}} = \frac{255,0}{2400} \cdot 330 = 35,06 \text{ °C} \quad (8.1)$$

8.1.1 Bemessung Bodenplatte

Längsrichtung (x-Richtung)

$$\begin{aligned} \Delta T_{\text{Mz,eq},0}^{\text{obere Bew}} &= 0,6 \cdot (k_0 \cdot k_{\text{FK}} \cdot k_{\text{JZ}} \cdot \Delta T_{\text{adiab},7\text{d}} + \Delta T_{\text{nom}}) = \\ &= 0,6 \cdot (0,5 \cdot 1,05 \cdot 1,0 \cdot 35,06 + 5) = 14,04 \text{ °C} \\ \text{mit: } k_0 &= 0,14 + 0,2 \cdot h_{\text{F}} = 0,14 + 0,2 \cdot 1,8 = 0,5 \leq 0,74 \\ \text{und: } k_{\text{FK}} &= 1,05 \text{ für C25/30} \\ \text{und: } k_{\text{JZ}} &= 1,0 \text{ bei Betonage außerhalb des Winters} \end{aligned} \quad (8.2)$$

$$\begin{aligned} \Delta T_{\text{Mz,eq},0}^{\text{untere Bew}} &= -0,8 \cdot (\min [0,6 \cdot k_0; 0,25] \cdot k_{\text{FK}} \cdot k_{\text{JZ}} \cdot \Delta T_{\text{adiab},7\text{d}} + 0,25 \cdot \Delta T_{\text{nom}}) = \\ &= -0,8 \cdot (\min [0,6 \cdot 0,5; 0,25] \cdot 1,05 \cdot 1,0 \cdot 35,06 + 0,25 \cdot 5) = -8,36 \text{ °C} \\ \text{mit: } k_0 &= 0,14 + 0,2 \cdot h_{\text{F}} = 0,14 + 0,2 \cdot 1,8 = 0,5 \leq 0,74 \\ \text{und: } k_{\text{FK}} &= 1,05 \text{ für C25/30} \\ \text{und: } k_{\text{JZ}} &= 1,0 \text{ bei Betonage außerhalb des Winters} \end{aligned} \quad (8.3)$$

$$0,8 \text{ m} \leq h_{\text{F}} = 1,8 \text{ m} \leq 10,0 \text{ m} \quad (8.4)$$

$$0,8 \text{ m} \leq b_{\text{W}} = 0,8 \text{ m} \leq 10,0 \text{ m} \quad (8.5)$$

$$\begin{aligned} \Delta T_{\text{Mz,Sohle},1}^{\text{obere Bew}} &= \min [3 \cdot h_{\text{F}} + 2; 14] = \\ &= \min [3 \cdot 1,8 + 2; 14] = 7,4 \text{ °C (Winter)} \end{aligned} \quad (8.6)$$

$$\begin{aligned} \Delta T_{\text{N,Sohle},1}^{\text{obere Bew}} &= \Delta T_{\text{Mz,G},1} \cdot \frac{h_{\text{F}}/2 + h_{\text{W}} - z_{\text{SG}}^0}{h_{\text{F}} + h_{\text{W}}} = \\ &= -12 \cdot \frac{1,8/2 + 6 - 6,31}{1,8 + 6} = -0,91 \text{ °C (Sommer)} \\ \text{mit: } z_{\text{SG}}^0 &= 6,31 \text{ m} \end{aligned} \quad (8.7)$$

$$\begin{aligned}\Delta T_{Mz, \text{Sohle}, 1}^{\text{untere Bew}} &= -\min [3 \cdot h_F + 5; 17] = \\ &= -\min [3 \cdot 1,8 + 5; 17] = -10,4 \text{ }^\circ\text{C (Sommer)}\end{aligned}\quad (8.8)$$

$$\begin{aligned}\Delta T_{N, \text{Sohle}, 1}^{\text{untere Bew}} &= \Delta T_{Mz, G, 1} \cdot \frac{h_F/2 + h_W - z_{SG}^0}{h_F + h_W} = \\ &= -12 \cdot \frac{1,8/2 + 6 - 6,31}{1,8 + 6} = -0,91 \text{ }^\circ\text{C (Sommer)} \\ \text{mit: } z_{SG}^0 &= 6,31 \text{ m}\end{aligned}\quad (8.9)$$

$$\begin{aligned}\Delta T_{Mz}^{\text{obere Bew}} &= \max [\Delta T_{Mz, \text{eq}, 0}^{\text{obere Bew}}; \Delta T_{Mz, \text{Sohle}, 1}^{\text{obere Bew}}] = \\ &= \max [14,04; 7,4] = 14,04 \text{ }^\circ\text{C}\end{aligned}\quad (8.10)$$

$$\begin{aligned}\sigma_{Zw}^{\text{obere Bew}} &= \max \left[\frac{\alpha_T \cdot \Delta T_{Mz}^{\text{obere Bew}} \cdot E_{cm}}{2} \cdot a_M; -\alpha_T \cdot \Delta T_{N, \text{Sohle}, 1}^{\text{obere Bew}} \cdot E_{cm} \cdot a_M \right] = \\ &= \max \left[\frac{8 \cdot 10^{-6} \cdot 14,04 \cdot 26500}{2} \cdot 1; -8 \cdot 10^{-6} \cdot (-0,91) \cdot 26500 \cdot 1 \right] = \\ &= 1,49 \text{ N/mm}^2\end{aligned}\quad (8.11)$$

$$\begin{aligned}a_M &= \frac{3}{2} \cdot \frac{\gamma_c \cdot L^2}{\alpha_T \cdot |\Delta T_{Mz}^{\text{obere Bew}}| \cdot E_{cm} \cdot h_F} \leq 1 \\ \text{mit: } L &= \infty \rightarrow a_M = 1\end{aligned}\quad (8.12)$$

$$\Delta T_{Mz}^{\text{untere Bew}} = \Delta T_{Mz, \text{eq}, 0}^{\text{untere Bew}} + \Delta T_{Mz, \text{Sohle}, 1}^{\text{untere Bew}} = -8,36 - 10,4 = -18,76 \text{ }^\circ\text{C}\quad (8.13)$$

$$\begin{aligned}\sigma_{Zw}^{\text{untere Bew}} &= -\frac{\alpha_T \cdot \Delta T_{Mz}^{\text{untere Bew}} \cdot E_{cm}}{2} \cdot a_M - \alpha_T \cdot \Delta T_{N, \text{Sohle}, 1}^{\text{untere Bew}} \cdot E_{cm} \cdot a_M = \\ &= -\frac{8 \cdot 10^{-6} \cdot (-18,76) \cdot 26500}{2} \cdot 1 - 8 \cdot 10^{-6} \cdot (-0,91) \cdot 26500 \cdot 1 = \\ &= 2,18 \text{ N/mm}^2\end{aligned}\quad (8.14)$$

$$\begin{aligned}a_M &= \frac{3}{2} \cdot \frac{\gamma_c \cdot L^2}{\alpha_T \cdot |\Delta T_{Mz, \text{Sohle}, 1}^{\text{untere Bew}}| \cdot E_{cm} \cdot h_F} \leq 1 \\ \text{mit: } L &= \infty \rightarrow a_M = 1\end{aligned}\quad (8.15)$$

$$\begin{aligned}
 l_{cr,F} &= \sqrt{\frac{f_{ctm} \cdot h_F}{3 \cdot \gamma_c}} \leq \frac{L}{2} \\
 &= \sqrt{\frac{3,05 \cdot 1,8}{3 \cdot 0,025}} = 8,56 \text{ m} \leq \infty \\
 \text{mit: } L &= \infty
 \end{aligned}
 \tag{8.16}$$

$$\begin{aligned}
 n^{\text{obere Bew}} &= 1,1 \cdot \left(\frac{\sigma_{Zw}^{\text{obere Bew}} \cdot l_{cr,F} \cdot k_{BD}}{E_{cm} \cdot w_k} \cdot \frac{1}{a^{0,6}} - 1 \right) = \\
 &= 1,1 \cdot \left(\frac{1,49 \cdot 8,56}{26500 \cdot 0,20 \cdot 10^{-3}} \cdot \frac{0,75}{10,6} - 1 \right) = 0,89 \rightarrow 1 \\
 \text{mit: } k_{BD} &= 0,75 \text{ f\u00fcr } \sigma_{Zw}^{\text{obere Bew}} < 2 \cdot f_{ctm}
 \end{aligned}
 \tag{8.17}$$

$$\begin{aligned}
 n^{\text{untere Bew}} &= 1,1 \cdot \left(\frac{\sigma_{Zw}^{\text{untere Bew}} \cdot l_{cr,F} \cdot k_{BD}}{E_{cm} \cdot w_k} \cdot \frac{1}{a^{0,6}} - 1 \right) = \\
 &= 1,1 \cdot \left(\frac{2,18 \cdot 8,56}{26500 \cdot 0,20 \cdot 10^{-3}} \cdot \frac{0,75}{10,6} - 1 \right) = 1,80 \rightarrow 2 \\
 \text{mit: } k_{BD} &= 0,75 \text{ f\u00fcr } \sigma_{Zw}^{\text{untere Bew}} < 2 \cdot f_{ctm}
 \end{aligned}
 \tag{8.18}$$

$$\begin{aligned}
 a_{s,\min,\text{erf}}^{\text{obere Bew}} &= \sqrt{\frac{d_s \cdot d_1^2 \cdot b^2 \cdot f_{ctm}}{w_k \cdot E_s} \cdot (0,5 + 0,34 \cdot n^{\text{obere Bew}})} = \\
 &= \sqrt{\frac{20 \cdot 5,0^2 \cdot 100^2 \cdot 3,05}{0,20 \cdot 200000} \cdot (0,5 + 0,34 \cdot 1)} = 17,90 \text{ cm}^2/\text{m}
 \end{aligned}
 \tag{8.19}$$

$$a_{s,\min,\text{gew}}^{\text{obere Bew}} = 20,94 \text{ cm}^2/\text{m} \quad \text{\textcircled{20}/15}$$

$$\begin{aligned}
 a_{s,\min,\text{erf}}^{\text{untere Bew}} &= \sqrt{\frac{d_s \cdot d_1^2 \cdot b^2 \cdot f_{ctm}}{w_k \cdot E_s} \cdot (0,5 + 0,34 \cdot n^{\text{untere Bew}})} = \\
 &= \sqrt{\frac{20 \cdot 5,0^2 \cdot 100^2 \cdot 3,05}{0,20 \cdot 200000} \cdot (0,5 + 0,34 \cdot 2)} = 21,21 \text{ cm}^2/\text{m}
 \end{aligned}
 \tag{8.20}$$

$$a_{s,\min,\text{gew}}^{\text{untere Bew}} = 25,13 \text{ cm}^2/\text{m} \quad \text{\textcircled{20}/12,5}$$

Querrichtung (y-Richtung)

$$\begin{aligned}
 \Delta T_{Mz,eq,0}^{\text{obere Bew}} &= 0,6 \cdot (k_0 \cdot k_{FK} \cdot k_{JZ} \cdot \Delta T_{\text{adiab},7d} + \Delta T_{\text{nom}}) = \\
 &= 0,6 \cdot (0,5 \cdot 1,05 \cdot 1,0 \cdot 35,06 + 5) = 14,04 \text{ °C} \\
 \text{mit: } k_0 &= 0,14 + 0,2 \cdot h_F = 0,14 + 0,2 \cdot 1,8 = 0,5 \leq 0,74 \\
 \text{und: } k_{FK} &= 1,05 \text{ für C25/30} \\
 \text{und: } k_{JZ} &= 1,0 \text{ bei Betonage außerhalb des Winters}
 \end{aligned}
 \tag{8.21}$$

$$\begin{aligned}
 \Delta T_{Mz,eq,0}^{\text{untere Bew}} &= -0,8 \cdot (\min [0,6 \cdot k_0; 0,25] \cdot k_{FK} \cdot k_{JZ} \cdot \Delta T_{\text{adiab},7d} + 0,25 \cdot \Delta T_{\text{nom}}) = \\
 &= -0,8 \cdot (\min [0,6 \cdot 0,5; 0,25] \cdot 1,05 \cdot 1,0 \cdot 35,06 + 0,25 \cdot 5) = -8,36 \text{ °C} \\
 \text{mit: } k_0 &= 0,14 + 0,2 \cdot h_F = 0,14 + 0,2 \cdot 1,8 = 0,5 \leq 0,74 \\
 \text{und: } k_{FK} &= 1,05 \text{ für C25/30} \\
 \text{und: } k_{JZ} &= 1,0 \text{ bei Betonage außerhalb des Winters}
 \end{aligned}
 \tag{8.22}$$

$$0,8 \text{ m} \leq h_F = 1,8 \text{ m} \leq 10,0 \text{ m} \tag{8.23}$$

$$\begin{aligned}
 \Delta T_{Mz,Sohle,1}^{\text{obere Bew}} &= \min [3 \cdot h_F + 2; 14] = \\
 &= \min [3 \cdot 1,8 + 2; 14] = 7,4 \text{ °C (Winter)}
 \end{aligned}
 \tag{8.24}$$

$$\begin{aligned}
 \Delta T_{Mz,Sohle,1}^{\text{untere Bew}} &= -\min [3 \cdot h_F + 5; 17] = \\
 &= -\min [3 \cdot 1,8 + 5; 17] = -10,4 \text{ °C (Sommer)}
 \end{aligned}
 \tag{8.25}$$

$$\begin{aligned}
 \Delta T_{Mz}^{\text{obere Bew}} &= \max [\Delta T_{Mz,eq,0}^{\text{obere Bew}}; \Delta T_{Mz,Sohle,1}^{\text{obere Bew}}] = \\
 &= \max [14,04; 7,4] = 14,04 \text{ °C}
 \end{aligned}
 \tag{8.26}$$

$$\begin{aligned}
 \sigma_{Zw}^{\text{obere Bew}} &= \frac{\alpha_T \cdot \Delta T_{Mz}^{\text{obere Bew}} \cdot E_{cm}}{2} \cdot a_M = \\
 &= \frac{8 \cdot 10^{-6} \cdot 14,04 \cdot 26500}{2} \cdot 1 = 1,49 \text{ N/mm}^2
 \end{aligned}
 \tag{8.27}$$

$$\begin{aligned}
 a_M &= \frac{3}{2} \cdot \frac{\gamma_c \cdot L^2}{\alpha_T \cdot |\Delta T_{Mz}^{\text{obere Bew}}| \cdot E_{cm} \cdot h_F} \leq 1 \\
 &= \frac{3}{2} \cdot \frac{0,025 \cdot 30^2}{8 \cdot 10^{-6} \cdot |14,04| \cdot 26500 \cdot 1,8} = 6,30 \leq 1
 \end{aligned} \tag{8.28}$$

$$\Delta T_{Mz}^{\text{untere Bew}} = \Delta T_{Mz,eq,0}^{\text{untere Bew}} + \Delta T_{Mz,Sohle,1}^{\text{untere Bew}} = -8,36 - 10,4 = -18,76 \text{ °C} \tag{8.29}$$

$$\begin{aligned}
 \sigma_{Zw}^{\text{untere Bew}} &= -\frac{\alpha_T \cdot \Delta T_{Mz}^{\text{untere Bew}} \cdot E_{cm}}{2} \cdot a_M = \\
 &= -\frac{8 \cdot 10^{-6} \cdot (-18,76) \cdot 26500}{2} \cdot 1 = 1,99 \text{ N/mm}^2
 \end{aligned} \tag{8.30}$$

$$\begin{aligned}
 a_M &= \frac{3}{2} \cdot \frac{\gamma_c \cdot L^2}{\alpha_T \cdot |\Delta T_{Mz,Sohle,1}^{\text{untere Bew}}| \cdot E_{cm} \cdot h_F} \leq 1 \\
 &= \frac{3}{2} \cdot \frac{0,025 \cdot 30^2}{8 \cdot 10^{-6} \cdot |-10,4| \cdot 26500 \cdot 1,8} = 8,50 \leq 1
 \end{aligned} \tag{8.31}$$

$$\begin{aligned}
 l_{cr,F} &= \sqrt{\frac{f_{ctm} \cdot h_F}{3 \cdot \gamma_c}} \leq \frac{L}{2} \\
 &= \sqrt{\frac{3,05 \cdot 1,8}{3 \cdot 0,025}} = 8,56 \text{ m} \leq \frac{30}{2} = 15 \text{ m}
 \end{aligned} \tag{8.32}$$

$$\begin{aligned}
 n^{\text{obere Bew}} &= 1,1 \cdot \left(\frac{\sigma_{Zw}^{\text{obere Bew}} \cdot l_{cr,F}}{E_{cm} \cdot w_k} \cdot \frac{k_{BD}}{a^{0,6}} - 1 \right) = \\
 &= 1,1 \cdot \left(\frac{1,49 \cdot 8,56}{26500 \cdot 0,20 \cdot 10^{-3}} \cdot \frac{0,75}{10,6} - 1 \right) = 0,89 \rightarrow 1 \\
 &\text{mit: } k_{BD} = 0,75 \text{ f\u00fcr } \sigma_{Zw}^{\text{obere Bew}} < 2 \cdot f_{ctm}
 \end{aligned} \tag{8.33}$$

$$\begin{aligned}
 n^{\text{untere Bew}} &= 1,1 \cdot \left(\frac{\sigma_{Zw}^{\text{untere Bew}} \cdot l_{cr,F}}{E_{cm} \cdot w_k} \cdot \frac{k_{BD}}{a^{0,6}} - 1 \right) = \\
 &= 1,1 \cdot \left(\frac{1,99 \cdot 8,56}{26500 \cdot 0,20 \cdot 10^{-3}} \cdot \frac{0,75}{10,6} - 1 \right) = 1,55 \rightarrow 2 \\
 &\text{mit: } k_{BD} = 0,75 \text{ f\u00fcr } \sigma_{Zw}^{\text{untere Bew}} < 2 \cdot f_{ctm}
 \end{aligned} \tag{8.34}$$

$$\begin{aligned}
 a_{s,\min,\text{erf}}^{\text{obere Bew}} &= \sqrt{\frac{d_s \cdot d_1^2 \cdot b^2 \cdot f_{ctm}}{w_k \cdot E_s} \cdot (0,5 + 0,34 \cdot n^{\text{obere Bew}})} = \\
 &= \sqrt{\frac{20 \cdot 5,0^2 \cdot 100^2 \cdot 3,05}{0,20 \cdot 200000} \cdot (0,5 + 0,34 \cdot 1)} = 17,90 \text{ cm}^2/\text{m}
 \end{aligned}
 \tag{8.35}$$

$$a_{s,\min,\text{gew}}^{\text{obere Bew}} = 20,94 \text{ cm}^2/\text{m} \qquad \text{Ø20/15}$$

$$\begin{aligned}
 a_{s,\min,\text{erf}}^{\text{untere Bew}} &= \sqrt{\frac{d_s \cdot d_1^2 \cdot b^2 \cdot f_{ctm}}{w_k \cdot E_s} \cdot (0,5 + 0,34 \cdot n^{\text{untere Bew}})} = \\
 &= \sqrt{\frac{20 \cdot 5,0^2 \cdot 100^2 \cdot 3,05}{0,20 \cdot 200000} \cdot (0,5 + 0,34 \cdot 2)} = 21,21 \text{ cm}^2/\text{m}
 \end{aligned}
 \tag{8.36}$$

$$a_{s,\min,\text{gew}}^{\text{untere Bew}} = 25,13 \text{ cm}^2/\text{m} \qquad \text{Ø20/12,5}$$

8.1.2 Bemessung Wand

$$\begin{aligned}
 \Delta T_{N,eq,0} &= -0,7 \cdot (k_0 \cdot k_{FK} \cdot k_{JZ} \cdot \Delta T_{adiab,7d} + \Delta T_{nom}) = \\
 &= -0,7 \cdot (0,49 \cdot 0,95 \cdot 1,0 \cdot 35,06 + 5) = -14,92 \text{ °C} \\
 \text{mit: } k_0 &= 0,7 - 0,2/b_W^{0,3} = 0,7 - 0,2/0,8^{0,3} = 0,49 \\
 \text{und: } k_{FK} &= 0,95 \text{ für C25/30} \\
 \text{und: } k_{JZ} &= 1,0 \text{ bei Betonage außerhalb des Winters}
 \end{aligned} \tag{8.37}$$

$$0,8 \text{ m} \leq b_W = 0,8 \text{ m} \leq 10,0 \text{ m} \tag{8.38}$$

$$\Delta T_{Mz,G,1} = 10 \text{ °C (Winter)}$$

$$\Delta T_{Mz,G,1} = -12 \text{ °C (Sommer)}$$

$$\begin{aligned}
 N_W &= -\alpha_T \cdot \Delta T_{N,eq,0} \cdot \left(\frac{1}{E_F \cdot A_F} + \frac{1}{E_W \cdot A_W} + \frac{e_z^2}{E_F \cdot I_F + E_W \cdot I_W} \right)^{-1} = \\
 &= -8 \cdot 10^{-6} \cdot (-14,92) \cdot \left[\frac{1}{26500} \cdot \left(\frac{1}{15 \cdot 1,8} + \frac{1}{0,8 \cdot 6} + \frac{\left(\frac{6+1,8}{2}\right)^2}{\frac{15 \cdot 1,8^3}{12} + \frac{0,8 \cdot 6^3}{12}} \right) \right]^{-1} = \\
 &= 3,34 \text{ MN}
 \end{aligned} \tag{8.39}$$

$$M_W = N_W \cdot e_z \cdot \frac{1}{1 + \frac{E_F \cdot I_F}{E_W \cdot I_W}} = 3,34 \cdot \frac{6 + 1,8}{2} \cdot \frac{1}{1 + \frac{26500 \cdot \frac{15 \cdot 1,8^3}{12}}{26500 \cdot \frac{0,8 \cdot 6^3}{12}}} = 8,65 \text{ MNm} \tag{8.40}$$

$$\begin{aligned}
 M_G &= \gamma_c \cdot \left[\frac{A_B \cdot L_{eff,max}^2}{2} + A_{zus} \cdot \Delta L \cdot \left(L_{eff,max} + \frac{\Delta L}{2} \right) \right] \leq M_W \cdot \frac{I_B}{I_W} \\
 &= 0,025 \cdot \frac{(15 \cdot 1,8 + 0,8 \cdot 6) \cdot 11,25^2}{2} = 50,31 \text{ MNm} \leq 8,65 \cdot \frac{83,68}{\frac{0,8 \cdot 6^3}{12}} = 50,27 \text{ MNm}
 \end{aligned}$$

$$\text{mit: } I_B = 83,68 \text{ m}^4$$

$$\text{und: } z_{SG}^0 = 6,31 \text{ m}$$

$$\tag{8.41}$$

$$\begin{aligned}
 L_{\text{eff,max}} &= \sqrt{\frac{2 \cdot M_W}{\gamma_c \cdot A_B} \cdot \frac{I_B}{I_W} + \frac{A_{\text{zus}}}{A_B} \cdot \Delta L^2 \cdot \left(\frac{A_{\text{zus}}}{A_B} - 1 \right) - \frac{A_{\text{zus}}}{A_B} \cdot \Delta L} \leq x \\
 &= \sqrt{\frac{2 \cdot 8,65}{0,025 \cdot (15 \cdot 1,8 + 0,8 \cdot 6)} \cdot \frac{83,68}{\frac{0,8 \cdot 6^3}{12}}} = 11,25 \text{ m} \leq \infty
 \end{aligned} \tag{8.42}$$

$$\begin{aligned}
 \sigma_{Zw,0}^{\text{Wandfuß}} &= \frac{N_W}{A_W} + \frac{M_W}{I_W} \cdot z_{\text{Wandfuß}}^W - \frac{M_G}{I_B} \cdot z_{\text{Wandfuß}}^B = \\
 &= \frac{3,34}{0,8 \cdot 6} + \frac{8,65}{\frac{0,8 \cdot 6^3}{12}} \cdot 6/2 - \frac{50,31}{83,68} \cdot (-0,31) = 2,68 \text{ N/mm}^2
 \end{aligned} \tag{8.43}$$

$$\begin{aligned}
 \sigma_{Zw,0}^{\text{Wandkopf}} &= \frac{N_W}{A_W} + \frac{M_W}{I_W} \cdot z_{\text{Wandkopf}}^W - \frac{M_G}{I_B} \cdot z_{\text{Wandkopf}}^B = \\
 &= \frac{3,34}{0,8 \cdot 6} + \frac{8,65}{\frac{0,8 \cdot 6^3}{12}} \cdot (-6/2) - \frac{50,31}{83,68} \cdot (-6,31) = 2,68 \text{ N/mm}^2
 \end{aligned} \tag{8.44}$$

$$\begin{aligned}
 a_0 &= \frac{\sigma_{Zw,0}}{-\alpha_T \cdot \Delta T_{N,\text{eq},0} \cdot E_W} = \\
 &= \frac{2,68}{-8 \cdot 10^{-6} \cdot (-14,92) \cdot 26500} = 0,85
 \end{aligned} \tag{8.45}$$

$$\begin{aligned}
 \sigma_{Zw,1}^{\text{Wandfuß}} &= -\frac{\alpha_T \cdot \Delta T_{Mz,G,1} \cdot E_{\text{cm}}}{h_G} \cdot z_{\text{Wandfuß}}^G = \\
 &= -\frac{8 \cdot 10^{-6} \cdot 10 \cdot 26500}{7,8} \cdot (-0,31) = 0,08 \text{ N/mm}^2
 \end{aligned} \tag{8.46}$$

mit: $a_1 = 1$

$$\begin{aligned}
 \sigma_{Zw,1}^{\text{Wandkopf}} &= -\frac{\alpha_T \cdot \Delta T_{Mz,G,1} \cdot E_{\text{cm}}}{h_G} \cdot z_{\text{Wandkopf}}^G = \\
 &= -\frac{8 \cdot 10^{-6} \cdot 10 \cdot 26500}{7,8} \cdot (-6,31) = 1,72 \text{ N/mm}^2
 \end{aligned} \tag{8.47}$$

mit: $a_1 = 1$

$$\begin{aligned}
 l_{cr,W}^{\text{Wandkopf}} &= \sqrt{\frac{2 \cdot f_{ctm}}{A_G \cdot \gamma_c} \cdot \frac{I_G}{|z_{\text{Wandkopf}}^G|}} \leq \frac{L}{2} \\
 &= \sqrt{\frac{2 \cdot 3,05}{31,80 \cdot 0,025} \cdot \frac{83,68}{|-6,31|}} = 10,09 \text{ m} \leq \infty \\
 &\text{mit: } A_G = 31,80 \text{ m}^2 \\
 &\text{und: } I_G = 83,68 \text{ m}^4 \\
 &\text{und: } L = \infty
 \end{aligned} \tag{8.48}$$

$$\begin{aligned}
 n^{\text{Wandkopf}} &= 1,1 \cdot \left[\left(\frac{\sigma_{Zw,0}^{\text{Wandkopf}}}{a_0^{0,6}} + \frac{\sigma_{Zw,1}^{\text{Wandkopf}}}{a_1^{0,6}} \right) \cdot \frac{l_{cr,W}^{\text{Wandkopf}} \cdot k_{BD}}{E_{cm} \cdot w_k} - 1 \right] = \\
 &= 1,1 \cdot \left[\left(\frac{2,68}{0,85^{0,6}} + \frac{1,72}{1^{0,6}} \right) \cdot \frac{10,09 \cdot 0,75}{26500 \cdot 0,20 \cdot 10^{-3}} - 1 \right] = 6,24 \rightarrow 7 \\
 &\text{mit: } k_{BD} = 0,75 \text{ für } \sigma_{Zw}^{\text{Wandkopf}} < 2 \cdot f_{ctm}
 \end{aligned} \tag{8.49}$$

$$a_{s,min,erf}^{\text{Wandfuß}} = 0,07 \cdot b_W \cdot \frac{f_{ctm}}{f_{yk}} = 0,07 \cdot 0,8 \cdot \frac{3,05}{550} \cdot 10^4 = 3,11 \text{ cm}^2/\text{m} \leq 25 \text{ cm}^2/\text{m} \tag{8.50}$$

$$a_{s,min,gew}^{\text{Wandfuß}} = 3,35 \text{ cm}^2/\text{m} \quad \emptyset 8/15$$

$$\begin{aligned}
 a_{s,min,erf}^{\text{Wandkopf}} &= \sqrt{\frac{d_s \cdot d_1^2 \cdot b^2 \cdot f_{ctm}}{w_k \cdot E_s} \cdot (0,5 + 0,34 \cdot n^{\text{Wandkopf}})} = \\
 &= \sqrt{\frac{25 \cdot 5,25^2 \cdot 100^2 \cdot 3,05}{0,20 \cdot 200000} \cdot (0,5 + 0,34 \cdot 7)} = 38,90 \text{ cm}^2/\text{m}
 \end{aligned} \tag{8.51}$$

$$a_{s,min,gew}^{\text{Wandkopf}} = 39,27 \text{ cm}^2/\text{m} \quad \emptyset 25/12,5$$

$$\begin{aligned}
 A_{s,min,erf}^{\text{Zugband}} &= \sqrt{\frac{d_s \cdot d_1^2 \cdot b^2 \cdot f_{ctm}}{w_k \cdot E_s} \cdot (0,5 + 0,34 \cdot n^{\text{Wandkopf}})} = \\
 &= \sqrt{\frac{25 \cdot 5,25^2 \cdot 80^2 \cdot 3,05}{0,20 \cdot 200000} \cdot (0,5 + 0,34 \cdot 7)} = 31,12 \text{ cm}^2
 \end{aligned} \tag{8.52}$$

$$A_{s,min,gew}^{\text{Zugband}} = 34,36 \text{ cm}^2 \quad 7\emptyset 25$$

9 Diskussion der Ergebnisse

Bemessungsaufwand Das Bemessungsmodell „Weiße Wanne klassisch“ überzeugt durch einen sehr geringen Bemessungsaufwand. Da für den Nachweis „früher Zwang“ aufbereitete Bemessungsdiagramme in der Richtlinie zur Verfügung stehen, ist der Aufwand ausschließlich auf das Ablesen der erforderlichen Bewehrungsmenge beschränkt. Die Hintergründe dieser Bemessung sind aber im Verfahren nicht transparent, sodass etwaige ingenieurmäßige Modifikationen im Einzelfall nahezu unmöglich sind.

Die Anwendung des Bemessungsverfahrens „Analytische Bemessung“ ist deutlich transparenter, geht aber auch mit einem größeren Aufwand einher. Dies ist bereits an der wesentlich höheren Anzahl an erforderlichen Eingangsgrößen erkennbar. Durch die in [13] zur Verfügung stehenden Bestimmungsgleichungen wird das auf der Verformungskompatibilität beruhende Nachweisverfahren jedoch praxisgerecht zur Verfügung gestellt.

Das Bemessungsverfahren „Numerische Simulation“ erfordert den höchsten Aufwand in der Anwendung. Dies liegt daran, dass entsprechende thermomechanische Berechnungsmodelle zunächst aufgebaut, anschließend die Ergebnisse simuliert und schließlich diese ausgewertet werden müssen. Insbesondere ist zum Aufbau der Berechnungsmodelle ein hohes Maß an Spezialwissen erforderlich.

Der Bemessungsaufwand bei Anwendung des Verfahrens „BAW Merkblatt Zwang“ ist vergleichbar mit dem des Bemessungsverfahrens „Analytische Bemessung“. Die Anwendung der Bestimmungsgleichungen ist aufgrund der kombinierten Betrachtung von frühem und spätem Zwang etwas komplexer. Mit Blick auf die hierdurch ermöglichte fugenlose Bauweise scheint dieser Mehraufwand jedoch gerechtfertigt.

Bewehrungsmenge Die Bemessungsphilosophie des Bemessungsmodells „Weiße Wanne optimiert“ ist die Rissvermeidung. Aus diesem Grund ist bei erfolgreichem Nachweis sowohl beim Verfahren „Analytische Bemessung“ als auch beim Verfahren „Numerische Simulation“ ausschließlich eine konstruktive Mindestbewehrung als Mindestbewehrung zur Begrenzung der Rissbreite ausreichend. Gegenüber dem Ergebnis entsprechend dem Bemessungsmodell „Weiße Wanne klassisch“ ist damit eine deutliche Reduktion der Mindestbewehrung zur Begrenzung der Rissbreite möglich, sofern der Entwurf der Wanne die Rissvermeidung zulässt. Kann mit der analytischen Bemessung die Rissvermeidung nicht nachgewiesen werden, empfiehlt sich die numerische Simulation, welche den realen Verhältnissen entsprechend genauere Ergebnisse liefert. Natürlich liegen die Ergebnisse aus der analytischen Bemessung immer auf der sichereren Seite. Auch im Hinblick auf den gewählten Dehnfugenabstand kann die numerische Simulation durch die Bereitstellung der Simulationsergebnisse für den späten Zwang nützlich werden. In der Arbeit ist dies in Kapitel 7 erkennbar, wobei auch bei einem Dehnfugenabstand von 30 m die Rissvermeidung nachgewiesen werden konnte. Anzumerken ist, dass im Kapitel 7 der maximal mögliche Dehnfugenabstand ohne auftretende Makrorissbildung für das in Kapitel 2 beschriebene Untersuchungsbeispiel aufgezeigt wird. Durch die im zweiten Schritt berücksichtigten viskoelastischen Betoneigenschaften konnte mit den Simulationsergebnissen der Nachweis erbracht werden.

Das Bemessungsverfahren „BAWMerkblatt Zwang“ führt für das untersuchte Beispiel zu einer deutlichen Zunahme der erforderlichen Mindestbewehrung zur Begrenzung der Rissbreite gegenüber den anderen angewendeten Verfahren. Durch den Verzicht auf Dehnfugen nimmt die Zwangbeanspruchung zu, was sich direkt in der erforderlichen Bewehrungsmenge zur Begrenzung der Rissbreite niederschlägt. Die ermittelte Mindestbewehrung stellt aber die Obergrenze für das untersuchte Beispiel dar, da hier mit $L = \infty$ gerechnet wurde. Mit Berücksichtigung einer tatsächlichen Bauwerkslänge kann demgegenüber noch ein moderater Rückgang der erforderlichen Mindestbewehrung erwartet werden.

Dehnfugenabstand Der Erhaltungsaufwand für das geplante Bauwerk hängt direkt vom gewählten Dehnfugenabstand ab. Je weniger Dehnfugen am Bauwerk vorhanden sind, umso geringer fällt erfahrungsgemäß der Aufwand für die Erhaltung aus. Aufgrund der zusätzlich aufwändigen Herstellung der Fugen ist die Reduzierung derselben generell wirtschaftlich sinnvoll. Die Anwendbarkeit der in dieser Arbeit verwendeten Bemessungsverfahren ist, wie bereits mehrmals erwähnt, im Hinblick auf den vorgesehenen Dehnfugenabstand beschränkt. Trotzdem können mit den in Abb. 9.1 angeführten Verfahren aufgrund der verschiedenen zu Grunde liegenden Bemessungsphilosophien Bauwerke mit beliebigen Abschnittslängen bemessen werden. Es muss dabei jedoch mit unterschiedlich hohem Bemessungsaufwand und unterschiedlichen Mindestbewehrungsmengen gerechnet werden.

Abb. 9.1 gibt einen Überblick über die Ergebnisse dieser Arbeit. Die einzelnen Bemessungsverfahren werden im Hinblick auf den Bemessungsaufwand, die erforderliche Bewehrungsmenge und den Erhaltungsaufwand für das geplante Bauwerk bei unterschiedlichen Dehnfugenabständen bewertet.

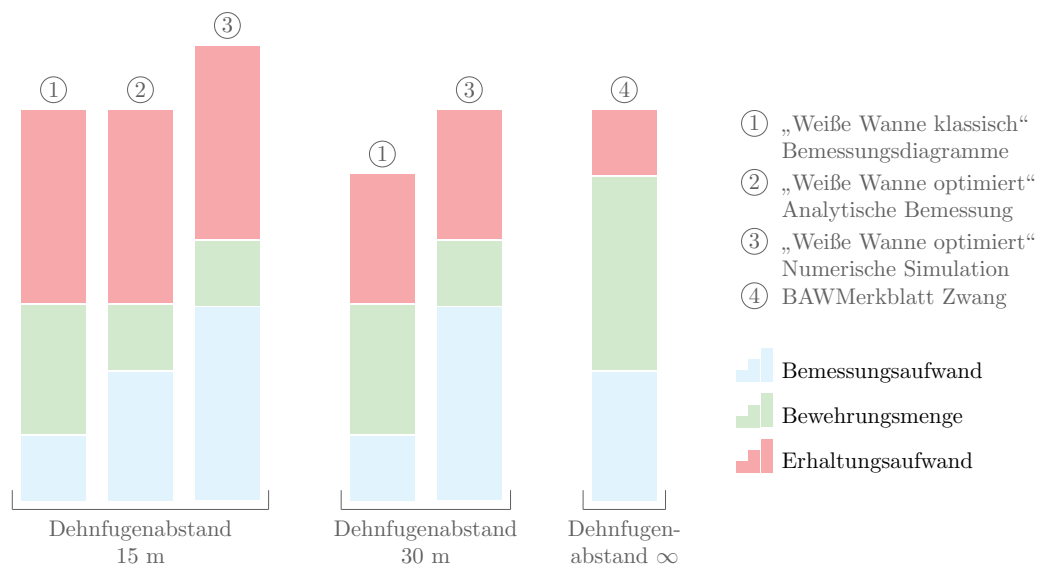


Abb. 9.1: Bewertung der Bemessungsverfahren in Abhängigkeit vom Dehnfugenabstand

Literaturverzeichnis

- [1] BÖDEFELD, Jörg: *Rissmechanik in dicken Stahlbetonbauteilen bei abfließender Hydrationswärme*, Universität Leipzig, Dissertation, 2010
- [2] BUNDESANSTALT FÜR WASSERBAU: *Merkblatt „Zwang bei fugenlosen Wasserbauwerken“*. 2018. – Stand: 2018-07-04
- [3] FREIESLEBEN, Hansen P. ; PEDERSEN, E. J.: Måleinstrument til kontrol af betons haerdning. In: *Nordisk Betong* Bd. 1. Nordiska Betongfoerbundet, Stockholm, 1977, S. 21 – 25
- [4] JĘDRZEJEWSKA, Agnieszka ; BENBOUDJEMA, Farid ; LACARRIÈRE, Laurie ; AZENHA, Miguel ; SCHLICKE, Dirk ; PONT, Stefano D. ; DELAPLACE, Arnaud ; GRANJA, José ; HÁJKOVÁ, Karolína ; HEINRICH, Peter J. ; SCIUMÈ, Giuseppe ; STRIEDER, Emanuel ; STIERSCHNEIDER, Elisabeth ; ŠMILAUER, Vít ; TROYAN, Vyacheslav: COST TU1404 benchmark on macroscopic modelling of concrete and concrete structures at early age: Proof-of-concept stage. In: *Construction and Building Materials* 174 (2018), S. 173 – 189
- [5] JONASSON, Jan-Erik: *Slipform construction - calculations for assessing protection against early freezing*. Swedish Cement and Concrete Research Institute, Stockholm, 1984
- [6] KAINER, Bernd: *Bemessung von WU-Konstruktionen unter Berücksichtigung des tatsächlichen Bauteilverhaltens - Verifikationsberechnungen für die 4. Überarbeitung der ÖBV-Richtlinie „Weiße Wannen“*, Technische Universität Graz, Institut für Betonbau, Diplomarbeit, 2015
- [7] ÖNORM B 1992-1-1: *Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken - Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau (Nationale Festlegungen zu ÖNORM EN 1992-1-1, nationale Erläuterungen und nationale Ergänzungen)*. Österreichisches Normungsinstitut, Wien, 2011. – Ausgabe: 2011-12-01
- [8] ÖNORM EN 1992-1-1: *Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken - Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau*. Österreichisches Normungsinstitut, Wien, 2015. – Ausgabe: 2015-02-15
- [9] ONR 23303: *Prüfverfahren Beton (PVB) Nationale Anwendung der Prüfnormen für Beton und seiner Ausgangsstoffe*. Österreichisches Normungsinstitut, Wien, 2010. – Ausgabe: 2010-09-01
- [10] RAPHAEL, Wassim ; FADDOUL, Rafic ; GEARA, Fadi ; CHATEAUNEUF, Alaa: Improvements to the Eurocode 2 shrinkage model for concrete using a large experimental database. In: *Structural Concrete* 13 (2012), Nr. 3, S. 174 – 181

- [11] SCHLICKE, Dirk: *Monographic Series TU Graz / Schriftenreihe des Instituts für Betonbau*. Bd. 4: *Mindestbewehrung für zwangbeanspruchten Beton*. 2. überarbeitete Auflage. Verlag der Technischen Universität Graz, 2016
- [12] SCHLICKE, Dirk ; MATIAŠKOVÁ, Lýdia ; ŠOLTÉSZ, Július: Effect of partial restraining conditions and Poisson's ratio in bottom-restrained walls. In: AZENHA, Miguel (Hrsg.) ; SCHLICKE, Dirk (Hrsg.) ; BENBOUDJEMA, Farid (Hrsg.) ; JĘDRZEJEWSKA, Agnieszka (Hrsg.): *Final Conference of COST Action TU1404 „Interdisciplinary Approaches for Cement-based Materials and Structural Concrete: Synergizing Expertise and Bridging Scales of Space and Time“* Bd. 1 & 2, RILEM Publications S.A.R.L., Paris, 2018 (SynerCrete'18), S. 573 – 578
- [13] ÖSTERREICHISCHE BAUTECHNIK VEREINIGUNG: *Merkblatt „Analytisches Bemessungsverfahren für die Weiße Wanne optimiert“*. Österreichische Bautechnik Vereinigung, Wien, 2018. – Ausgabe: Februar 2018
- [14] ÖSTERREICHISCHE BAUTECHNIK VEREINIGUNG: *Richtlinie „Wasserundurchlässige Betonbauwerke - Weiße Wannen“*. Österreichische Bautechnik Vereinigung, Wien, 2018. – Ausgabe: Februar 2018
- [15] TUE, Nguyen V. ; BÖDEFELD, Jörg ; DIETZ, Jörg: Einfluss der Eigenspannung auf die Rissbildung bei dicken Bauteilen im jungen Betonalter. In: *Beton- und Stahlbetonbau* 102 (2007), Nr. 4, S. 215 – 222
- [16] WESCHE, Karlhans: *Baustoffe für tragende Bauteile*. Bd. 2: *Beton, Mauerwerk (Nichtmetallisch-anorganische Stoffe): Herstellung, Eigenschaften, Verwendung, Dauerhaftigkeit*. 3. überarbeitete Auflage. Bauverlag GmbH, Wiesbaden und Berlin, 1993

Abbildungsverzeichnis

1.1	Zusammenhang der angewendeten Bemessungsverfahren	4
2.1	Untersuchungsbeispiel	6
2.2	Messwerte zur Wärmeentwicklung des Betons infolge Betonerhärtung	9
2.3	Messwerte zur Entwicklung des Elastizitätsmoduls des Betons infolge Betonerhärtung	9
2.4	Messwerte zur Entwicklung der Zugfestigkeit des Betons infolge Betonerhärtung	9
2.5	Verschiebung Tagesgang aufgrund Betoneinbauzeitpunkt	11
2.6	Umgebungstemperaturentwicklung im Erhärtungszeitraum der Bodenplatte - Extremsommer	11
2.7	Umgebungstemperaturentwicklung im Erhärtungszeitraum der Wand - Extremsommer	12
2.8	Umgebungstemperaturentwicklung im Nutzungszeitraum	13
2.9	Zusammenhang zwischen Anforderungsklasse, Wassersäule WS (Bemessungswasserstand) und Konstruktionsklasse gemäß [14]	16
3.1	Einfluss der Eigenspannungen auf die Bewertung der Rissgefahr gemäß [11]	18
3.2	Begrenzung der Zwangsschnittgröße auf die Risskraft durch sukzessive Rissbildung aus [11]	20
3.3	Vorgehensweise „Analytische Bemessung“	22
3.4	Vorgehensweise „Numerische Simulation“	24
3.5	Unterschiedliche Ausrichtungen von Wärmefluss und Zwangbeanspruchung - Bodenplatte	27
3.6	Unterschiedliche Ausrichtungen von Wärmefluss und Zwangbeanspruchung - Wand	27
4.1	Mindestbewehrung Bodenplatte (Nachweis „früher Zwang“) gemäß [14]	36
4.2	Mindestbewehrung Wand (Nachweis „früher Zwang“) gemäß [14]	37
5.1	Überprüfung der Anwendungsvoraussetzung Wärmeentwicklung gemäß [13]	39
5.2	Überprüfung der Anwendungsvoraussetzung Entwicklung des Elastizitätsmoduls gemäß [13]	39
5.3	Überprüfung der Anwendungsvoraussetzung Entwicklung der Zugfestigkeit gemäß [13]	39
5.4	Spannungsverteilung über die Wandhöhe	46
6.1	Materialmodell zur Wärmeentwicklung des Betons infolge Betonerhärtung	48
6.2	Materialmodell zur Entwicklung des Elastizitätsmoduls des Betons infolge Betonerhärtung	48
6.3	Materialmodell zur Entwicklung der Zugfestigkeit des Betons infolge Betonerhärtung	48
6.4	Berechnungsmodelle Bodenplatte	52
6.5	Berechnungsmodelle Wand	53

6.6	Temperatur Bodenplatte	54
6.7	Spannung mit Eigenspannung Bodenplatte	54
6.8	Spannung ohne Eigenspannung Bodenplatte	55
6.9	Rissindex Bodenplatte	55
6.10	Makrorissindex Bodenplatte	56
6.11	Temperatur Wand	57
6.12	Spannung mit Eigenspannung Wand	57
6.13	Spannung ohne Eigenspannung Wand	58
6.14	Rissindex Wand	58
6.15	Makrorissindex Wand	58
6.16	Temperatur Bodenplatte	60
6.17	Temperatur Wand	60
6.18	Spannung mit Eigenspannung Bodenplatte	60
6.19	Spannung mit Eigenspannung Wand	61
6.20	Spannung ohne Eigenspannung Bodenplatte	61
6.21	Spannung ohne Eigenspannung Wand	61
6.22	Rissindex Bodenplatte	62
6.23	Rissindex Wand	62
6.24	Makrorissindex Bodenplatte	62
6.25	Makrorissindex Wand	63
6.26	Temperatur Bodenplatte	64
6.27	Temperatur Wand	64
6.28	Temperatur Wand	64
6.29	Spannung mit Eigenspannung Bodenplatte	65
6.30	Spannung mit Eigenspannung Wand	65
6.31	Spannung mit Eigenspannung Wand	65
6.32	Spannung ohne Eigenspannung Bodenplatte	66
6.33	Spannung ohne Eigenspannung Wand	66
6.34	Rissindex Bodenplatte	67
6.35	Rissindex Wand	67
6.36	Rissindex Wand	67
6.37	Makrorissindex Bodenplatte	68
6.38	Makrorissindex Wand	68
6.39	Temperatur Bodenplatte	69
6.40	Temperatur Wand	69
6.41	Temperatur Wand	69
6.42	Spannung mit Eigenspannung Bodenplatte	70
6.43	Spannung mit Eigenspannung Wand	70
6.44	Spannung mit Eigenspannung Wand	70
6.45	Spannung ohne Eigenspannung Bodenplatte	71
6.46	Spannung ohne Eigenspannung Wand	71
6.47	Rissindex Bodenplatte	72
6.48	Rissindex Wand	72
6.49	Rissindex Wand	72
6.50	Makrorissindex Bodenplatte	73
6.51	Makrorissindex Wand	73
7.1	Berechnungsmodelle Bodenplatte	76
7.2	Berechnungsmodelle Wand	77
7.3	Temperatur Bodenplatte	78

7.4	Spannung mit Eigenspannung Bodenplatte x-Richtung	78
7.5	Spannung mit Eigenspannung Bodenplatte y-Richtung	79
7.6	Spannung ohne Eigenspannung Bodenplatte x-Richtung	79
7.7	Spannung ohne Eigenspannung Bodenplatte y-Richtung	79
7.8	Temperatur Wand	80
7.9	Spannung mit Eigenspannung Wand	80
7.10	Spannung ohne Eigenspannung Wand	81
8.1	Vorgehensweise „BAWMerckblatt Zwang“	84
9.1	Bewertung der Bemessungsverfahren in Abhängigkeit vom Dehnfugenabstand	95

Tabellenverzeichnis

1.1	Übersicht über die Verfahren zum Nachweis der Gebrauchstauglichkeit „bei überwiegender Zwangbeanspruchung“ gemäß [14]	2
1.2	Übersicht über die angewendeten Bemessungsverfahren bei der Variation des Dehnfugenabstands	3
2.1	Geometriekenngößen	7
2.2	Materialkenngrößen	7
2.3	Erweiterte Materialkenngrößen	8
2.4	Thermische Kenngrößen	14
2.5	Anforderungsklasse A ₁ gemäß [14]	15
2.6	Konstruktionsklasse Kon ₁ : Kriterien für die Konstruktion und Bemessung gemäß [14]	17
3.1	Koeffizienten zur Berücksichtigung der viskoelastischen Effekte	33