

Diploma Thesis

Directive „Weiße Wannen 2018“ Comparative calculations on floor slabs

submitted in satisfaction of the requirements for the degree of
Diplom-Ingenieur
of the TU Wien, Faculty of Civil Engineering

Diplomarbeit

Richtlinie „Weiße Wannen 2018“ Vergleichende Berechnungen für Bodenplatten

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines
Diplom-Ingenieurs
eingereicht an der Technischen Universität Wien, Fakultät für Bauingenieurwesen

von

Stefan Hagmann, BSc

Matr. Nr.: 00225823

unter der Anleitung von

Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. **Andreas Kolbitsch**

Institut für Hochbau, Baudynamik und Gebäudetechnik
Forschungsbereich Hochbaukonstruktionen und Bauwerkserhaltung
Technische Universität Wien,
Karlsplatz 13/208, A-1040 Wien

Wien, im Mai 2021

Danksagung

In der Danksagung möchte ich die Gelegenheit ergreifen, mich bei all jenen Personen zu bedanken, die mich während meines Studiums und im Besonderen während und bei der Verfassung meiner Diplomarbeit unterstützt, beraten und begleitet haben.

Dank gebührt Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Andreas Kolbitsch, der mich auf das vorliegende Themengebiet aufmerksam gemacht hat, mir die Möglichkeit zur Wahl und Ausarbeitung gab und mir bei der Erstellung der Diplomarbeit immer hilfestellend zur Seite stand.

Mein Dank gilt auch Dipl.-Ing. Alfred Moser und Ass.-Prof. Dipl.-Wirsch.-Ing. Dr. techn. Dirk Schlicke, die mir im persönlichen Gespräch oder per Mail-Korrespondenz hilfreich zur Seite standen.

Meinen Eltern Elisabeth und Alois Hagmann sowie meiner gesamten Familie gilt ein ganz besonderer und von Herzen kommender Dank. Sie gaben mir in den Jahren meines Studiums immer Rückhalt und Unterstützung – Danke dafür!

Meiner Lebensgefährtin Christa Neugschwendtner, MA sei diese Diplomarbeit gewidmet. Ihr gilt der größte Dank für ihre Unterstützung und den Rückhalt sowie das aufgebrachte Verständnis, dass neben Beruf und Studium oft das Privatleben hintenangestellt wurde.

Genderhinweis

Der Autor legt größten Wert auf Diversität und Gleichbehandlung. Im Sinne der besseren Lesbarkeit wird in dieser Diplomarbeit darauf verzichtet, geschlechtsspezifische Formulierungen zu verwenden. Soweit personenbezogene Bezeichnungen nur in männlicher Form angeführt sind, beziehen sie sich auf Männer, Frauen und Diverse in gleicher Weise.

Kurzfassung

Das Thema des Feuchteschutzes erdanliegender Bauteile im allgemeinen Hochbau sowie im Verkehrswegebau bei diversen Wannenbauwerken stellt neben der geforderten Tragfähigkeit hohe Anforderungen an die Dauerhaftigkeit und Gebrauchstauglichkeit solcher Bauwerke dar. Wasserundurchlässige Betonbauwerke übernehmen hierbei neben der tragenden auch die Funktion des Schutzes vor durchdringender Feuchte. Dies wurde in den Vorgängerversionen der öbv-Richtlinie „Wasserundurchlässige Betonbauwerke – Weiße Wannen“ durch die Begrenzung der Rissbreiten im Betonbauteil auf ein akzeptables Maß gewährleistet. Die im Februar 2018 neu aufgelegte Richtlinie stellt neben diesem klassischen Konzept nun auch ein neues optimiertes Bemessungsmodell zur Verfügung. Mit diesem wird ein rissfreies Betonbauwerk bei Verwendung eines speziellen Betonstandards und der Einhaltung der geforderten Begleitmaßnahmen bei gleichzeitig geringeren erforderlichen Bewehrungsmengen erzielt.

Ziel dieser Diplomarbeit ist es, neben den allgemeinen Grundlagen und Mechanismen, die die Rissbildung in Betonbauteilen beeinflussen, die Formelapparate der geltenden Regelwerke zu erläutern. Zudem soll das Einsparungspotential des neuen Bemessungsmodells „Weiße Wanne optimiert“ hinsichtlich der erforderlichen Bewehrungsmenge anhand vergleichender Berechnungen an Bodenplatten im Dickenbereich von 0,20 bis 5,00 m aufgezeigt werden. In einem weiteren Schritt sollen Bemessungsdiagramme analog zu jenen des Bemessungsmodells „Weiße Wanne klassisch“ erstellt werden.

Grundlagen für die Untersuchung und vergleichenden Berechnungen dieser Arbeit sind einerseits eine umfangreiche Literaturrecherche und andererseits die zugehörigen europäischen und nationalen Regelwerke. Dies sind im Speziellen die öbv-Richtlinie „Wasserundurchlässige Betonbauwerke – Weiße Wannen“ (2018), das öbv-Merkblatt „Analytisches Bemessungsverfahren für die Weiße Wanne optimiert“ (2018) sowie die ÖNORM EN 1992-1-1:2015 und die ÖNORM B 1992-1-1:2018.

Die Ergebnisse zeigen durchwegs ein erhebliches Einsparungspotential in der anzuordnenden Bewehrungsmenge bei Anwendung des neuen Bemessungsmodells. Vor allem mit den angeführten Betonrezepturen im betreffenden öbv-Merkblatt kann der Nachweis der Rissevermeidung fast im gesamten Auswertungsbereich erfolgreich geführt werden. Aufgrund der Abhängigkeit des Formelapparates von versuchstechnisch ermittelten Materialkennwerten gelingt die Erstellung von zugehörigen Bemessungsdiagrammen für den allgemeinen Fall nicht.

Abstract

In order to obtain moisture proof standard-compliant earth-facing structural components, in specific trough formed structures in general building construction or road construction, high requirements for the durability and serviceability, in addition to the load bearing specifications, have to be met. Water-impermeable concrete structures do not take only the load bearing but also the protective function against penetrating moisture. In the preceding version of the öbv-guideline “Wasserundurchlässige Betontragwerke – Weiße Wannen” the requirements were set by limiting the crack widths in the concrete. The new guideline from 2018 then additionally included an optimized design model, resulting in a crack-free concrete structure requiring lower amounts of reinforcement when using a specific concrete standard and complying with the required accompanying measures.

The aim of this master thesis is to analyze the general principles and mechanisms influencing the crack formation in concrete components and to explain the different equations formulated in the standards, guidelines and regulations. In addition, the material-saving potential of the new design model “Weiße Wanne optimiert” with regard to the required amount of reinforcement is shown. This is done by means of comparative calculations of floor slabs with a thickness range of 0.20 to 5.00 m and the creation of design diagrams analog to those of the design model.

The investigation and comparative calculations presented in this thesis are on the one hand based on extensive literature research and on the other hand on the corresponding European and national standards. A focus is set on the öbv-guideline “Wasserundurchlässige Betontragwerke – Weiße Wannen” (2018), the öbv-information sheet “Analytische Bemessungsverfahren für die Weiße Wanne optimiert” (2018), as well as ÖNORM EN 1992-1-1:2015 and ÖNORM B 1992-1-1:2018.

The results consistently show considerable saving potential in the amount of required reinforcement when calculated using the new design model. Especially with the equations presented in the respective öbv-information sheet, the verification of crack prevention can be successfully proven for almost the entire evaluation area. Due to the dependency of the model on experimentally determined material parameters the creation of design diagrams for the general case is not possible.

Vorwort

Mit dem facettenreichen Gebiet des Feuchteschutzes erdanliegender Bauteile und somit auch im Speziellen mit dem Themengebiet „Wasserundurchlässiger Betonbauwerke – Weiße Wannen“ kam ich durch meine berufliche Tätigkeit als Konstrukteur und Statiker schon früh in Berührung. Dabei zeigte sich jedoch, dass die Begriffe „Weiße Wannen“, „WU-Beton“ und artverwandte Ausdrücke im Baualltag meist einen großen Interpretationsspielraum in deren Bedeutung für Bauherrn, Planer und ausführende Baufirmen geben und darstellen. Die hierzugehörigen Richtlinien und Merkblätter, wie die öbv-Richtlinie „Wasserundurchlässige Betonbauwerke – Weiße Wannen“ und das öbv-Merkblatt „Analytisches Bemessungsverfahren für die Weiße Wanne optimiert“, beide im Februar 2018 neu aufgelegt, repräsentieren für Österreich den aktuellen Stand der Technik auf diesem Gebiet und sollten für alle Beteiligten gleichen Wissensstand garantieren.

Nichtsdestotrotz wird in der Praxis unter anderem oft von „dichten Bauwerken analog der WU-Richtlinie“ gesprochen, wenn das Konzept der „Weißen Wannen“ nicht in seiner Gesamtheit umgesetzt wird, sondern etwa nur die erforderliche Bewehrung gemäß den Diagrammen der öbv-Richtlinie angeordnet wird jedoch auf die Verwendung des speziellen Betonstandards, auf die Einhaltung der geforderten Frischbetontemperatur oder die intensivere Nachbehandlung des Betonbauteils verzichtet wird.

Die Konsequenz aus dieser „Trial & Error“-Methode sind beim Gelingen geringere Baukosten, beim Versagen jedoch oft Streitigkeiten und Gerichtsprozesse der Beteiligten, was am Anfang des Bauprozesses mit „wasserundurchlässiges Betonbauwerk“ gefordert, geplant oder gemeint wurde. Die begleitende Dissonanz von Theorie und Praxis und der Hinweis meines betreuenden Professors Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Andreas Kolbitsch auf die Neuauflage der öbv-Richtlinie, sowie die Einführung eines neuen Bemessungsmodells in dieser, weckten mein Interesse an diesem Themengebiet.

Die nachfolgende Arbeit beschäftigt sich mit den theoretischen Grundlagen, dem Materialverhalten und den wesentlichen Einflussfaktoren, die die Rissbildung in Betonbauteilen maßgebend beeinflussen, fördern oder zu verhindern versuchen. Im Anschluss daran werden die einzelnen Bemessungsmodelle der Norm und der Richtlinie in Hinblick auf deren erforderliche Bewehrungsmenge und Bewehrungsgehalt mit Hilfe vergleichender Berechnungen an Bodenplatten gegenübergestellt und im Speziellen das Einsparungspotential des neuen Bemessungsmodells der „Weißen Wanne optimiert“ untersucht. Des Weiteren wird untersucht, ob für dieses Modell sinnvolle Bemessungsdiagramme analog denen des Bemessungsmodells „Weiße Wanne klassisch“ entwickelt werden können.

Inhaltsverzeichnis

DANKSAGUNG	II
KURZFASSUNG	III
ABSTRACT	IV
VORWORT	V
INHALTSVERZEICHNIS	VI
1 STAND DER TECHNIK	1
1.1 Allgemeiner Feuchtigkeitsschutz	1
1.1.1 Wasserbeanspruchungsarten	1
1.1.2 Abdichtungsarten gegen drückendes Wasser	3
1.2 Weiße Wannен.....	5
1.2.1 Entwurfsgrundlagen und Klassifizierung.....	7
1.2.2 Bauweise.....	10
1.2.3 Allgemeine Bemessungsphilosophie	11
1.3 Gebrauchstauglichkeitsnachweis nach öbv-RL „Weiße Wannен“	13
1.3.1 Gebrauchstauglichkeitsnachweis bei überwiegender Lastbeanspruchung.....	14
1.3.2 Gebrauchstauglichkeitsnachweis bei überwiegender Zwangsbeanspruchung.....	15
2 GRUNDLAGEN.....	17
2.1 Beton	17
2.1.1 Frischbeton.....	17
2.1.2 Junger Beton.....	17
2.1.3 Festbeton	17
2.2 Zement	18
2.3 Hydratation	19
2.3.1 Chemische Grundlagen	20
2.3.2 Isotherme, adiabatische und teiladiabatische Bedingungen	21
2.4 Wasserzementwert, Hydratationsgrad und effektives Betonalter	23
2.4.1 Wasserzementwert	23
2.4.2 Hydratationsgrad	24
2.4.3 Effektives Betonalter	26
2.5 Hydratationswärme	27
2.5.1 Ermittlung der Hydratationswärme aus der Zusammensetzung des Zementes.....	28
2.5.2 Experimentelle Bestimmung der Hydratationswärme	31
2.5.3 Hydratationswärmerate	32

2.6	Temperaturentwicklung im erhärtenden Beton	34
2.6.1	Höhe und zeitlicher Verlauf der Hydratationswärmeabgabe.....	35
2.6.2	Bauteildicke.....	36
2.6.3	Zementgehalt.....	37
2.6.4	Wärmekapazität des Betons.....	38
2.6.5	Wärmeleitfähigkeit des Betons.....	39
2.6.6	Wärmeübergangsbedingungen an den Grenzen.....	41
2.6.7	Frischbetontemperatur.....	46
2.6.8	Lufttemperatur.....	49
2.6.9	Künstliche Kühlungsmaßnahmen.....	51
2.7	Festigkeitseigenschaften des erhärtenden Betons	52
2.7.1	Zeitliche Entwicklung der Betondruckfestigkeit.....	53
2.7.2	Zeitliche Entwicklung der Betonzugfestigkeit.....	55
2.7.3	Elastizitätsmodul.....	57
2.7.4	Querdehnungsverhalten.....	59
2.7.5	Temperaturausdehnungskoeffizient.....	59
2.7.6	Zugbruchdehnung des Betons.....	60
2.8	Schwinden des Betons	62
2.8.1	Autogenes Schwinden.....	62
2.8.2	Trocknungsschwinden.....	63
2.9	Viskoelastische Eigenschaften des Betons	63
3	RISSVERHALTEN VON BETONBAUTEILEN	66
3.1	Rissarten und ihre Auswirkung auf die Wasserundurchlässigkeit	66
3.2	Zwangsspannungen im Beton	69
3.2.1	Grundlegende Entwicklung von Zwangsspannungen im Versuch.....	70
3.2.2	Innerer und äußerer Zwang.....	71
3.3	Rissgefahr infolge Zwangsbeanspruchung	72
3.4	Bauteilspezifisches Verhalten infolge Zwangsbeanspruchung	73
3.4.1	Bodenplatten.....	74
4	BEMESSUNGSMODELLE	78
4.1	Rissbreitennachweise nach ÖNORM	78
4.1.1	Rissbreitennachweis nach ÖNORM EN 1992-1-1:2015.....	78
4.1.2	Rissbreitennachweis nach ÖNORM B 1992-1-1:2018.....	81
4.2	Bemessungsmodell „Weiße Wanne klassisch“	83
4.3	Bemessungsmodell „Weiße Wanne optimiert“	86
4.3.1	Anwendungsbereich und Voraussetzungen.....	86
4.3.2	Gebrauchstauglichkeitsnachweis nach <i>öbv-MB „Weiße Wanne optimiert“</i>	90
4.3.3	Begrenzung der Rissbreite unter Beachtung der Verformungskompatibilität.....	95
5	VERGLEICHENDE BERECHNUNGEN FÜR BODENPLATTEN	97
5.1	Vergleich <i>BM „WW klassisch“</i> versus ÖNORM	97
5.1.1	Eingangsparameter <i>BM „WW klassisch“</i> versus ÖNORM.....	98

5.1.2	Auswertung <i>BM „WW klassisch“</i> versus ÖNORM.....	98
5.2	Vergleich <i>BM „WW optimiert“</i> versus <i>BM „WW klassisch“</i> / ÖNORM.....	102
5.2.1	Eingangsparameter – Nachweis gemäß <i>öbv-MB „Weiße Wanne optimiert“</i>	103
5.2.2	<i>öbv-MB „Weiße Wanne optimiert“</i> für Betone gemäß Tabelle 4.2	104
5.2.3	<i>öbv-MB „Weiße Wanne optimiert“</i> für Betone gemäß ÖN EN 1992-1-1:2015	107
5.2.4	Begrenzung der Rissbreite unter Beachtung der Verformungskompatibilität.....	112
5.2.5	Bewehrungsvergleich <i>BM „WW optimiert“</i> versus <i>BM „WW klassisch“</i> / ÖNORM.....	117
5.2.6	Bewehrungsgehalt <i>BM „WW optimiert“</i> versus <i>BM „WW klassisch“</i> / ÖNORM	119
6	ERGEBNISSE.....	126
6.1	<i>BM „WW klassisch“</i> versus ÖNORM.....	126
6.2	<i>BM „WW optimiert“</i> versus <i>BM „WW klassisch“</i> / ÖNORM.....	127
6.2.1	Betone mit Materialkennwerten gemäß <i>öbv-MB „Weiße Wanne optimiert“</i>	127
6.2.2	Betone mit Materialkennwerten gemäß ÖNORM EN 1992-1-1:2015	128
7	ZUSAMMENFASSUNG UND FAZIT.....	132
7.1	Zusammenfassung	132
7.2	Fazit.....	134
	LITERATURVERZEICHNIS	136
	TABELLENVERZEICHNIS.....	140
	ABBILDUNGSVERZEICHNIS	141
	ANHANG A.1.....	146
	ANHANG A.2.....	171
	ANHANG A.3.....	190
	ANHANG A.4.....	211

1 Stand der Technik

1.1 Allgemeiner Feuchtigkeitsschutz

Ein angemessener Schutz gegen Feuchtigkeit Zutritt bei erdberührten Bauteilen ist essentiell, um neben der Tragfähigkeit auch die Gebrauchstauglichkeit und Dauerhaftigkeit eines Bauwerks im Nutzungszeitraum zu erhalten. Der Umfang dieser Maßnahmen resultiert dabei einerseits aus der geplanten Art und Nutzung des Bauwerks und andererseits aus Größe und Häufigkeit der Feuchtigkeitsbeanspruchung. [Vgl. PECH und KOLBITSCH (2006); S.54]

1.1.1 Wasserbeanspruchungsarten

Im Wesentlichen sind die Bodenart, Lage des Grundwasserspiegels und Geländeform für die Art der Beanspruchung durch Bodenfeuchte auf ein Bauwerk ausschlaggebend. Die zeitgerechte Festlegung der nachfolgenden Parameter in der Planungsphase ist Grundlage für die Wahl einer angemessenen und wirtschaftlichen Feuchtigkeitsabdichtung: [Vgl. PECH und KOLBITSCH (2006); S. 51]

- Bodenart (bindig oder nichtbindig) der durchörterten Schichten
- Geländeform – eben oder Hanglage
- mögliche wasserführende Schichten im Untergrund
- höchster, auf dem Baugrund zu erwartender Grundwasserspiegel

In der ÖNORM B 3692¹ werden dazu, je nach Erscheinungsform des Wassers im Boden, drei verschiedene Lastfälle für die Wasserbeanspruchung und die Bemessung der auszuführenden Abdichtung angegeben: [Vgl. ÖNORM B 3692 (2014); S. 10]

- Bodenfeuchte
- nichtdrückendes Wasser
- drückendes Wasser

Bodenfeuchte

Unter Bodenfeuchte wird normgemäß kapillar gebundenes oder durch Kapillarkräfte oder Wasserdampfdiffusion fortgeleitetes Wasser bezeichnet, das keinen hydrostatischen Druck auf ein Bauwerk ausübt. Bei Böden mit einem Durchlässigkeitsbeiwert k_f größer 10^{-4} m/s darf der Lastfall „Bodenfeuchte“ angesetzt werden. Wird der Arbeitsraum lückenlos mit drainagierendem Material hinterfüllt und eine wirksame Ableitung der Sickerwässer unterhalb der Fundament-

¹ ÖNORM B 3692: 2014 11 15: Planung und Ausführung von Bauwerksabdichtungen

oberkante gewährleistet, kann auch bei kleineren Werten des Durchlässigkeitsbeiwertes dieser Lastfall angenommen werden. [Vgl. ÖNORM B 3692 (2014); S. 7 f.]

Nach PECH und KOLBITSCH (2006) ist Bodenfeuchte immer anzusetzen. [Vgl. PECH und KOLBITSCH (2006); S. 52]

Nichtdrückendes Wasser

Wird hingegen der Arbeitsraum nicht vollflächig mit drainagierendem Material hinterfüllt und liegt der Durchlässigkeitsbeiwert des Bodens unter 10^{-4} m/s, ist der Lastfall „nichtdrückendes Wasser“, auch als druckloses Wasser bezeichnet, maßgebend. Voraussetzung für diese Einstufung ist jedoch wie beim Lastfall „Bodenfeuchte“ die sichere Ableitung der Sickerwässer unterhalb der Fundamentoberkante. [Vgl. ÖNORM B 3692 (2014); S. 11]

Als nichtdrückendes Wasser wird nach PECH und KOLBITSCH (2006) Wasser in tropfbar, flüssiger Form wie Niederschlags-, Sicker-, Spritz- sowie Nutzwasser bezeichnet, das auf das Bauwerk keinen oder nur temporären, großemäßig untergeordneten hydrostatischen Druck ausübt. [Vgl. PECH und KOLBITSCH (2006); S. 53]

Drückendes Wasser

In allen anderen Fällen, in denen Wasser einen hydrostatischen Druck auf ein Bauwerk hervorruft, muss der Lastfall „drückendes Wasser“ berücksichtigt werden. Normgemäß werden als Beispiele Grundwasser, aufstauendes Sickerwasser sowie Wasser in Behältern diesem Lastfall zugeordnet. [Vgl. ÖNORM B 3692 (2014); S. 7]

Eine systematische Darstellung und Einteilung der vorliegenden Wasserbeanspruchung wird hierzu in Abbildung 1.1 gezeigt.

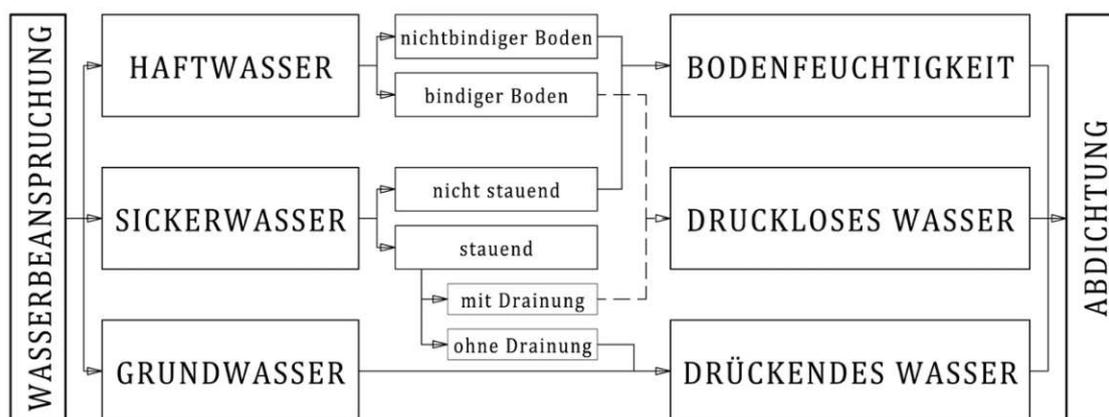


Abbildung 1.1 – Wasser im Boden – Beanspruchungen, Maßnahmen; Darstellung nach [PECH und KOLBITSCH (2006); S. 55 – Abbildung 060.3-02]

1.1.2 Abdichtungsarten gegen drückendes Wasser

Sofern ein Bauwerk in den Bereich des Grundwassers oder des lokal höchsten anzunehmenden Grundwasserspiegels einbindet, müssen die durch Wasser- und Erddruck beanspruchten Bauteile wie Fundamentplatte und erdberührte Wände demgemäß bemessen und mit einer wasserdruckhaltenden Abdichtung versehen werden.

Wird die wasserdruckhaltende Abdichtung mit Hilfe einer zusätzlichen außenliegenden Abdichtungshaut realisiert, so hat sich dafür die Bezeichnung „Schwarze Wann“ eingebürgert. Wird hingegen die Abdichtungsfunktion ausschließlich durch ein wasserundurchlässiges Betonbauwerk übernommen, spricht man von einer „Weißen Wanne“. [Vgl. PECH und KOLBITSCH (2006); S. 75]

Neben diesen beiden Hauptgruppen der Abdichtungsarten haben sich bis dato auch Mischformen, wie die „Braune Wanne“ oder die noch relativ junge „Wanne mit Folienabdichtung“, entwickelt. Die Hauptmerkmale der schwarzen und braunen Wann sowie der Wann mit Folienabdichtung werden in den nächsten Unterabschnitten kurz umrissen, um einen Vergleich dieser Abdichtungsvarianten mit der „Weißen Wanne“ zu ermöglichen.

Schwarze Wann

In der Vergangenheit kamen zur Herstellung hautförmiger Abdichtungen ausschließlich Bitumen oder Teer zur Anwendung. Der Begriff der „Schwarzen Wanne“ resultiert aus diesem Umstand heraus. [Vgl. LOHMEYER und EBELING (2018); S. 49]

Heute kommen neben Bitumenbahnen auch Abdichtungen aus Kunststoffbahnen, Flüssigkunststoffen und kunststoffmodifizierte Bitumendickbeschichtungen zur Anwendung. [Vgl. ÖNORM B 3692 (2014); S. 8]

Als Bemessungskriterien zur normgemäßen Ausführung wasserdruckhaltender Abdichtungen nach ÖNORM B 3692 können die wannenförmige Ausbildung sowie die Eintauchtiefe genannt werden. Die Abdichtung hat den zu schützenden Bauteil wannenartig zu umfassen und muss über den höchsten anzunehmenden Grundwasserpegel oder den Vertragswasserstand um mindestens 50 cm hinausragen. Besonderes Augenmerk in der Herstellung ist dem Übergang von Sohlen- zu Wandabdichtung zu widmen, der als „Kehlstoß“ oder „rückläufiger Stoß“, in Abhängigkeit der vorhandenen Platzverhältnisse, ausgeführt werden kann. [Vgl. PECH und KOLBITSCH (2006); S. 76]

Braune Wann

Die Konstruktion einer „braunen Wanne“ besteht im Wesentlichen aus einer Stahlbetonkonstruktion mit wasserseitig applizierten geotextilen Dichtmatten mit Bentonitfüllung. Durch die Kombination von wasserundurchlässiger Stahlbetonkonstruktion und außenliegender Dichtschicht aus Bentonit wird dabei eine wasserdruckhaltende Abdichtung realisiert.

Bei Zutritt von Wasser können diese als Bentonite bezeichneten, bräunlichen Tonminerale etwa das Fünf- bis Siebenfache ihres Eigengewichtes an Wasser binden. Das Volumen der dabei entstehenden gelartigen Suspension wächst infolge Wasseraufnahme bei ungehinderter Ausdehnung auf ein Vielfaches des Ausgangsvolumens an. Durch blockierte Ausdehnungsmöglichkeiten, resultierend aus Auflast der Fundamentplatte oder Anpressdruck der Hinterfüllung an die erdberührten Wände, bedingt der entstehende Quelldruck die abdichtende Wirkung der Bentonitschicht.

Als Größenordnung kann hier ein Durchlässigkeitsbeiwert k_f von 10^{-11} m/s angenommen werden. Die Anforderungen an die darauffolgende wasserundurchlässige Stahlbetonkonstruktion können im Vergleich zur „weißen Wanne“ reduziert werden. In Abhängigkeit der Anforderungsklasse können Rissweiten von 0,30 – 0,40 mm (0,15 – 0,25 mm bei „weißen Wannern“) bei Ausführung einer „braunen Wanne“ als bedenkenlos angesehen werden. [Vgl. PECH und KOLBITSCH (2006); S. 86 f.]

Die Planung und Ausführung der „braunen Wanne“ ist in Österreich durch die im Juli 2019 erschienene öbv-Richtlinie „Bentonitgeschützte Betonbauwerke – Braune Wannern“², herausgegeben von der Österreichischen Bautechnik Vereinigung, geregelt und stellt den heutigen Stand der Technik dar.

Wannen mit Folienabdichtung

Unter der Bezeichnung „Wannen mit Folienabdichtung“ werden in der Baubranche heutzutage Abdichtungen erdberührter Stahlbetonkonstruktionen im Druckwasserbereich mit aufgetragenen Frischbetonverbundabdichtungen zusammengefasst. Diese Abdichtungssysteme können in der Praxis auch als Abdichtungsverbundsysteme, Frischbeton-Verbund-Abdichtungsbahnen sowie als Frischbeton-Verbundfolien bezeichnet werden.

Wasserseitig wird, vor dem Betonieren, hierbei vollflächig die Abdichtung aufgebracht, die sich anschließend mit dem eingebrachten Frischbeton verbindet. Der Verbund zwischen Abdichtung und Frischbeton wird dabei im Wesentlichen durch folgende zwei Mechanismen gewährleistet: [Vgl. LOHMEYER und EBELING (2018); S. 50 f.]

- Verbund des Frischbetons durch Verkrallung auf dem Beton bei Faservlies mit Trägerbahn, z. B. Kunststoff, PVC-Membran
- Verbund des Frischbetons durch Adhäsion über druckempfindliche Klebeschichten mit Trägerbahn aus HDPE-Kunststoff

Frischbeton-Verbundabdichtungen sind nichtgeregelte Bauprodukte. Ihre Einsatzmöglichkeiten werden durch allgemein bauaufsichtliche Prüfzeugnisse für die jeweiligen Systeme der verschiedensten Hersteller geregelt. [Vgl. LOHMEYER und EBELING (2018); S. 51]

² öbv-Richtlinie „Bentonitgeschützte Betonbauwerke – Braune Wannern“ (Ausgabe Juli 2019)

1.2 Weiße Wannen

Im Unterschied zu Bitumenabdichtungen werden Abdichtungen mit wasserundurchlässigen Betonbauteilen als „Weiße Wannen“ bezeichnet. Nebst der tragenden Funktion übernimmt die Konstruktion hierbei auch die abdichtende Aufgabe. Früher kamen für die Herstellung von Beton mit hohem Wassereindringwiderstand oftmals Hochofenzemente zur Anwendung, die im trockenen Zustand eine sehr helle, annähernd weiße Färbung aufwiesen. Aus diesem Kontext heraus leitet sich auch die Namensgebung der „Weißen Wannen“ ab. [Vgl. LOHMEYER und EBELING (2018); S. 50]

Die Österreichische Bautechnik Vereinigung, nachfolgend als *öbv* abgekürzt, gab zu diesem Themenbereich erstmals im Jahre 1999 eine Richtlinie heraus, die den damaligen Stand der Technik widerspiegelte. Nach Überarbeitungen in den Jahren 2002 und 2009 wurde die *öbv*-Richtlinie „Wasserundurchlässige Betonbauwerke – Weiße Wannen“³, nachfolgend als *öbv-RL „Weiße Wannen“* abgekürzt, in ihrer vierten Auflage im Februar 2018 neu aufgelegt und stellt somit den aktuellen Stand der Technik dar. [Vgl. *öbv-RL „Weiße Wannen“* (2018); Vorwort]

Die *öbv* ist ein gemeinnütziger Verein mit Sitz in Wien. Sie bezeichnet sich selbst als Österreichs größte, unabhängige Plattform im Bauwesen für Bauherrn, Planer, Bau- und Baustoffindustrie, die für das Gelingen des Bauens und Betreibens von privaten und öffentlichen Bauwerken verantwortlich zeichnen. Ihre Mitglieder sind neben der maßgebenden Bauherrschaft Österreichs, die österreichische Bauindustrie, Produkthersteller, Ingenieurbüros sowie Fachhochschulen und Universitäten. Oberstes Ziel der *öbv* ist, den aktuellen Stand der Technik durch Veröffentlichung von praxisnahen Richtlinien und Merkblättern sowie durch Abhalten von Kongressen und Seminaren einer breiten Öffentlichkeit zur Verfügung zu stellen. [Vgl. ÖSTERREICHISCHE BAUTECHNIK VEREINIGUNG (2021); online]

In der *öbv-RL „Weiße Wannen“* findet sich zur Definition der weißen Wannen folgender Sachverhalt:

„Als wasserundurchlässige Betonbauwerke ‚Weiße Wannen‘ im Sinne dieser Richtlinie werden solche Bauwerke bezeichnet, bei denen die Stahlbetonkonstruktion neben der tragenden Funktion auch die Abdichtungsfunktion übernimmt. Typische Anwendungsbereiche sind Verkehrsbauwerke (Wannen, Galerien und Tunnel in offener Bauweise und Deckelbauweise), Behälter und unterirdische Bauwerke (Kellergeschoße, Tiefgaragen etc.) des Hoch- und Industriebaus.“ [öbv-RL „Weiße Wannen“ (2018); S. 2]

³ *öbv*-Richtlinie „Wasserundurchlässige Betonbauwerke – Weiße Wannen“ (Ausgabe Februar 2018)

Und weiters:

„Zur erfolgreichen Umsetzung einer ‚weißen Wanne‘ sind die Regeln für Konstruktion und Bemessung, Betontechnologie und Ausführung dieser Richtlinie als Gesamtkonzept einzuhalten, Teilanwendungen entsprechen nicht einer ‚Weißen Wanne‘.“ [öbv-RL „Weiße Wannen“ (2018); S. 2]

Zur zielsicheren und wirtschaftlichen Erstellung von wasserundurchlässigen Bauwerken werden in der Richtlinie folgende Prinzipien verfolgt: [Vgl. öbv-RL „Weiße Wannen“ (2018); S. 2]

- **Dichtigkeit des Betongefüges:** Durch Verwendung der Betonstandards BS 1 oder BS 1 PLUS wird die Dichtigkeit des Betongefüges bestmöglich sichergestellt.
- **Rissevermeidung:** Es wird versucht, Rissbildung nach Möglichkeit zu vermeiden.
- **Risseverteilung:** Ist mit Rissbildung zu rechnen, wird eine geeignete Bewehrung zur Verteilung von Rissen angeordnet. Dadurch bleiben Einzelrissbreiten klein, sodass die Anforderungen an die Wasserundurchlässigkeit erfüllt werden.
- **Rissesanierung:** In all jenen Fällen, in denen trotzdem wasserführende Risse auftreten, werden diese durch Sanierungsmaßnahmen nachträglich wieder geschlossen.

Als bedeutende Veränderungen zur 3. Auflage aus dem Jahre 2009 können in der *öbv-RL „Weiße Wannen“* vom Februar 2018 unter anderem folgende Punkte genannt werden: [Vgl. *öbv-RL „Weiße Wannen“* (2018); Vorwort]

- Mit dem Ziel der Rissevermeidung im Gebrauchstauglichkeitsnachweis bei überwiegender Zwangsbeanspruchung wird ein neues Bemessungsmodell mit der Bezeichnung „Weiße Wanne optimiert“ implementiert. Ergänzend zur vorliegenden *öbv-RL „Weiße Wannen“* wird zeitgleich das öbv-Merkblatt „Analytisches Bemessungsverfahren für die Weiße Wanne optimiert“⁴ veröffentlicht, dass eine vereinfachte Handhabung des neuen Bemessungsmodells gewährleisten soll. Das bisher zur Anwendung gekommene Bemessungsmodell wird zukünftig als „Weiße Wanne klassisch“ bezeichnet.
- Ein neuer Betonstandard mit der Bezeichnung „BS 1 PLUS“ wird definiert. Die Anwendung dieses Betonstandards wird beim Bemessungsmodell „Weiße Wanne optimiert“ vorgeschrieben. Findet dieser beim Modell „Weiße Wanne klassisch“, neben dem bisherigen Standard „BS 1“, Anwendung, so kann die maximale Frischbetontemperatur auf 25 °C angehoben werden.
- Für die Anwendung des Bemessungsmodells „Weiße Wanne optimiert“ sind zusätzliche, experimentelle Untersuchungen des Betons, deren Ergebnisse in die Bemessung

⁴ öbv-Merkblatt „Analytisches Bemessungsverfahren für die Weiße Wanne optimiert (Ausgabe Februar 2018)

einfließen, erforderlich. Die gesicherte Umsetzung in Planungsphase und Bauausführung ist dabei durch einen „Experten für Betontechnik“ nach öbv-Richtlinie „Qualitätssicherung für Beton von Ingenieurbauwerken“⁵ sicherzustellen.

In weiterer Folge wird das öbv-Merkblatt „Analytisches Bemessungsverfahren für die Weiße Wanne optimiert“ als *öbv-MB „Weiße Wanne optimiert“* abgekürzt.

1.2.1 Entwurfsgrundlagen und Klassifizierung

Um die Gebrauchstauglichkeitseigenschaften der hinreichenden Dichtigkeit zu erbringen, sind die im vorangegangenen Unterabschnitt aufgelisteten Prinzipien maßgebend. Die dabei konkret zu erfüllenden Forderungen sind abhängig von einer Fülle von Einflussfaktoren, zu denen vor allem gehören: [Vgl. LÖBER und HOLSCHMACHER (2019); S. 193 f.]

- die Art der Bauwerksnutzung (Anforderungsklasse),
- die Höhe des Wasserdrucks (Bemessungswasserstand),
- das grundlegende Entwurfsziel (Rissevermeidung oder Rissebegrenzung)
- raumklimatische und bauphysikalische Anforderungen

Hingegen beeinflusst die Wasserbeanspruchung im Sinne der ÖNORM B 3692 (Bodenfeuchte, nichtdrückendes oder drückendes Wasser) die Bauweise einer „Weißen Wanne“ nur geringfügig. [Vgl. KLOPFER und SOMMER (2010); S. 116]

Die geplante Art der Bauwerksnutzung und der Bemessungswasserstand müssen in einem ersten Schritt vom Auftraggeber in Zusammenarbeit mit dem Planer festgelegt und in der Bauausschreibung und dem Bauvertrag festgehalten werden. [Vgl. *öbv-RL „Weiße Wannen“* (2018); S. 5]

Als Bemessungswasserstand wird hierbei der höchste zu erwartende Wasserstand, der sich innerhalb der planmäßigen Nutzungsdauer aus Grundwasser, Schichtenwasser oder Hochwasser ergibt, definiert. Dabei sind langjährige Beobachtungen und etwaige zu erwartende zukünftige Gegebenheiten zu berücksichtigen. [Vgl. LOHMEYER und EBELING (2018); S. 46]

Er entspricht in der Regel dem charakteristischen, seltenen Wasserstand gemäß RVS 09.01.41⁶ und ist aufgrund von Pegelmessungen oder vergleichbaren Informationen festzulegen. [Vgl. *öbv-RL „Weiße Wannen“* (2018); S. 4]

Die *öbv-RL „Weiße Wannen“* definiert in Abhängigkeit der geplanten Nutzung insgesamt fünf Anforderungsklassen gemäß Tabelle 1.1 ohne Unterscheidung der Bauteilart. In dieser Tabelle werden die Anforderungsklassen A_5 sowie A_1 bis A_4 nach dem zulässigen Wasserdurchtritt von „vollständig trocken“ bis „nass“ unter Anführung von Beispielen zur einfacheren Einordnung unterteilt. Dabei ist zu beachten, dass die angeführten Anforderungsklassen A_3 und A_4 , bei

⁵ öbv-Richtlinie „Qualitätssicherung für Beton von Ingenieurbauwerken (Ausgabe November 2016)

⁶ RVS 09.01.41: Tunnel/Tunnelbau/Konstruktive Ausführung/Offene Bauweise (Ausgabe April 2013)

denen zusätzliche Entwässerungsmaßnahmen vorgesehen werden müssen, nicht Gegenstand der vorliegenden Richtlinie sind, sondern über die öbv-Richtlinie „Dichte Schlitzwände“⁷ geregelt werden. Weiters sollte die Anforderungsklasse A₅ nur in Ausnahmefällen zur Anwendung kommen. [Vgl. öbv-RL „Weiße Wannen“ (2018); S. 5]

Tabelle 1.1 – Anforderungsklassen für die Wasserundurchlässigkeit von Außenwänden, Bodenplatten und Decken [Vgl. öbv-RL „Weiße Wannen“ (2018); S. 6 – Tabelle 3.1]

Anforderungsklasse	A ₅ (Sonderklasse)	A ₁	A ₂	A ₃	A ₄
Kurzbezeichnung	vollständig trocken	weitgehend trocken	leicht feucht	feucht	nass
Beschreibung der Betonoberfläche	keine visuell feststellbaren Feuchtstellen (Dunkelfärbung) erkennbar	visuell einzelne feststellbare Feuchtigkeitsstellen (max. matte Dunkelfärbung)	visuell und manuell feststellbare, einzelne glänzende Feuchtigkeitsstellen an der Oberfläche	tropfenweiser Wasseraustritt mit Bildung von Wasserschlieren	einzelne rinnende Wasseraustrittsstellen für Bodenplatten, Wände und Schlitzwände
Beurteilung der Feuchtigkeitsstellen		Nach Berühren mit der trockenen Hand (flächenhaft) sind an der Hand keine Wasserspuren zu erkennen.	Keine Mengenmessung von ablaufendem Wasser möglich. Nach Berühren mit der Hand sind daran Wasserspuren erkennbar.	Das ablaufende Wasser kann in Auffanggefäßen mengenmäßig gemessen werden.	Das ablaufende Wasser kann in Auffanggefäßen mengenmäßig gemessen werden.
zulässige Fehlstellen (Feuchtigkeitsstellen, Risse, usw.) an der Betonoberfläche		1 ‰ der Betonoberfläche als Feuchtigkeitsstellen zulässig. Wasserfahnen, die nach maximal 20 cm abtrocknen.	1 ‰ der Betonoberfläche als Feuchtigkeitsstellen zulässig. einzelne Wasserfahnen, die an der Betonoberfläche des jeweiligen Bauteils abtrocknen.	max. Wassermenge pro Fehlstelle bzw. lfm Schlitzwandarbeitsfuge < 0,2 l/h; Wasserdurchtritt pro m ² Wand im Mittel < 0,01 l/h	max. Wassermenge pro Fehlstelle < 2 l/h; Wasserdurchtritt pro m ² Wand im Mittel < 1 l/h
Zusatzmaßnahmen	Bauphysikalische Untersuchung und Konditionierung/Klimatisierung des Raumes unbedingt erforderlich.	Bauphysikalische Untersuchung erforderlich, der zufolge eine Konditionierung/Klimatisierung erforderlich sein kann.	In Sonderfällen kann eine Konditionierung/Klimatisierung notwendig sein.	Entwässerungsmaßnahmen vorgesehen.	Entwässerungsmaßnahmen vorgesehen.
Anwendungsbeispiel	Lager für besonders feuchtigkeitsempfindliche Güter	Verkehrsbauwerke mit hohen Anforderungen. Aufenthaltsräume, Lager, Hauskeller, Haustechnikräume mit besonderen Anforderungen	Garagen, Haustechnikräume (z.B. Heizräume, Kollektoren), Verkehrsbauwerke	Garagen (mit Zusatzmaßnahmen, z.B. Entwässerungsrinnen) etc.	Außenschale der zweischaligen Bauweise
Bauweise	„Weiße Wanne“ im Sinne dieser Richtlinie				
		Dichte Schlitzwände gemäß öbv-Richtlinie			

⁷ öbv-Richtlinie „Dichte Schlitzwände“ (Ausgabe November 2013)

Durch die Kombination von vereinbarter Anforderungsklasse und festgelegtem Bemessungswasserstand kann in Folge eine Konstruktionsklasse nach Abbildung 1.2 festgelegt werden. Sie definiert dabei die einzuhaltenden, grundlegenden Rahmenbedingungen betreffend beton-technologischer und konstruktiver Ausbildung eines Bauwerks als weiße Wanne. [Vgl. öbv-RL „Weiße Wannen“ (2018); S. 5 f.]

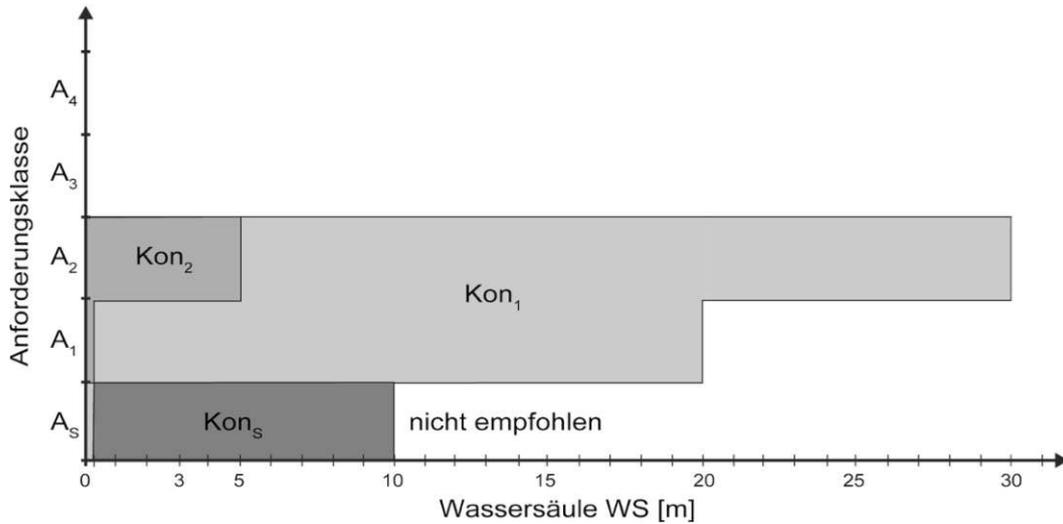


Abbildung 1.2 – Zusammenhang zwischen Anforderungsklasse, Wassersäule WS [m] (Bemessungswasserstand) und Konstruktionsklasse; Darstellung nach [öbv-RL „Weiße Wannen“ (2018); S. 7 – Abbildung 3-1]

Die Mindestbauteilabmessung wird nach Tabelle 1.2 in Abhängigkeit der Wasserdruckhöhe und Konstruktionsklasse bestimmt. Die Abmessungen variieren dabei zwischen 0,25 bis 0,60 m jedoch ohne Berücksichtigung von statischen, herstellungstechnischen oder konstruktiven Erfordernissen. [Vgl. öbv-RL „Weiße Wannen“ (2018); S. 8]

Tabelle 1.2 – Mindestbauteilabmessung in Abhängigkeit von Wasserdruck und Konstruktionsklasse [Vgl. öbv-RL „Weiße Wannen“ (2018); S. 8 – Tabelle 3-2]

Wasserdruckhöhe	Konstruktionsklasse		
	Kon _S	Kon ₁	Kon ₂
0 – 0,25 m	≥ 0,25 m	≥ 0,25 m	≥ 0,25 m
0,25 – 3 m	≥ 0,45 m	≥ 0,25 m	≥ 0,25 m
3 – 5 m	≥ 0,50 m	≥ 0,30 m	≥ 0,30 m
5 – 10 m	≥ 0,60 m	≥ 0,35 m	-
10 – 30 m	-	≥ 0,60 m	-

Aus dem verwendeten Bemessungsmodell resultieren, je nach Konstruktionsklasse und verwendetem Betonstandard, die maximal zulässigen Frischbetontemperaturen nach Tabelle 1.3. Der Betonstandard „BS 1 PLUS“ kann hier unabhängig vom Bemessungsmodell zum Einsatz kommen. Wird er in Kombination mit dem Bemessungsmodell „Weiße Wanne klassisch“ eingesetzt, können die Frischbetontemperaturen auf 25 °C bzw. 27 °C erhöht werden. [Vgl. *öbv-RL „Weiße Wannen“* (2018); S. 8]

Tabelle 1.3 – maximal zulässige Frischbetontemperatur in Abhängigkeit von Bemessungsmodell und Konstruktionsklasse [Vgl. *öbv-RL „Weiße Wannen“* (2018); S. 8 – Tabelle 3-2]

Bemessungsmodell	Konstruktionsklasse					
	Kon _s		Kon ₁		Kon ₂	
	BS1	BS1 PLUS	BS1	BS1 PLUS	BS1	BS1 PLUS
Weiße Wanne klassisch	22 °C	25 °C	22 °C	25 °C	27 °C	27 °C
Weiße Wanne optimiert	-	22 °C	-	22 °C	-	22 °C

Zusätzlich zur Frischbetontemperatur sind in der *öbv-RL „Weiße Wannen“* die maximal zulässigen Bauteiltemperaturen angegeben. Diese dürfen für die Konstruktionsklassen Kon_s und Kon₁ im Allgemeinen 45 °C sowie 55 °C in der Konstruktionsklasse Kon₂ nicht überschreiten. Ausnahmen bestehen für Bodenplatten mit darunterliegender Gleitschicht. Die Bauteiltemperaturen dürfen dann bei der Konstruktionsklasse Kon_s und Kon₁ auf maximal 50 °C und bei der Konstruktionsklasse Kon₂ auf maximal 55 °C ansteigen. Weitere konstruktive Erfordernisse in Abhängigkeit der Konstruktionsklasse können der *öbv-RL „Weiße Wannen“*, Tabelle 3-2 entnommen werden. Hier werden beispielsweise für Wände bei Anwendung des Bemessungsmodells „Weiße Wanne optimiert“, ohne Unterscheidung der Konstruktionsklasse, Betonierabschnitte ≤ 15 m empfohlen. [Vgl. *öbv-RL „Weiße Wannen“* (2018); S. 8]

1.2.2 Bauweise

Die Wahl der Bauweise muss unter Beachtung des gegebenen Bauplatzes sowie der Untergrund- und Grundwasserverhältnisse in Kombination mit der resultierenden Konstruktionsklasse erfolgen. Grundlegend können aus technischer Sicht nachfolgende Bauweisen, wobei auch Mischformen und Neuentwicklungen nicht ausgeschlossen werden sollen, angeführt werden: [Vgl. *öbv-RL „Weiße Wannen“* (2018); S. 9 f.]

- **hinterfülltes Bauwerk:** Hierbei wird das Bauwerk in einer davon autonom gesicherten Baugrube, mit eventueller Grundwasserabsenkung hergestellt und nachträglich überschüttet bzw. hinterfüllt. Die Baugrubensicherung kann in Abhängigkeit des vorhandenen Platzangebotes als Böschung oder temporärer Baugrubenverbau ausgeführt werden.
- **Bauwerke mit integrierten Baugrubenwänden:** Die zur Anwendung kommende Baugrubensicherung, ausgeführt als Schlitzwände oder Bohrpfahlwände, werden als

Bestandteil des Bauwerks ausgebildet. Dabei wird zwischen einschaliger und zweischaliger Bauweise sowie konventioneller, offener Bauweise und Deckelbauweise unterschieden. Den Anschlusspunkten von Bodenplatte und Abschlussdecke zu den integrierten Baugrubenwänden ist bei dieser Bauweise besondere Aufmerksamkeit zu widmen.

1.2.3 Allgemeine Bemessungsphilosophie

Werden Betonbauwerke ohne zusätzliche Abdichtungsmaßnahmen errichtet, so ist deren Wasserundurchlässigkeit maßgebend von der Wasserundurchlässigkeit des Betons, dessen Rissfreiheit oder Art und Breite eventuell auftretender Risse abhängig. Das Rissverhalten kann dabei durch Anordnung einer geeigneten Bewehrung positiv beeinflusst werden.

Den Umständen geschuldet, dass sich rissauslösende Zwangsspannungen mathematisch nur hinreichend genau bestimmen lassen sowie die Betonzugfestigkeit erheblichen Streuungen unterworfen ist, kann nach *öbv-RL „Weiße Wannen“* zum heutigen Stand der Technik eine vollständige Rissfreiheit von Stahlbetonbauwerken planmäßig nicht garantiert werden. [Vgl. *öbv-RL „Weiße Wannen“* (2018); S. 11]

Grundsätzlich sind die Grenzzustände für Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit nach der aktuellen Normenlage zu bestimmen und zu bemessen. Im Wesentlichen werden folgende Nachweise in der *öbv-RL „Weiße Wannen“* gefordert: [Vgl. *öbv-RL „Weiße Wannen“* (2018); S. 11]

- Nachweis der Tragfähigkeit
- Nachweis der Gebrauchstauglichkeit durch Begrenzung der Rissbreite „bei überwiegender Zwangsbeanspruchung“
- Nachweis der Gebrauchstauglichkeit durch Begrenzung der Rissbreite „bei überwiegender Lastbeanspruchung“

Einwirkungen auf das Tragwerk setzen sich in diesen Nachweisen aus den äußeren Belastungen und den hervorgerufenen Zwangsspannungen zusammen.

Äußere Belastungen

Gemäß der einschlägigen ÖNORMEN oder RVS setzen sich die äußeren Belastungen aus Belastungen aus Eigengewicht der Konstruktion, Überschüttungs- und Nutzlasten, Erddruck sowie Wasserdruck zusammen. Dabei ist für den maßgebenden Erddruck der aktive Erddruck und der Erdruchdruck zu ermitteln. Für aus Verkehrslasten resultierende Erddrücke ist sowohl einseitig als auch beidseitig der Erdruchdruck anzusetzen. Wände in direkter Nachbarschaft zu Felswänden oder einer etwaigen Baugrubensicherung können auch durch den Silodruck belastet werden. Für den Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit ist die quasiständige Einwirkungskombination maßgebend. [Vgl. *öbv-RL „Weiße Wannen“* (2018); S. 12]

Zwangsspannungen

Zwangsbeanspruchungen, infolge Temperaturbeanspruchung, Kriechen und Schwinden sowie Setzungen, Hebungen und Verdrehungen, müssen nach *öbv-RL „Weiße Wannen“* Berücksichtigung finden, wenn diese einen maßgebenden Beitrag zu den Schnittgrößen liefern. [Vgl. *öbv-RL „Weiße Wannen“* (2018); S. 12]

Durch aufgezwungene Verformungen werden Zwangsspannungen im Bauteil hervorgerufen. Als Beispiele dafür können die Setzung einer Mittelstütze eines Zweifeldbalkens (Abbildung 1.3) oder die Behinderung von Eigenverformungen (Abbildung 1.4) herangezogen werden. Die Ursachen für Eigenverformungen können Temperaturänderungen etwa infolge Abfließen der Hydratationswärme, autogenes Schwinden und Trocknungsschwinden sowie durch Wasseraufnahme oder chemische Ursachen entstehendes Quellen sein. Werden diese Eigenverformungen behindert, entstehen dadurch Zwangsspannungen im Bauteil. [Vgl. SPRINGENSCHMID (2018); S. 114 f.]

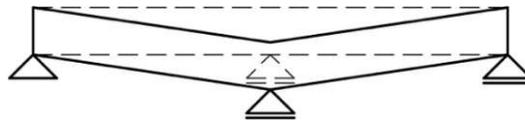


Abbildung 1.3 – Zwangsspannungen (Äußerer Zwang – Setzungen); Darstellung nach [SPRINGENSCHMID (2018); S. 115 – Abb. 3.5-1]

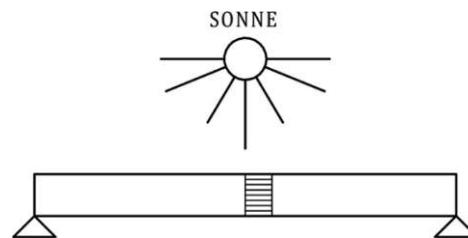


Abbildung 1.4 – Zwangsspannungen (Temperaturänderung oder Schwinden); Darstellung nach [SPRINGENSCHMID (2018); S. 115 – Abb. 3.5-1]

Die Größe der Zwangsspannungen kann ausschließlich über den behinderten Anteil der Verformungseinwirkung und die Steifigkeit des Betons abgebildet werden. Dabei ist eine zeitdiskrete Betrachtung von Nöten, da einerseits die Verformungseinwirkungen sowie andererseits die thermischen und mechanischen Eigenschaften des Betons im Erhärtungszeitraum einer ständigen Veränderung und einer gegenseitigen Beeinflussung untereinander unterliegen.

Allgemein werden in SCHLICKE (2014) die Zwangsspannungen nach Gleichung (1.1) beschrieben. [Vgl. SCHLICKE (2014); S. 1]

$$\sigma_{beh}(t) = \int_0^t \varepsilon_0(t) \cdot a(t) \cdot E_c(t) dt \quad (1.1)$$

mit

$\sigma_{beh}(t)$	Zwangsspannung
$\varepsilon_0(t)$	Verformungseinwirkung
$a(t)$	Behinderungsgrad
$E_c(t)$	Elastizitätsmodul des Betons

In der Regel unterliegen Bauteile aus Beton zwei Situationen, in denen Zwangsbeanspruchungen maßgebend werden können. Erhebliche Verformungseinwirkungen können einerseits im Erhärtungszeitraum des Betons durch die entstehende Hydratationswärme sowie durch Schwindverformungen hervorgerufen werden. Die daraus hervorgerufenen Zwangsspannungen sind stark abhängig von der Massigkeit und der zu diesem Zeitpunkt noch in Entwicklung befindlichen Steifigkeitseigenschaften des betroffenen Betonbauteils. Aus diesem Kontext heraus wird auch von „frühem Zwang“ gesprochen. Andererseits ist von „spätem Zwang“ die Rede, wenn etwa im Nutzungszeitraum durch veränderliche klimatische Randbedingungen bei großflächigen Geometrien nennenswerte Zwangsbeanspruchungen hervorgerufen werden. [Vgl. SCHLICKE (2014); S. 1 f.]

1.3 Gebrauchstauglichkeitsnachweis nach *öbv-RL „Weiße Wannan“*

Wie bereits in den vorangegangenen Unterabschnitten erwähnt, ist der Gebrauchstauglichkeitsnachweis grundsätzlich auch für wasserundurchlässige Betonbauwerke nach ÖNORM EN 1992-1-1:2015⁸ und ÖNORM B 1992-1-1:2018⁹ zu führen. Zusätzlich werden jedoch in der *öbv-RL „Weiße Wannan“* darüber hinaus gehende Anforderungen definiert.

Allenfalls auftretende Risse im Beton werden durch eine Bewehrungsanordnung dahingehend beeinflusst, dass diese möglichst fein im Betonquerschnitt verteilt werden. Diese Forderung ist durch ein quadratisches Bewehrungsnetz mit einem maximalen Stababstand von 15 cm abzusichern. Die Einzelrissbreite wird hier mit Hilfe einer geeigneten Wahl des Bewehrungsgehaltes, dem gewählten Stabdurchmesser sowie dem Stababstand gesteuert.

⁸ ÖNORM EN 1992-1-1:2015 02 15: Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken – Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau (konsolidierte Fassung)

⁹ ÖNORM B 1992-1-1:2018 01 01: 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

In Abhängigkeit der ermittelten Konstruktionsklasse können die zulässigen Rissbreiten nach *öbv-RL „Weiße Wannan“* für den Gebrauchstauglichkeitsnachweis, unabhängig von der Beanspruchungsart, in Tabelle 1.4 als 95 %-Fraktile angegeben werden. [Vgl. *öbv-RL „Weiße Wannan“* (2018); S. 13]

Tabelle 1.4 – Rissbreite w_k in Abhängigkeit der Konstruktionsklasse bei Last- und/oder Zwangsbeanspruchung [Vgl. *öbv-RL „Weiße Wannan“* (2018); S. 13]

Konstruktionsklasse	Rissbreite w_k [mm]
Kons	0,15
Kon ₁	0,20
Kon ₂	0,25

Nach *öbv-RL „Weiße Wannan“* werden für den Gebrauchstauglichkeitsnachweis der Nachweis bei überwiegender Zwangsbeanspruchung sowie der Nachweis bei überwiegender Lastbeanspruchung unterschieden. Die in der Richtlinie beschriebenen Bemessungsmodelle beziehen sich mit ihren Ausführungen allesamt auf die Nachweise bei überwiegender Zwangsbeanspruchung. Sollte die Risschnittgröße jedoch durch die Lastschnittgrößen überschritten werden, so ist der Gebrauchstauglichkeitsnachweis zur Begrenzung der Rissbreite nach ÖNORM EN 1992-1-1:2015 und ÖNORM B 1992-1-1:2018 unter der maßgebenden Kombination aus Normalkraft und Biegung zu führen. [Vgl. *öbv-RL „Weiße Wannan“* (2018); S. 13]

1.3.1 Gebrauchstauglichkeitsnachweis bei überwiegender Lastbeanspruchung

Hierbei ist die zulässige Rissbreite nach Tabelle 1.4, in Abhängigkeit der Konstruktionsklasse, auf der Wasser beaufschlagten Seite einzuhalten. Für die Rissbreitenbegrenzung auf der Luftseite kann eine Rissbreite $w_k = 0,30$ mm für Biegerisse angenommen werden.

Sofern die Dehnungen aus Zwang alleine unter der Grenze von 0,8 ‰ liegen, müssen beim Gebrauchstauglichkeitsnachweis unter Lastbeanspruchung keine Schnittgrößen aus der Zwangsbeanspruchung berücksichtigt werden. [Vgl. *öbv-RL „Weiße Wannan“* (2018); S. 18]

Verformungseinwirkungen dieser Größenordnung, die einer äquivalenten Temperatureinwirkung von circa 80 °C entsprechen, sind bei gewöhnlichen Betonbauteilen weder im Erhärtungszeitraum noch in der Nutzungsphase zu erwarten. [Vgl. SCHLICKE (2014); S. 3]

Sind bei Bauwerken Last- sowie Zwangsbeanspruchungen gleichzeitig zu berücksichtigen, werden beide Gebrauchstauglichkeitsnachweise getrennt voneinander geführt und die daraus resultierende maßgebende Bewehrung angeordnet. In allen anderen Fällen wird der Nachweis bei überwiegender Zwangsbeanspruchung nach *öbv-RL „Weiße Wannan“* geführt. Der Gebrauchstauglichkeitsnachweis für überwiegende Lastbeanspruchung kann in diesen Fällen dann entfallen. [Vgl. *öbv-RL „Weiße Wannan“* (2018); S. 18]

1.3.2 Gebrauchstauglichkeitsnachweis bei überwiegender Zwangsbeanspruchung

Die Neuauflage der *öbv-RL „Weiße Wannen“* sieht, im Unterschied zu den Vorgängerversionen, für den Gebrauchstauglichkeitsnachweis bei überwiegender Zwangsbeanspruchung erstmals neben den klassischen Bemessungsdiagrammen noch weitere zwei Verfahren zum Nachweis der Rissbreitenbegrenzung vor. [Vgl. *öbv-RL „Weiße Wannen“* (2018); S. 13]

In diesem Unterabschnitt werden die allgemeinen Inhalte dieser Verfahren kurz beschrieben. Eine überblicksmäßige Einteilung wird in Tabelle 1.5 durchgeführt. Die zugehörige ausführliche Betrachtung der einzelnen Bemessungsmodelle folgt in Kapitel 4 – Bemessungsmodelle.

Tabelle 1.5 – Übersicht über die Verfahren zum Nachweis der Gebrauchstauglichkeit bei überwiegender Zwangsbeanspruchung [Vgl. *öbv-RL „Weiße Wannen“* (2018); S. 13 – Tabelle 4-1]

Entwurfsgrundsatz	Rissbreitenbegrenzung	Rissevermeidung	
Bemessungsmodelle	Weißer Wanne klassisch	Weißer Wanne optimiert	
Nachweis Früher Zwang	Bewehrungsdiagramme	analytisch	allgemein/ numerisch
Nachweis Später Zwang	in Sonderfällen gemäß ÖNORM EN 1992-1-1:2015 und ÖNORM B 1992-1-1:2018 nachzuweisen	bei Bewegungsfugenabständen ≤ 15 m nicht erforderlich	
Betonstandard	BS 1 oder BS 1 PLUS	BS 1 PLUS	

Bemessungsmodell „Weißer Wanne klassisch“

Dieses Bemessungsmodell verfolgt in der *öbv-RL „Weiße Wannen“* den ursprünglichen Entwurfsgrundsatz der Rissebegrenzung auf die in Tabelle 1.4 angeführten Rissbreiten mit dem Ziel einer wirtschaftlichen Bewehrungsermittlung. Bei Anwendung dieses Bemessungsmodells kann jedoch das Auftreten einzelner Risse, deren Rissbreiten die geforderten Werte überschreiten, nicht garantiert ausgeschlossen werden. Nach *öbv-RL „Weiße Wannen“* sind diese nach den angeführten Prinzipien zu injizieren und stellen somit keine Qualitätsminderung des Bauwerks dar.

Der Nachweis der Gebrauchstauglichkeit bei überwiegender Zwangsbeanspruchung für den Fall der abfließenden Hydratationswärme erfolgt hier mit Hilfe der Anordnung einer rissebegrenzenden Bewehrung nach den angegebenen Bemessungsdiagrammen. Für Festigkeitsklassen bis C 25/30 konnte dabei in der Praxis gezeigt werden, dass bei Ausführungen mit der angeführten Mindestbewehrung befriedigende Ergebnisse in der Rissbreitenbegrenzung erzielt werden konnten.

Durch einen Wechsel des statischen Systems oder durch geänderte klimatische Randbedingungen können im späteren Nutzungszeitraum Zwangsspannungen entstehen, die unter dem Begriff des „späten Zwangs“ zusammengefasst werden. Für den Gebrauchstauglichkeitsnachweis für das Bemessungsmodell „Weißer Wanne klassisch“ wird in diesem Sonderfall auf die

Anwendung der Nachweise in ÖNORM EN 1992-1-1:2015 und ÖNORM B 1992-1-1:2018 verwiesen. [Vgl. *öbv-RL „Weiße Wannen“* (2018); S. 13 f.]

Bemessungsmodell „Weiße Wanne optimiert“

Das Bemessungsmodell „Weiße Wanne optimiert“ wurde in der vierten Auflage der *öbv-RL „Weiße Wannen“* neu eingeführt. Dieses verfolgt mit dem Entwurfsgrundsatz der Rissvermeidung vorrangig das Ziel den Gebrauchstauglichkeitsnachweis bei überwiegender Zwangsbeanspruchung auch ohne aktive Rissbreitenbegrenzung durch Bewehrung zu erbringen. Die zu führenden Nachweise beruhen hier auf einem rechnerischen Ausschluss von (Trenn-)Rissbildung infolge Zwang aus abfließender Hydratationswärme. Voraussetzung für die erfolgreiche Anwendung dieses Bemessungsmodells ist die Verwendung des Betonstandards „BS 1 PLUS“ nach *öbv-RL „Weiße Wannen“*.

Im Allgemeinen kann die Nachweisführung für das vorliegende Bemessungsmodell auf Basis einer thermomechanischen Simulation erfolgen. Da diese numerischen Simulationen jedoch sehr zeitaufwendig sind und auch umfangreiche Vorkenntnisse in der Modellbildung voraussetzen, wurde zeitgleich mit Veröffentlichung der *öbv-RL „Weiße Wannen“* auch eine analytische Berechnung für einfache statische Systeme zur Verfügung gestellt und im *öbv-MB „Weiße Wanne optimiert“* beschrieben.

Die Gegenüberstellung von Zugfestigkeitsentwicklung im Beton und ermittelter Zwangsbeanspruchungen ist in beiden Verfahren Grundlage für den rechnerischen Ausschluss von Rissbildung im Betonbauteil. Unter Einhaltung einer angemessenen Sicherheit, in Abhängigkeit vom gewählten Verfahren, kann dadurch nach *öbv-RL „Weiße Wannen“* die Rissbildung infolge frühen Zwangs aus abfließender Hydratationswärme ausgeschlossen werden. Bei Anwendung des Bemessungsmodells „Weiße Wanne optimiert“ werden im Speziellen für Wände Betonierabschnitte kleiner 15 m empfohlen. Wird diese Forderung eingehalten, so kann der Gebrauchstauglichkeitsnachweis für den späten Zwang als erfüllt angesehen werden. [Vgl. *öbv-RL „Weiße Wannen“* (2018); S. 17]

2 Grundlagen

2.1 Beton

Beton ist ein Baustoff, der vereinfacht aus Zement, Gesteinskörnung und Wasser hergestellt wird. Durch die Zugabe von Zusatzmitteln (z.B. Luftporenbildner, Verflüssiger etc.) und Zusatzstoffen (z.B. Flugasche, Fasern, Pigmenten, etc.) können bestimmte Eigenschaften des Betons zusätzlich beeinflusst werden. Als Zementleim wird das Gemisch von Wasser und Zement bezeichnet, das nach dem Mischen den Zusammenhalt und die Verarbeitbarkeit des Frischbetons gewährleistet sowie beim Erhärten den Zementstein bildet. In Hinblick auf den Erhärtungszustand kann der Beton in Frischbeton, jungen Beton und Festbeton unterteilt werden. [Vgl. BAAR und EBELING (2017); S. 25]

2.1.1 Frischbeton

Als Frischbeton wird Beton bezeichnet, solange dieser noch verarbeitbar ist. Eine gute Verarbeitbarkeit ist Voraussetzung für die Entstehung eines Festbetons, der den gestellten Anforderungen an ihn genügt. Die Konsistenz des Frischbetons ist dazu eine wesentliche Kenngröße. [Vgl. BAAR und EBELING (2017); S. 25]

2.1.2 Junger Beton

Nach Erstarrungsbeginn, der wenige Stunden nach dem Mischen des Betons einsetzt, ist der Beton nicht mehr verarbeitbar und wird als junger Beton bezeichnet. Einflussfaktoren für den Erstarrungsbeginn sind unter anderem Zementart, Wassermenge, Zusatzmittel oder Zusatzstoffe sowie Temperatureinwirkungen.

Die Phase des Erstarrens beträgt mehrere Stunden und geht fließend in die Erhärtung des Betons über. Ist die Erhärtung soweit fortgeschritten, dass die mechanischen Eigenschaften des Betons technisch nutzbar sind, wird dieser als Festbeton bezeichnet. Kennzeichnend für die Phase des jungen Betons ist das Einsetzen der Hydratation. Mit einer damit einhergehenden Wärmeentwicklung und zusätzlich stattfindender Volumenänderungen können die später erforderlichen mechanischen Eigenschaften als auch die Dauerhaftigkeit des Betons beeinträchtigt werden. Die Rissgefahr ist bei jungem Beton relativ groß. [Vgl. BAAR und EBELING (2017); S. 27]

2.1.3 Festbeton

Nach Abschluss der Erhärtungsprozesse im Beton kann dieser als erhärteter Beton oder als Festbeton bezeichnet werden. Dieser besteht aus dem Zementstein und der Gesteinskörnung. Die Mikrostruktur des Betons wird durch den Verbund zwischen Zementstein und Gesteinskör-

nung sowie durch die Porosität des Zementsteins bestimmt. Je niedriger der Wasserzementwert ist, desto niedriger ist die Gesamtporosität des Betons. [Vgl. BAAR und EBELING (2017); S. 30]

2.2 Zement

Zement ist ein hydraulisches Bindemittel und wird aus fein gemahlenden, nichtmetallischen, anorganischen Ausgangsstoffen hergestellt. Durch die Beigabe von Wasser entsteht aus diesem der Zementleim, der durch Hydratationsreaktionen schlussendlich zu Zementstein erstarrt und erhärtet. Nach Erhärtung ist der Zementstein auch unter Wasser raumbeständig und fest. Zusammensetzung, Anforderungen und Konformitätskriterien von Normalzementen werden in der ÖNORM EN 197-1¹⁰ geregelt und als CEM-Zemente bezeichnet. Hauptbestandteile von Zement nach ÖNORM EN 197-1 (Kurzbezeichnung in Klammer) sind: [Vgl. ÖNORM EN 197-1 (2011); S. 10 f.]

- Portlandzementklinker (K)
- Hüttensand (granulierte Hochofenschlacke) (S)
- Puzzolane (P, Q)
- Flugasche (V, W)
- gebrannter Schiefer (T)
- Kalkstein (L, LL)
- Silicastaub (D)

Zusätzlich kann der Zement noch Nebenbestandteile wie Calciumsulfat zur Regelung des Erstarrungsverhaltens und andere Zusätze zur Verbesserung der Herstellung oder seiner Eigenschaften enthalten. Dabei darf die Gesamtmenge der Zusätze einen Massenanteil von 1,0 % bezogen auf den Zement nicht überschreiten. Die ÖNORM EN 197-1 unterscheidet 27 Produkte der Familie der Normalzemente. Diese können in folgende fünf Hauptzementarten unterteilt werden: [Vgl. ÖNORM EN 197-1 (2011); S. 14 f.]

- CEM I Portlandzement
- CEM II Portlandkompositzement
- CEM III Hochofenzement
- CEM IV Puzzolanzement
- CEM V Kompositzement

Die Normenbezeichnung der Zemente nach ÖNORM EN 197-1 erfolgt nach deren Art und Festigkeitsklasse des Zementes sowie nach der Festigkeitsentwicklung und gegebenenfalls nach zusätzlichen Anforderungen. In Tabelle 2.1 wird diese Klasseneinteilungen ersichtlich gemacht.

¹⁰ ÖNORM EN 197-1:2011 10 15: Zement – Teil 1: Zusammensetzung, Anforderungen und Konformitätskriterien von Normalzement

Die Festigkeitsklasse wird dabei durch die Normfestigkeit des Zements bzw. die Druckfestigkeit im Alter von 28 Tagen nach ÖNORM EN 196-1¹¹ bestimmt. Es werden drei Klassen von Normfestigkeit unterschieden: [Vgl. ÖNORM EN 197-1 (2011); S. 18 f.]

- Klasse 32,5,
- Klasse 42,5 und
- Klasse 52,5

Die Festigkeitsentwicklung wird durch die Anfangsfestigkeit des Zements bzw. der Druckfestigkeit nach zwei sowie sieben Tagen nach ÖNORM EN 196-1 festgelegt. Zu jeder Normfestigkeitsklasse werden drei Klassen an Anfangsfestigkeiten definiert: [Vgl. ÖNORM EN 197-1 (2011); S. 18]

- übliche Anfangsfestigkeit (Kurzzeichen N)
- hohe Anfangsfestigkeit (Kurzzeichen R)
- niedrige Anfangsfestigkeit (Kurzzeichen L)

Tabelle 2.1 – Klasseneinteilung der Normalzemente [Vgl. ÖNORM EN 197-1 (2011); S. 18 – Tabelle 3]

Festigkeits- klasse	Druckfestigkeit			Erstarrungs- beginn	Raumbeständigkeit (Dehnungsmaß)
	MPa				
	Anfangsfestigkeit	Normfestigkeit			
2 Tage	7 Tage	28 Tage		min	mm
32,5 L ^a	-	≥ 12,0	≥ 32,5	≤ 52,5	≤ 10
32,5 N	-	≥ 16,0			
32,5 R	≥ 10,0	-			
42,5 L ^a	-	≥ 16,0	≥ 42,5	≤ 62,5	
42,5 N	≥ 10,0	-			
42,5 R	≥ 20,0	-			
52,5 L ^a	≥ 10,0	-	≥ 52,5	-	
52,5 N	≥ 20,0	-			
52,5 R	≥ 30,0	-			

^a Die Festigkeitsklasse gilt nur für CEM III-Zemente.

2.3 Hydratation

Bei der chemischen Reaktion zwischen Zement und Wasser entsteht aus dem Zementleim der Zementstein. Dabei wird durch den Zement ein gewisser Wasseranteil gebunden. Diese exotherme, chemische Reaktion wird als Hydratation bezeichnet.

¹¹ ÖNORM EN 196-1:2016 10 15: Prüfverfahren für Zement – Teil 1: Bestimmung der Festigkeit

Bei der Hydratation ist der Hauptbestandteil des Zementes, der Zementklinker, von besonderer Bedeutung. Dieser besteht im Wesentlichen aus vier Klinkerphasen, die beim Brennen des Zements entstehen: [Vgl. BAAR und EBELING (2017); S. 27]

– Tricalciumsilicat	$3CaO \cdot SiO_2$	Kurzzeichen C_3S
– Dicalciumsilicat	$2CaO \cdot SiO_2$	Kurzzeichen C_2S
– Tricalciumaluminat	$3CaO \cdot Al_2O_3$	Kurzzeichen C_3A
– Calciumaluminatferrit	$4CaO \cdot Al_2O_3 \cdot Fe_2O_3$	Kurzzeichen C_4AF

Diese vier Klinkerphasen unterscheiden sich in ihren Reaktionsgeschwindigkeiten und leisten verschiedene Beiträge zur Festigkeitsentwicklung des Zementsteins: [Vgl. BAAR und EBELING (2017); S. 27]

- C_3A ; Tricalciumaluminat hydratisiert sehr schnell und muss durch Zugabe von Calciumsulfat $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ (Kurzzeichen CSH_2) gebremst werden.
- C_3S ; Tricalciumsilicat ist für die Entwicklung der Frühfestigkeit entscheidend.
- C_2S ; Dicalciumsilicat reagiert langsam, leistet aber bei der Festigkeitsentwicklung im höheren Alter den größten Beitrag.

Größere Anteile an C_3S - und C_3A -Klinkerphasen im Zement bedingen eine höhere Anfangsfestigkeit. Zemente mit größerem Anteil an C_2S weisen eine geringere Wärmetönung auf. [Vgl. BAAR und EBELING (2017); S. 27]

2.3.1 Chemische Grundlagen

Mit Beginn der Hydratation bilden sich Calciumsilikat-Hydratverbindungen, kurz Hydratphasen oder C-S-H-Phasen. Die hydraulische Erhärtung wird dabei durch Inlösunggehen des Ausgangsmaterials und durch unmittelbare Wasseranlagerung an die feste Phase des Ausgangsmaterials hervorgerufen. [Vgl. HUNDT (1975) zit. nach TACKE (2002); S. 5] und [VAN BREUGEL (1991) zit. nach TACKE (2002); S. 5]

Die festigkeitsbildende Verfilzung der Hydrat-Phasen wird durch Wärmeentwicklung, chemische Wasserbindung und Porenstrukturverfeinerungen begleitet. Beim Reaktionsfortschritt können drei fließend ineinander übergehende Stadien unterschieden werden: [Vgl. LOCHER *et al.* (1976) zit. nach TACKE (2002)], [LOCHER *et al.* (1980) zit. nach TACKE (2002)] und [VAN BREUGEL (1991) zit. nach TACKE (2002); S. 5 f.]

- **Anfangsphase (Hydratationsstufe I):** Die Anfangsreaktion, die nur wenige Minuten dauert, ist durch die Bildung einer gesättigten Ionenkonzentration im Wasser und der Verbindung von Tricalciumaluminat und Calciumsulfat zu Trisulfat (Ettringit) geprägt. Eine erste Schicht aus Reaktionsprodukten schirmt dabei die unhydratisierten Zementpartikel ab und bewirkt im Folgenden eine mehrstündige Ruhephase.

- **Mittlere Phase (Hydratationsstufe II):** Nach rund fünf Stunden reißt diese Membran auf. Infolge beschleunigt sich der Abbindeprozess durch die Umformung des Tri- und Dicalciumsilikats zu langfaserigen C-S-H-Nadeln, die von der Zementkornoberfläche ausgehend ineinander verfilzen und somit die Grundlage für den festen, hochporösen Zementstein bilden.
- **Endphase (Hydratationsstufe III):** Da sich der Diffusionsweg der Wassermoleküle ins Korninnere mit wachsender C-S-H-Schichtdicke vergrößert, wird die oberflächennahe Zementhydratation zunehmend von einem diffusionskontrollierten Prozess abgelöst. Kurze Kristallfasern verdichten die Struktur, die Basizität steigt durch Abspaltung großer Mengen von Kalkhydrat ($\text{Ca}(\text{OH})_2$). In Verbindung mit Wasser wandelt sich das vorhandene Trisulfat in Monosulfat um.

Die schematische Darstellung der Bildung der einzelnen Hydratationsphasen (Hydratationsstufen) wird in Abbildung 2.1 gezeigt.

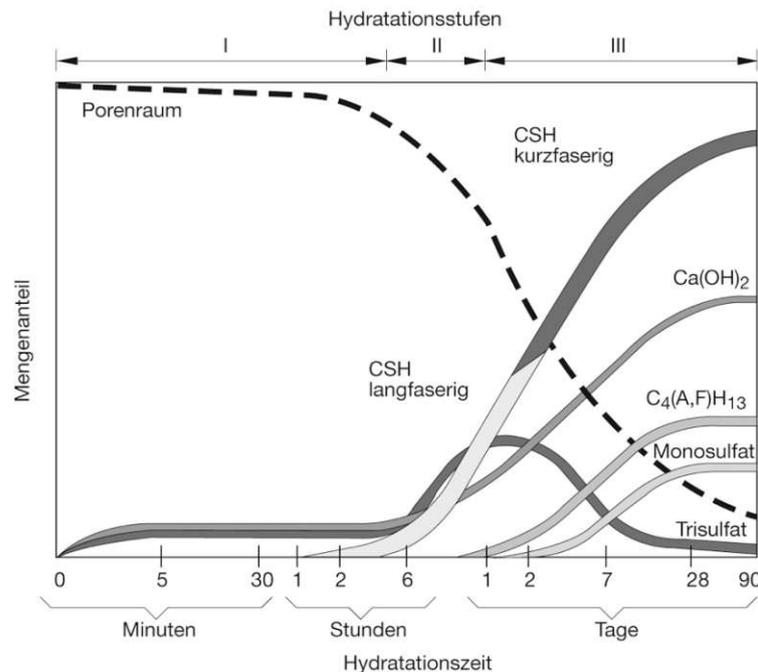


Abbildung 2.1 – Schematische Darstellung der Bildung der Hydratationsphasen; Darstellung nach [LOCHER *et al.* (1976) & RICHARTZ (1969) zit. nach LOCHER (2015); S. 237 – Bild 7.37]

2.3.2 Isotherme, adiabatische und teiladiabatische Bedingungen

Die Hydratation kann bei unterschiedlichen Temperaturbedingungen ablaufen. Man unterscheidet grundsätzlich isotherme und adiabatische Temperaturbedingungen. [Vgl. HINTZEN (1998); S. 29 f.]

- **Isotherme Temperaturbedingungen:** Als „isotherm“ werden Veränderungen des chemischen oder physikalischen Zustandes eines Stoffes bezeichnet, die bei konstanter Temperatur ablaufen. Sollte bei Reaktionen, wie bei der Hydratation gegeben, Wärme

freigesetzt oder verbraucht werden, können isotherme Bedingungen nur aufrechterhalten werden, wenn im gleichen Ausmaß Wärme zu- oder abgeführt wird.

- **Adiabatische Temperaturbedingungen:** Als „adiabatisch“ werden Änderungen des chemischen oder physikalischen Zustandes eines Stoffes bezeichnet, bei denen keine Wärme zwischen Umgebung und Stoff ausgetauscht wird. Dementsprechend wird die freigesetzte Reaktionswärme vollständig zur Temperaturerhöhung des betroffenen Stoffes und seiner Reaktionsprodukte genutzt. Dieses Temperaturregime herrscht z.B. im Inneren sehr dicker Betonbauteile, solange der Wärmefluss vernachlässigbar klein im Verhältnis zur entstehenden Wärmemenge bleibt. Der Temperaturanstieg ist dann proportional zur freigesetzten Wärmemenge.
- **Teiladiabatische Temperaturbedingungen:** Die Zementhydratation läuft jedoch bei üblichen Bauteilabmessungen weder unter isothermen noch unter adiabatischen Bedingungen ab. Solche Temperaturverläufe werden als „teiladiabatisch“ bezeichnet und erreichen ihr Temperaturmaximum, wenn sich zwischen entstehender und abfließender Wärmemenge ein Gleichgewicht einstellt.

Der im Labor unter isothermen oder adiabatischen Bedingungen ermittelte zeitliche Verlauf der Hydratationswärmefreisetzung kann daher als untere und obere Schranke für eine definierte Mörtel- oder Betonzusammensetzung herangezogen werden. Zwischen diesen Schranken kommt das baupraktische Verhalten zu liegen, sofern die Umgebungsbedingungen nicht einen Temperaturverlauf unterhalb des isothermen erzwingen. [Vgl. HINTZEN (1998); S. 29 f.]

In Abbildung 2.2 werden in der rechten Teilabbildung die freiwerdende Wärmemenge, bezeichnet als Hydratationswärme Q_H , für isotherme und adiabatische Temperaturverhältnisse dargestellt. In der linken Teilabbildung aus Abbildung 2.2 können dazu die möglichen Temperaturverläufe in einem Beton bei unterschiedlichen Temperaturverhältnissen abgelesen werden.

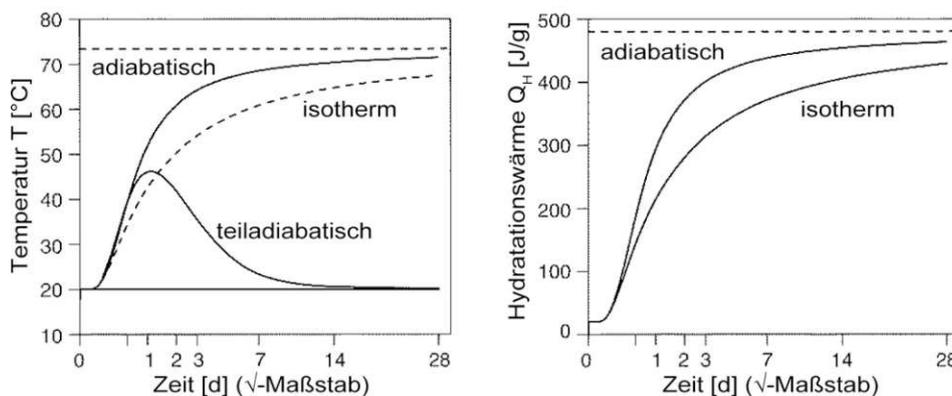


Abbildung 2.2 – Zeitliche Hydratationswärmefreisetzung eines CEM I 42,5 R unter isothermen und adiabatischen Bedingungen (rechts) und möglicher Temperaturverlauf in einem Beton (links); Darstellung nach [HINTZEN (1998); S. 29 – Bild 3.1]

2.4 Wasserzementwert, Hydratationsgrad und effektives Betonalter

2.4.1 Wasserzementwert

Das Massenverhältnis des wirksamen Wassergehalts zum Zementgehalt, bezogen auf 1 m³ verdichteten Frischbeton, nennt man Wasserzementwert oder w/z – Wert und wird nach Gleichung (2.1) berechnet. [Vgl. VEREIN DEUTSCHER ZEMENTINDUSTRIE e. V., Hrsg. (2013); S. 1]

$$\text{Wasserzementwert } w/z = \frac{w}{z} \quad (2.1)$$

mit

w/z	Wasserzementwert
w	Masse des Wassers
z	Masse des Zements

Der Zement kann chemisch und physikalisch eine Wassermenge von ca. 40 % seiner Masse binden. Dies entspricht einem Wasserzementwert von 0,40. Wird der Wassergehalt im Zementleim über diesen Wert hinaus erhöht, so wird das nicht gebundene Wasser als Überschusswasser bezeichnet. Nach Abschluss der Hydratation hinterlässt dieses verästelte, saugfähige (Kapillar-)Poren. [Vgl. VEREIN DEUTSCHER ZEMENTINDUSTRIE e. V., Hrsg. (2013); S. 2]

Neben Zement können dem Beton auch puzzolanische oder latent-hydraulische Zusatzstoffe wie Flugasche, Silikastaub, Hüttensandmehl sowie aufbereitete, hydraulisch wirksame Zusatzstoffe (AHWZ) nach ÖNORM EN 206¹² bzw. ÖNORM B 4710-1¹³ beigemischt werden. Diese Zusatzstoffe vom Typ II können bei der Betonzusammenstellung auf den Zementgehalt und den Wasserzementwert unter Verwendung des „k-Wert-Ansatzes“ angerechnet werden. Der Begriff des Wasserzementwertes wird dabei durch den gleichwertigen Begriff des äquivalenten Wasserzementwertes $(w/z)_{eq}$ bzw. des Wasserbindemittelwertes w/b ersetzt und errechnet sich nach Gleichung (2.2). [Vgl. ÖNORM B 4710-1 (2018); S. 45 f.]

¹² ÖNORM EN 206:2017 05 01: Beton – Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität

¹³ ÖNORM B 4710-1:2018 01 01: Beton – Festlegung, Eigenschaften, Herstellung, Verwendung und Konformität – Teil 1: Regeln zur Umsetzung der ÖNORM EN 206 für Normal- und Schwerbetone

$$\begin{aligned} & \text{äquivalenter Wasserzementwert } (w/z)_{eq} \\ & = \text{Wasserbindemittelwert } w/b = \frac{w}{z + \sum k_i \cdot m_i} \end{aligned} \quad (2.2)$$

mit

w	Masse des Wassers
z	Masse des Zements
k_i	Faktor für die Berücksichtigung des jeweiligen Zusatzstoffes
m_i	Masse des jeweiligen Zusatzstoffes

Die k-Werte werden nach ÖNORM EN 206 bzw. ÖNORM B 4710-1 für die verschiedenen Zusatzstoffe des Typs II nach nachfolgender Aufstellung festgelegt:

- Flugasche nach ÖNORM EN 450-1¹⁴, Kategorie A $k = 0,40$
- Silikastaub der Klasse 1 nach ÖNORM EN 13263-1¹⁵ $k = 1,00$ bzw. $k = 2,00$
- Hüttensandmehl nach ÖNORM EN 15167-1¹⁶ $k = 0,40$
- AHWZ nach ÖNORM B 3309 (alle Teile)^{17,18,19} $k = 0,80$

Die maximal zulässigen Zugabemengen von Zusatzstoffen des Typs II, die auf den Wasserbindemittelwert angerechnet werden dürfen, sind in ÖNORM EN 206 bzw. ÖNORM B 4710-1 angeführt. [Vgl. ÖNORM B 4710-1 (2018); S. 46 f.]

2.4.2 Hydratationsgrad

Zwischen dem Stand der Entwicklung der Eigenschaften des Zementsteins bzw. des Betons und dem Anteil des Zementes, der in Hydrate umgewandelt worden ist, besteht ein enger Zusammenhang. Dieser wurde beispielhaft u. a. zwischen Hydratationsgrad und Wärmefreisetzung in der Literatur vielfältig nachgewiesen. In der quantitativen Bestimmung des zu einem bestimmten Zeitpunkt vorliegenden hydratisierten Zementvolumens und des Endwertes nach vollständiger Hydratation liegt jedoch eine gewisse Schwierigkeit. [Vgl. RÖHLING (2012); S. 52]

Die Messung der Hydratationswärme ist technisch befriedigend durchführbar. Die Tatsache, dass der Wert für die Wärmemenge bei vollständiger Hydratation, bezeichnet als Q_{pot} , nicht

¹⁴ ÖNORM EN 450-1:2012 09 15: Flugasche für Beton – Teil 1: Definition, Anforderungen und Konformitätskriterien

¹⁵ ÖNORM EN 13263-1:2009 06 15: Silikastaub für Beton – Teil 1: Definition, Anforderungen und Konformitätskriterien

¹⁶ ÖNORM EN 15167-1:2007 01 01: Hüttensandmehl zur Verwendung in Beton, Mörtel und Einpressmörtel – Teil 1: Definition, Anforderungen und Konformitätskriterien

¹⁷ ÖNORM B 3309-1:2010 12 01: Aufbereitete, hydraulisch wirksame Zusatzstoffe für die Betonherstellung (AHWZ) – Teil 1: Kombinationsprodukte (GC/GC-HS)

¹⁸ ÖNORM B 3309-2:2010 12 01: Aufbereitete, hydraulisch wirksame Zusatzstoffe für die Betonherstellung (AHWZ) – Teil 2: Hüttensandmehl zur Verwendung in Beton, Mörtel und Einpressmörtel (GS bzw. GS-HS): Nationale Anwendung der ÖNORM EN 15167-1

¹⁹ ÖNORM B 3309-3:2010 12 01: Aufbereitete, hydraulisch wirksame Zusatzstoffe für die Betonherstellung (AHWZ) – Teil 3: Flugasche für Beton (GF bzw. GF-HS): Nationale Anwendung der ÖNORM EN 450-1

experimentell bestimmt werden kann, stellt eine Herausforderung für die Bestimmung des Hydratationsgrades dar. Der Endwert kann jedoch durch direkte Berechnung aus der chemischen Zusammensetzung oder durch die Extrapolation von, in Langzeitversuchen bestimmten, Messwerten ermittelt werden. [Vgl. RÖHLING (2012); S. 54]

Bestimmung des Hydratationsgrades

Der Hydratationsgrad α beschreibt das Verhältnis zwischen Messwerten zu einzelnen Zeitpunkten $MW(t)$ und dem theoretischen Messwert bei vollständiger Hydratation des Zementes $MW(\infty)$. Wird der Hydratationsgrad über die Bestimmung der Hydratationswärme ermittelt wird er auch als Enthalpiegrad oder thermischer Reaktionsgrad bezeichnet. Der Hydratationsgrad α ist keine physikalisch definierte Kenngröße. Er beschreibt den Hydratationsfortschritt im Verhältnis zum Endzustand quantitativ und wird nach Gleichung (2.3) bestimmt. [Vgl. RÖHLING (2012); S. 55]

$$\alpha(t) = \frac{MW(t)}{MW(\alpha = 1)} \quad (2.3)$$

mit

$\alpha(t)$ Hydratationsgrad zum Zeitpunkt t [-]

$MW(t)$ Messwert zum Zeitpunkt t

$MW(\alpha = 1)$ theoretischer Messwert bei vollständiger Hydratation

Maximaler Hydratationsgrad

Eine vollständige Hydratation kann praktisch nicht erreicht werden. Der maximal erreichbare Hydratationsgrad hängt dabei maßgebend von dem im Kapillarporensystem verfügbaren Wasser ab. Durch den Wasserzementwert können die maßgebenden Mechanismen hinreichend genau charakterisiert werden. Auch die Geschwindigkeit des Hydratationsprozesses wird durch den Wasserzementwert beeinflusst. Die durch Regression von Versuchsdaten ermittelten Beziehungen werden in Gleichungen (2.4) und (2.5) abgebildet und graphisch in Abbildung 2.3 dargestellt. [Vgl. RÖHLING (2012); S. 56 f.]

$$\alpha_{max} = 1 - \exp(-3,8 \cdot w/z) \quad (2.4)$$

$$\alpha_{max} = \frac{1,35 \cdot w/z}{0,315 + w/z} \quad (2.5)$$

mit

α_{max} maximaler Hydratationsgrad [-]

w/z Wasserzementwert [-]

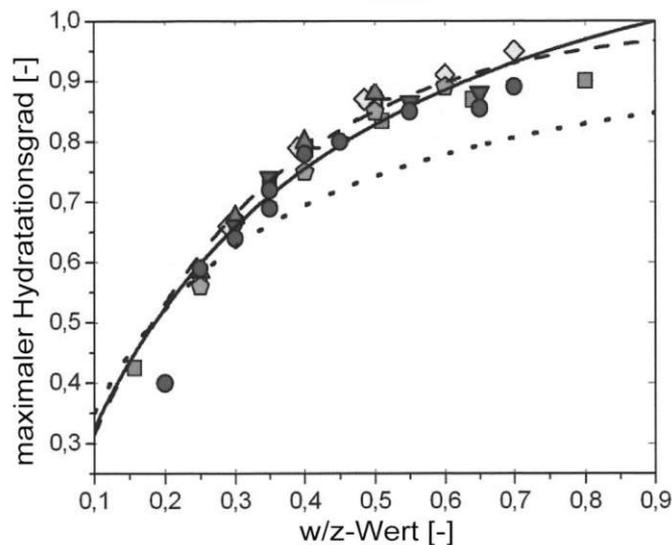


Abbildung 2.3 – maximaler Hydratationsgrad in Abhängigkeit vom Wasserzementwert nach verschiedenen experimentellen Daten; Darstellung nach [RÖHLING (2009); S. 25 – Bild 2.10 zit. nach RÖHLING (2012); S. 58 – Bild 1.34]

2.4.3 Effektives Betonalter

Zeitdiskrete Beschreibungen der Materialeigenschaften des jungen Betons wurden früher mit Hilfe des auf der Temperaturfreisetzung basierenden Hydratationsgrad durchgeführt. Neue Untersuchungen zeigen jedoch, dass dieser Ansatz keine allgemeingültige Formulierung darstellt. Bei Einsatz von Hüttensandzementen oder Flugasche kann nach TIGGES (2010) kein gesicherter Zusammenhang zwischen Wärmefreisetzung und Festigkeitsentwicklung infolge der latent hydraulischen Reaktionen angenommen werden. Sollen jedoch die maßgebenden Materialeigenschaften des erhärtenden Betons zeitdiskret beschrieben werden, ist ein Bezug auf das effektive Betonalter t_{eff} als geeigneter anzusehen. Dieses fiktive Alter bildet neben der ablaufenden Zeit auch die Auswirkung der Betontemperatur auf den Erhärtungszustand des Betons ab. Es stellt damit eine allgemeingültige Formulierung der Beziehung zwischen Temperaturverlauf im jungen Beton und dessen Festigkeitsentwicklung dar. [Vgl. SCHLICKE (2014); S. 10]

Die Wärmefreisetzungsrate bei der Erhärtung des Betons ist abhängig von dessen Temperaturgeschichte. Dies hat zur Folge, dass sich die Wärmeentwicklung bei höheren Temperaturen beschleunigt. Basis für einen Vergleich bildet dabei die Temperaturentwicklung bei einer isothermen Lagerung von $T = 20 \text{ °C}$. Das effektive Betonalter t_{eff} beschreibt dabei den Einfluss der Temperatur auf den Erhärtungsprozess in Gleichung (2.6) nach einem Ansatz von FREIESLEBEN *et al.* (1977) basierend auf der Arrhenius-Funktion. [Vgl. BÖDEFELD (2010); S. 13]

$$t_{eff} = \int_0^t \exp \left\{ \frac{E_A}{R} \cdot \left(\frac{1}{293} - \frac{1}{273 + T(t)} \right) \right\} dt \quad (2.6)$$

mit

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

Genauere Resultate liefert die Arrhenius-Funktion nur für kleine Temperaturintervalle und in Abhängigkeit der Zementart. Die Aktivierungsenergie ist daher als temperaturabhängig zu betrachten und kann nach FREIESLEBEN *et al.* (1977) bei Portlandzementen mit $E_A = 33,5 \text{ kJ/mol}$ für Betontemperaturen über 20 °C und nach Gleichung (2.7) für Betontemperaturen unter 20 °C angegeben werden. [Vgl. RÖHLING (2009); S. 32]

$$E_A = 33,5 + 1,47 \cdot (20 - T) \quad (2.7)$$

mit

E_A	Aktivierungsenergie
T	Betontemperatur

Das *öbv-MB „Weiße Wanne optimiert“* liefert zum effektiven Betonalter identische Angaben. [Vgl. *öbv-MB „Weiße Wanne optimiert“* (2018); S. 4]

2.5 Hydratationswärme

Das Herstellungsverfahren des latent hydraulischen Bindemittels bedingt den exothermen Charakter der Zementhydratation. Durch die schnelle Abkühlung nach dem Sintern entstehen durch Kristallisation der Schmelze metastabile Verbindungen, die in einem ungeordneten

Zustand mit hoher thermisch eingepprägter freier Energie eingefroren werden. [Vgl. HUCKFELDT (1993) zit. nach TACKE (2002); S. 8]

Wie in Abbildung 2.4 gezeigt wird, unterscheiden sich die einzelnen Klinkerphasen in ihrer Wärmeentwicklung deutlich. Allen voran weist das Tricalciumaluminat (C_3A) eine hohe und rasche Wärmefreisetzung auf. [Vgl. TACKE (2002); S. 8]

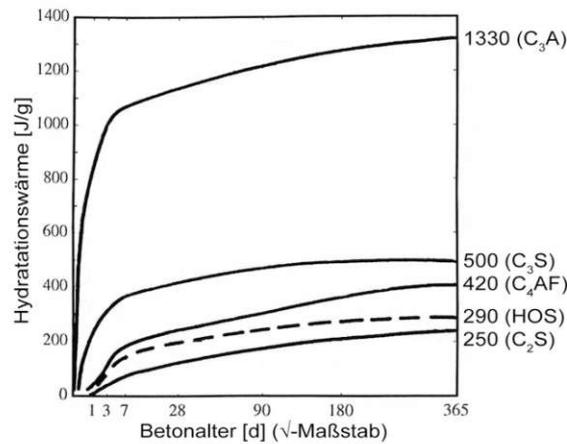


Abbildung 2.4 – Wärmeentwicklung der Hydratphasen und Hochofenschlacke (HOS); Darstellung nach [LEA (1970) zit. nach TACKE (2002); S. 8 – Bild 2.2]

Die freisetzbare maximale Wärmemenge Q_{max} ist abhängig vom Wasserzementwert und dem dazu in Abhängigkeit stehenden Hydratationsgrad. Sie erreicht den theoretisch vorhandenen Wärmehalt Q_{pot} bei vollständiger Umsetzung des Zementes nicht. [Vgl. RÖHLING (2009); S. 46]

2.5.1 Ermittlung der Hydrationswärme aus der Zusammensetzung des Zementes

Die rechnerische Ermittlung der Hydrationswärme aus der Zusammensetzung des Zementes wird oft als problematisch angesehen. Dabei hängt das Energiepotential auch von anderen Faktoren als der chemischen Zusammensetzung ab. Beispielhaft können hierzu die Brenntemperatur oder die Anwesenheit von Fremdatomen angeführt werden. Daraus resultierend streuen rechnerisch ermittelte Angaben zur Wärmefreisetzung der Klinkerphasen, wie in Tabelle 2.2 angegeben, nicht unerheblich. [Vgl. RÖHLING (2009); S. 51 f.]

Tabelle 2.2 – Hydratationswärme nach der vollständigen Umsetzung der Klinkermineralien und der Zusatzstoffe [Vgl. RÖHLING (2012); S. 131 – Tabelle 1.7]

Ausgangssubstanz	Hydratationswärme [J/g]	
	Ausgangssubstanz	
	Literaturangaben	Vorschlag bei gemeinsamer Reaktion (Klinker)
C_3S	490 – 570	530
$\beta - C_2S$	225 – 270	250
C_3A	840 – 1340	1100
C_3A + Gips (Trisulfatbildung)		1050 ¹⁾
C_3A + Gips (Monosulfatbildung)	1040 – 1340	1050 ¹⁾
C_4AF	125 – 725	350
MgO	850	850
Na_2O	800 – 1000	2170
K_2O		2450
CaO (frei)	1165 – 1190	1170
Flugasche	210 ²⁾ – 570 ³⁾	50
Hüttensand	250 – 465	400
Silika	500 – 880	850
Metakaolin	500 – 600	550

¹⁾ bezogen auf C_3A ²⁾ 8,8 % CaO nach KUSTERMAN, A. (2005) ³⁾ nach KÖNIG, H. (2010)

Eine rechnerische Ermittlung der Hydratationswärme kann zwar zur Abschätzung und als Anhaltspunkt herangezogen werden, ersetzt jedoch eine erforderliche messtechnische Erfassung der Wärmeentwicklung nicht. Die Gesamtwärmeentwicklung Q_{pot} eines Zementes wird im Allgemeinen als Summe der Teilwärme der einzelnen Klinkerphasen Q_i und deren Massenanteile m_i nach Gleichung (2.8) ermittelt. [Vgl. RÖHLING (2009); S. 53]

$$Q_{pot} = Q_{C_3S} \cdot m_{C_3S} + Q_{C_2S} \cdot m_{C_2S} + Q_{C_3A+Gips} \cdot m_{C_3A} + Q_{C_3A} \cdot m_{Rest-C_3A} + Q_{C_4AF} \cdot m_{C_4AF} + Q_{MgO} \cdot m_{MgO} + \dots \quad (2.8)$$

In diesem Zusammenhang ist nur die rechnerische Bestimmung des theoretischen Maximalwertes der zu erwartenden Hydratationswärme sinnvoll. Eine Prognose der zeitlichen Entwicklung der Wärmefreisetzung der verschiedenen Klinkerphasen ist hingegen höchst problematisch, da sich die gegenseitigen Wechselwirkungen im Hydratationsprozess und die Mahlfineinheit gravierend auswirken. In Abbildung 2.5 werden die berechnete Wärmemenge unterschiedlicher

Zemente aus HINTZEN (1998) der Lösungswärme nach 7 Tagen Erhärtung gegenübergestellt. Es ist dabei zwar ein Zusammenhang, jedoch mit teilweise erheblichen Streuungen, zu erkennen. [Vgl. RÖHLING (2009); S. 53 f.]

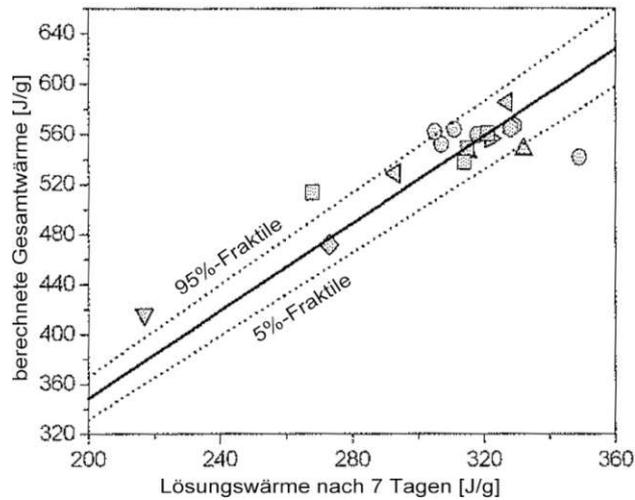


Abbildung 2.5 – Ermittlung der Hydratationswärme aus der chemisch-mineralogischen Zusammensetzung, Zemente der Versuche aus HINTZEN (1998); Darstellung nach [RÖHLING (2009); S. 54 – Bild 3.16]

Die in der Praxis freigesetzte Hydratationswärme hängt vom Wasserzementwert ab und kann erst nach längerer Hydratationszeit erreicht werden, wie auch in Abbildung 2.6 gezeigt wird. Nach 28 Tagen kann damit gerechnet werden, dass ca. 85% bis 90% des zugehörigen Endwertes Q_{pot} erreicht wurden. [Vgl. RÖHLING (2009); S. 54]

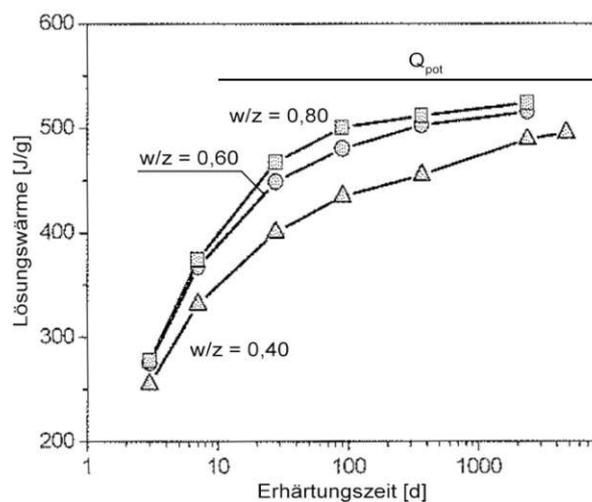


Abbildung 2.6 – Wärmeentwicklung in Abhängigkeit vom Wasserzementwert nach VERBECK und HASS; Darstellung nach [RAKEL (1965) zit. nach RÖHLING (2009); S. 44 – Bild 3.8]

Bei einer unvollständigen Hydratation liegt der Hydratationsgrad unter dem Maximalwert. Demgemäß kann die maximal freisetzbare Wärmemenge Q_{max} nach Gleichung (2.9) in Abhängigkeit des Wärmeinhalts Q_{pot} und des maximalen Hydratationsgrades α_{max} ermittelt werden.

$$Q_{max} = \alpha_{max} \cdot Q_{pot} \quad (2.9)$$

mit

Q_{max} maximal freisetzbare Wärmemenge

α_{max} maximaler Hydratationsgrad

Q_{pot} Wärmehalt

2.5.2 Experimentelle Bestimmung der Hydratationswärme

Zuverlässige Angaben zur Wärmefreisetzung im Beton können ausschließlich experimentell durch Kalorimetrie ermittelt werden. Hier können die Einflüsse aus Zementzusammensetzung, Zusatzstoffen und Zusatzmitteln, sowie deren Wechselwirkung untereinander erfasst werden. Die vorhandenen kalorimetrischen Methoden unterscheiden sich in Messprinzip, Betriebsart, Bauart, Anwendungsbereich sowie Prüfbedingungen. Die daraus resultierenden Messergebnisse variieren daher je nach angewandeter Technik. Die Hydratationswärme kann mit folgenden Methoden ermittelt werden: [Vgl. RÖHLING (2009); S. 55]

- Lösungskalorimeter
- isothermische Kalorimeter
- adiabatische Kalorimeter
- teiladiabatische Kalorimeter

Die aus Versuchen gewonnenen Messdaten der Wärmemengen sind vom Wasserzementwert und dem daraus begrenzten Hydratationsgrad sowie der Dauer des Messvorganges und der regelungstechnischen Erfassbarkeit der Messwertänderungen abhängig. Mit abnehmender Wärmerate im auslaufenden Hydratationsprozess kann die maximal mögliche Wärmemenge Q_{max} messtechnisch nicht mehr erfasst werden. Rückschlüsse auf den Hydratationsgrad mit der potenziellen Wärmemenge Q_{pot} als Bezugsbasis können daher nur rechnerisch aufgestellt werden. [Vgl. RÖHLING (2009); S. 55 f.]

Die direkte Bestimmung des Verlaufes und der Geschwindigkeit der Wärmefreisetzung im kompletten Erhärtungszeitraum kann mit den zur Verfügung stehenden Methoden nicht erbracht werden. Es können lediglich einzelne physikalische Größen ermittelt werden. In Tabelle 2.3 werden die einzelnen Verfahren und deren Messergebnisse aufgelistet. [Vgl. RÖHLING (2012); S. 132]

Tabelle 2.3 – Vergleich der Prüfverfahren zur Bestimmung der Hydratationswärme, unter Verwendung von Angaben in HINTZEN (1998) [Vgl. RÖHLING (2009); S. 56 – Tafel 3.6]

Verfahren	Probe	Lagerungsbedingungen	Messergebnis
Lösungswärme (ÖNORM EN 196-8 ²⁰)	Zementleim w/z = 0,40	isothermisch 20 °C (nach ASTM 70 F)	Wärmemenge [J/g] zum Zeitpunkt der Prüfung (normgemäß 7 Tage)
Wärmefluss- kalorimetrie (Differential- kalorimetrie)	Zementleim w/z = 0,50 (Regel)	isothermisch 25 °C (20 °C)	Wärmemenge [J/g] und Wärmerate [J/g h], kontinuierlich bis zu 3 Tagen
adiabatische Kalorimetrie	Beton beliebige Zusammensetzung	adiabatisch, beliebige Frischbeton- und Umgebungstemperatur	Temperaturanstieg, kontinuierlich
teiladiabatische Kalorimetrie (ÖNORM EN 196-9 ²¹)	Mörtel w/z = 0,50	konstante Umgebungstemperatur	Temperaturanstieg bzw. Wärmemenge, kontinuierlich bis zu 7 Tagen
teiladiabatische Kalorimetrie	Beton beliebige Zusammensetzung	konstante Umgebungs- temperatur, beliebige Frischbetontemperatur	Temperaturanstieg, kontinuierlich bis zu 5 Tagen

2.5.3 Hydratationswärmerate

Die Höhe und Geschwindigkeit der bei der Hydratation freigesetzten Wärmemenge ist von der chemischen Reaktivität der Komponenten des Zementes (Zementklinker, Zumahlstoffe) und weiterer Zusatzstoffe im Beton (Flugasche, Silika) sowie einer Fülle von Randbedingungen abhängig. Hier können unter anderem die Korngrößenverteilung, Temperatur, Zusatzmittel und der Wasserzementwert angeführt werden. Hieraus resultiert das spezifische Verhalten unter den jeweiligen Erhärtingsbedingungen von Zementsorten, Zementarten und Zementlieferchargen. [Vgl. RÖHLING (2012); S. 124]

Der Einfluss der Mahlfeinheit auf den Verlauf der Hydratationswärmerate kann beispielhaft in Abbildung 2.7 gezeigt werden.

²⁰ ÖNORM EN 196-8:2010 06 01: Prüfverfahren für Zement – Teil 8: Hydratationswärme – Lösungsverfahren

²¹ ÖNORM EN 196-9:2010 05 01: Prüfverfahren für Zement – Teil 9: Hydratationswärme – Teiladiabatisches Verfahren

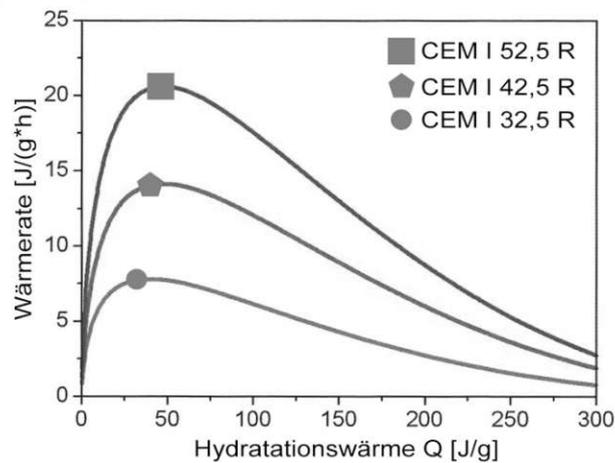


Abbildung 2.7 – Wärmerate in Abhängigkeit von der freigesetzten Wärmemenge für verschiedene Zementfestigkeitsklassen. (Isotherme Wärmeflussmessung, DCA, bei 25 °C) Die Messwerte wurden durch eine mathematische Funktion approximiert; Darstellung nach [RÖHLING (2012); S. 38 – Bild 1.15]

Portlandzementklinker

Die am Anfang des Hydratationsprozesses ablaufenden Reaktionen (Stadium 1, Abbildung 2.8) an der Oberfläche der Zementpartikel ist mit einer kurzen, aber hohen Wärmeentwicklungsrate verbunden (etwa 40 – 80 J/(g h)). Die in diesem Stadium freigesetzte geringe Wärmemenge von etwa 10 – 20 J/g und der damit verbundene Temperaturanstieg können jedoch vernachlässigt werden, da dieser Anfangsprozess zeitlich weit vor dem Einbau des Frischbetons abgeschlossen ist. In der darauffolgenden dormanten Periode (Stadium 2, Abbildung 2.8) reduziert sich die Wärmeentwicklung deutlich, kommt aber nicht zum Erliegen.

Die anschließende Akzelerations- oder Beschleunigungsperiode (Stadium 3, Abbildung 2.8) ist durch eine bis zu ihrem Maximum anwachsende Wärmerate gekennzeichnet. Es werden zwar nur etwa 20 % der Gesamtwärme bis zum Erreichen der maximalen Wärmerate freigesetzt, durch den entstehenden Wärmestau hat diese Phase gleichwohl einen signifikanten Einfluss auf das sich ausbildende Temperaturfeld.

Die maßgebende Hydratationswärmemenge entsteht in der Dezelerationsperiode (Stadium 4, Abbildung 2.8), die die maximale Temperatur im Bauteil als Folge der freigesetzten Hydratationswärme hervorruft. Im Endstadium der Hydratationsreaktionen (Stadium 5, Abbildung 2.8) wird zwar noch eine beträchtliche Wärmemenge gebildet, jedoch so gedrosselt, dass ein Temperaturanstieg nur unter adiabatischen Bedingungen erfolgen kann. [Vgl. RÖHLING (2012); S. 124]

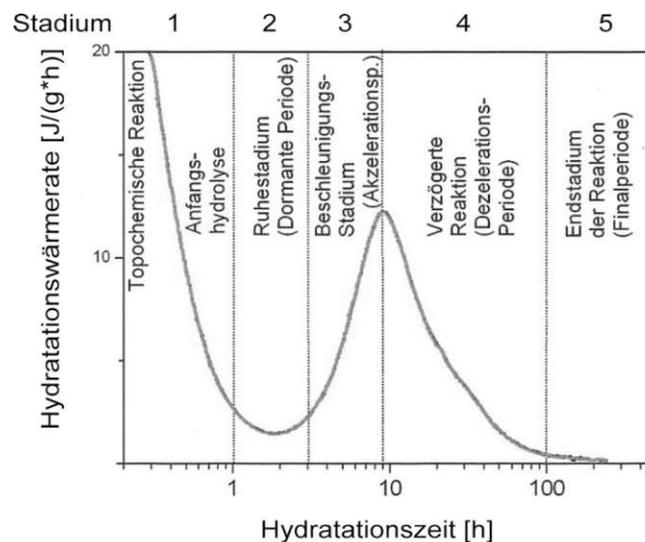


Abbildung 2.8 – Hydratationsstufen und Reaktionskinetik, dargestellt an der Klinkerphase C_3S (schematisch, nach MINDESS und YOUNG); Darstellung nach [RÖHLING (2012); S. 37 – Bild 1.14]

Latent-hydraulische und puzzolanische Zusatzstoffe

Vergleichsweise langsam zum Portlandzementklinker reagieren alle reaktiven Zusatzstoffe und vermindern im Allgemeinen die Wärmerate des gesamten Bindemittels. Die maximale Hydratationswärme kann jedoch durch den Einsatz von Zusatzstoffen in Summe angehoben werden. [Vgl. RÖHLING (2012); S. 125]

2.6 Temperaturentwicklung im erhärtenden Beton

Für die in einem Bauwerk entstehende Temperaturentwicklung hat die insgesamt freiwerdende Hydratationswärme, ausgenommen bei adiabatischer Erhärtung, nur eine indirekte Bedeutung. Die Entwicklung der Temperatur ist jedoch für baupraktische Fragen, z.B. für die Rissbildung unter Zwang, maßgebend.

Die Höchsttemperatur im erhärtenden Beton ergibt sich im allgemeinen Fall aus der Differenz zwischen entstehender und abfließender Hydratationswärme. Der sich dabei einstellende Temperaturverlauf wird als teiladiabatisch bezeichnet. Die vorherrschende Hydratationswärmerate spielt in diesem Zusammenhang eine wesentliche Rolle. Zur Vorhersage des teiladiabatischen Temperaturverlaufes im Beton sind folgende beton- und ausführungstechnische Einflussgrößen zu nennen: [Vgl. HINTZEN (1998); S. 14 f.]

- Höhe und zeitlicher Verlauf der Hydratationswärmefreisetzung
- Bauteildicke
- Zementgehalt
- Wärmekapazität des Betons (z.B. abhängig von Art und Rohdichte des Zuschlages)
- Wärmeleitfähigkeit des Betons
- Wärmeübergangsbedingungen an den Grenzen Beton/Schalung/Luft etc.

- Frischbetontemperatur
- Lufttemperatur (Umgebungsbedingungen)
- Künstliche Kühlungsmaßnahmen

2.6.1 Höhe und zeitlicher Verlauf der Hydratationswärmefreisetzung

Die Höchsttemperatur im Bauteil entsteht proportional zur Freisetzung der Hydratationswärme der unterschiedlichen Zementarten innerhalb der ersten zwei Tage analog Abbildung 2.9. Dies hat zur Folge, dass bei langsamer erhärtenden Zementen die emittierte Wärmemenge nur noch in abgeschwächter Form zum Temperaturmaximum beiträgt. [Vgl. RÖHLING (2009); S. 101]

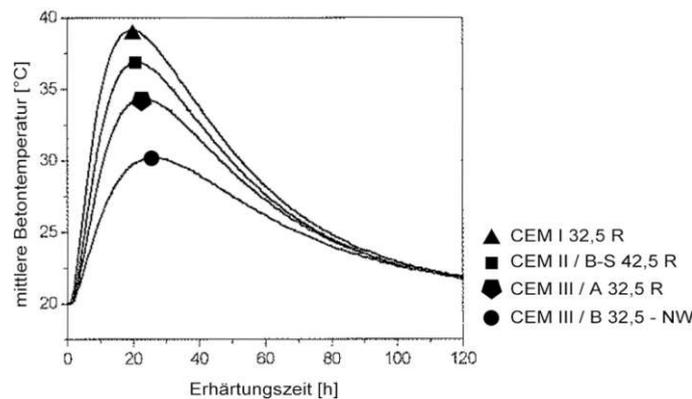


Abbildung 2.9 – Verlauf der mittleren Bauteiltemperatur in Abhängigkeit der Betonzusammensetzung; Darstellung nach [RÖHLING (2009); S. 102 – Bild 4.23a]

Wurde die zeitliche Temperaturentwicklung im jungen Beton unter adiabatischen Bedingungen im Versuch ermittelt, so können diese, umgerechnet auf das effektive Betonalter, mit verschiedensten Entwicklungsfunktionen mathematisch beschrieben werden. Für den Temperaturverlauf hat sich hier der Ansatz nach JONASSON (1984) in Gleichung (2.10) als geeignet erwiesen. [Vgl. SCHLICKE (2014); S. 13]

$$\Delta T(t_{eff}) = \Delta T_{\infty} \cdot \exp \left\{ A \cdot \left(\ln \left[1 + \frac{t_{eff}}{t_k} \right] \right)^{c_1} \right\} \quad (2.10)$$

mit

$\Delta T(t_{eff})$	Temperaturerhöhung bezogen auf das effektive Betonalter
ΔT_{∞}	maximale Temperaturerhöhung des Betons
A, t_k, c_1	Regressionsparameter zur Anpassung an den Versuchsbeton

Die Wärmequellfunktion wird häufig auch mit Hilfe der Wärmemenge beschrieben. Die maximal freiwerdende Wärmemenge Q_{max} wird darin nach Gleichung (2.11) berechnet. [Vgl. SCHLICKE (2014); S. 13]

$$Q_{max} = \int_0^{\infty} S_c(t) \cdot \Delta T(t) dt \quad (2.11)$$

mit

$\Delta T(t)$ Temperaturerhöhung im Zeitverlauf

$S_c(t)$ Wärmespeicherkapazität des Betons im Zeitverlauf

Auf die zeitliche Veränderung der Wärmespeicherkapazität kann bei zeitschritt-basierten Ansätzen verzichtet werden, da diese bereits indirekt bei der Anpassung mit Hilfe der Regressionsparameter in Gleichung (2.10) berücksichtigt werden. Die maximal freiwerdende Wärmemenge Q_{max} kann daher vereinfacht nach Gleichung (2.12) angegeben werden. [Vgl. SCHLICKE (2014); S. 14]

$$Q_{max} = S_c \cdot \Delta T_{\infty} \quad (2.12)$$

mit

S_c Wärmespeicherkapazität des Betons

ΔT_{∞} maximale Temperaturerhöhung des Betons

Letztendlich folgt die Wärmequellfunktion, beschrieben durch die Wärmemenge, nach Gleichung (2.13). [Vgl. SCHLICKE (2014); S. 14]

$$Q(t_{eff}) = Q_{max} \cdot \exp \left\{ A \cdot \left(\ln \left[1 + \frac{t_{eff}}{t_k} \right] \right)^{c_1} \right\} \quad (2.13)$$

mit

$Q(t_{eff})$ Wärmemenge bezogen auf das effektive Betonalter

Q_{max} maximal freiwerdende Wärmemenge des Betons

A, t_k, c_1 Regressionsparameter zur Anpassung an den Versuchsbeton

2.6.2 Bauteildicke

Die Bauteildicke von Platten und Wänden beeinflusst den Temperaturverlauf im Bauteil maßgebend. Weisen dünne Querschnitte einen annähernd isothermen Verlauf der Temperatur auf, so

nähert sich dieser mit anwachsender Bauteildicke asymptotisch dem adiabatischen Temperaturverlauf, wie in Abbildung 2.10 dargestellt. [Vgl. RÖHLING (2012); S. 360]

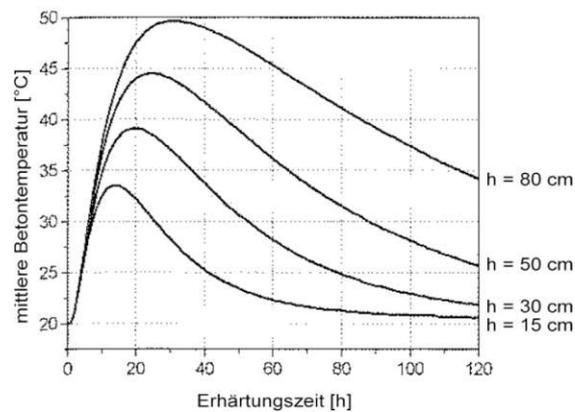


Abbildung 2.10 – Verlauf der mittleren Bauteiltemperatur in Abhängigkeit der Bauteildicke; Darstellung nach [RÖHLING (2009); S. 103 – Bild 4.23e]

2.6.3 Zementgehalt

Mit zunehmendem Zementgehalt steigt proportional dazu das auftretende Temperaturmaximum, unabhängig von der verwendeten Zementart. In Abbildung 2.11 wird der Temperaturverlauf eines Portlandzementes CEM I 32,5 R mit unterschiedlichem Zementgehalt von 280 kg/m^3 bis 360 kg/m^3 dargestellt.

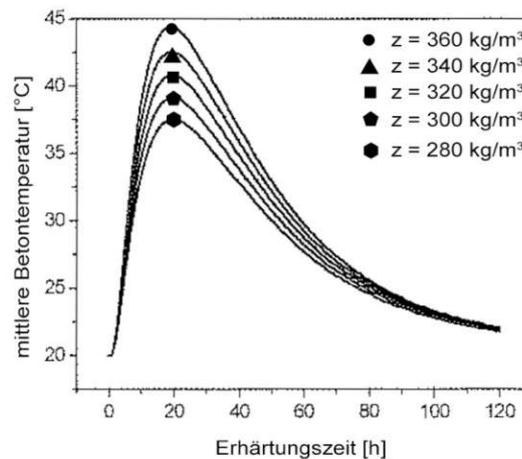


Abbildung 2.11 – Verlauf der mittleren Bauteiltemperatur in Abhängigkeit des Zementgehaltes; Darstellung nach [RÖHLING (2009); S. 102 – Bild 4.23b]

2.6.4 Wärmekapazität des Betons

Grundlage für die Bestimmung der Wärmekapazität des Betons S_b sind die spezifische Wärmekapazität c_b sowie die Rohdichte des Betons ρ_b . Die Wärmekapazität des Betons folgt aus Gleichung (2.14):

$$S_c = c_c \cdot \rho_c \quad (2.14)$$

mit

S_c	Wärmekapazität des Betons
c_c	spezifische Wärmekapazität des Betons
ρ_c	Rohdichte des Betons

In Arbeiten von MANDRY (1963) und NEVILLE (1981) wurde die spezifische Wärmekapazität des Festbetons mit 0,85 – 1,15 kJ/(kg K) und die des Frischbetons mit 1,00 – 1,25 kJ/(kg K) festgelegt. Die Abnahme im Laufe des Hydratationsprozesses kann mit den sich stark ändernden thermischen Eigenschaften des Wassers durch chemische Bindung erklärt werden.

Der Zusammenhang von Hydratationsgrad und spezifischer Wärmekapazität im abbindenden Beton wird nach DE SCHUTTER und TAERWE (1995) und BERNANDER und EMBORG (1991) in Gleichung (2.15) dargestellt. [Vgl. RÖHLING (2009); S. 70]

$$c_c = 1,15 - 0,15 \cdot \alpha \quad (2.15)$$

mit

c_c	spezifische Wärmekapazität des Betons
α	Hydratationsgrad

Werden Temperaturverlaufsberechnungen durchgeführt, kann ein Mittelwert der spezifischen Wärmekapazität des Betons mit 1,1 kJ/(kg K) angenommen werden.

Die Wärmekapazität nimmt im Laufe der Hydratation ab. Eine Formulierung dieser, unter Einbeziehung des Hydratationsgrades, gelingt nach Gleichung (2.16). [Vgl. RÖHLING (2009); S. 70 f.]

$$S_c = m_z \cdot (1 - \alpha) \cdot c_z + m_g \cdot c_g + (m_w - 0,20 \cdot m_z \cdot \alpha) \cdot c_w + 1,20 \cdot \alpha \cdot m_z \cdot c_{zs} \quad (2.16)$$

mit

S_c	Wärmekapazität des Betons
m_z, m_g, m_w	Massenanteile des Zementes, der Gesteinskörnung und des Wassers
c_z, c_g, c_w, c_{zs}	Werte für die spezifische Wärmekapazität des Zementes (0,84 kJ/(kg K) nach HAMFLER (1988) und MANDRY (1963)), der Gesteinskörnung (0,70 – 1,00 kJ/(kg K)), des Wassers (4,20 kJ/(kg K)), des Zementsteines (0,96 kJ/(kg K) nach WARNCKE (1967)) und der Flugasche (0,84 kJ/(kg K) nach ROSTÁSY <i>et al.</i> (2002))
α	Hydratationsgrad

Aus den genannten Werten folgt für Betone mit gängigen Mischungsverhältnissen die Wärmekapazität des Betons zwischen 2400 bis 2600 kJ/(m³ K) und der Mittelwert mit 2500 kJ/(m³ K). Dabei ist, wie in Abbildung 2.12 gezeigt, eine Reduzierung der Wärmekapazität mit einer Erhöhung der Bauteiltemperatur, und umgekehrt, zu beobachten. [Vgl. RÖHLING (2009); S. 70 f.]

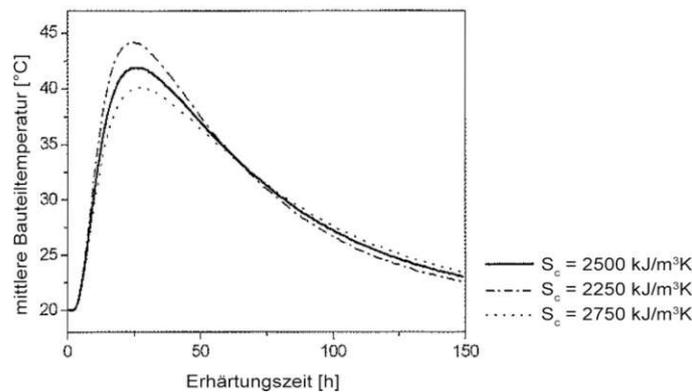


Abbildung 2.12 – Auswirkung einer unterschiedlichen Wärmekapazität des Betons auf den Temperaturverlauf; Darstellung nach [RÖHLING (2009); S. 72 – Bild 4.3]

Der in der *öbv-RL „Weiße Wannen“* empfohlene Wert der Wärmekapazität des Betons stimmt mit dem angegebenen Mittelwert von 2500 kJ/(m³ K) überein. Im Planungsstadium niedriger angesetzte Werte liegen auf der sicheren Seite. [Vgl. *öbv-RL „Weiße Wannen“* (2018); S. 78]

2.6.5 Wärmeleitfähigkeit des Betons

Die Wärmeleitfähigkeit des Betons λ_c wird durch die thermischen Eigenschaften und den Massenanteil der Gesteinskörnung, dem Wasser- und Luftporengehalt sowie durch die Temperatur im Bauteil beeinflusst. [Vgl. KIM *et al.* (2003) zit. nach RÖHLING (2009); S. 67]

Aus den jeweiligen Anteilen der Komponenten kann die Wärmeleitfähigkeit des Betons nach MANDRY (1963) durch Gleichung (2.17) berechnet werden: [Vgl. RÖHLING (2009); S. 67]

$$\lambda_c = \frac{m_z \cdot \lambda_z + m_g \cdot \lambda_g + m_w \cdot \lambda_w}{m_z + m_g + m_w} \quad (2.17)$$

mit

- λ_c Wärmeleitfähigkeit des Betons
- m_z, m_g, m_w Massenanteile des Zementes, der Gesteinskörnung und des Wassers
- λ_z Wärmeleitfähigkeit des Zementes [4,60 kJ/(m h K)]
- λ_g Wärmeleitfähigkeit der Gesteinskörnung [kJ/(m h K), siehe Tabelle 2.4]
- λ_w Wärmeleitfähigkeit des Wassers [2,61 kJ/(m h K)]

Die Wärmeleitfähigkeit der Gesteinskörnung (λ_g) und daraus produzierter Betone (λ_c) wurde in umfangreichen Versuchen nach CLAUSER (1995) und Berechnungen nach BAMFORTH (2007) ermittelt und in Tabelle 2.4 aufgelistet. Sind Zusatzstoffe wie Flugasche ($\lambda_{fa} = 4,70$ kJ/(m h K)) dem Beton beigemischt, ist Gleichung (2.17) entsprechend zu erweitern. [Vgl. RÖHLING (2009); S. 67]

Tabelle 2.4 – Wärmeleitfähigkeit λ [kJ/(m h K)] verschiedener Gesteinskörnungen und daraus hergestellter Betone nach Angaben von CLAUSER (1995) und Berechnungen von BAMFORTH (2007) [Vgl. RÖHLING (2009); S. 434]

Gesteinsart	Wärmeleitfähigkeit λ [kJ/(m h K)]		
	Gesteinskörnung (λ_g)	Beton (λ_b)	
		Sand und grobe Körnung aus gleichem Gestein	Grobe Körnung aus der Gesteinsart, Sand aus Quarziten
Quarzit	20,90	11,50	11,50
Gneis, niedriger Quarzgehalt	10,45	6,70	8,45
Granit, Dionit, Gabbro	10,80	6,85	8,55
Syenit, Porphy	10,10	6,55	8,35
Basalt, Rhyolit	10,45	6,70	8,45
Kalkstein, Dolomit	9,35	6,15	8,05
Sandstein	8,65	5,80	7,85

Analysen von Temperaturberechnungen zeigen, dass unterschiedliche Wärmeleitfähigkeiten im Beton den Verlauf der Bauteilmitteltemperaturen nur geringfügig beeinflussen. Ein starker Wärmeübergang an der Oberfläche hat jedoch zur Folge, dass sich auch die Wärmeleitung proportional dazu steigert. Im Hinblick auf das sich ausbildende Temperaturprofil im Querschnitt hat die Wärmeleitfähigkeit daher eine größere Bedeutung. [Vgl. RÖHLING (2009); S. 68]

Wenn nur eine Schätzung der zu erwartenden Temperatur erfolgt oder die Art der Gesteinskörnung nicht bekannt ist, kann die Wärmeleitfähigkeit des Betons als Mittelwert mit $7,5 \text{ kJ}/(\text{m h K})$ angesetzt werden.

Ist die Temperaturentwicklung im anfänglichen Erhärtungsstadium von Interesse, darf die Wärmeleitfähigkeit nicht als Konstante angenommen werden. Mit fortschreitendem Hydratationsgrad konnte eine Abnahme der Wärmeleitfähigkeit in den ersten 7 Tagen um etwa 30 % festgestellt werden. [Vgl. BYFORS (1980) zit. nach RÖHLING (2009); S. 69] und [RILEM (1982) zit. nach RÖHLING (2009); S. 69]

Die Änderung der Wärmeleitfähigkeit im Zeitverlauf kann nach EIERLE und SCHIKORA (2000) synchron zur Wärmefreisetzung des Betons in Gleichung (2.18) angegeben werden. [Vgl. SCHLICKE (2014); S. 14]

$$\lambda(t_{eff}) = \lambda_0 - (\lambda_0 - \lambda_R) \cdot \frac{Q(t_{eff})}{Q_{max}} \quad (2.18)$$

mit

$\lambda(t_{eff})$ Wärmeleitfähigkeit zu einem bestimmten Zeitpunkt

λ_0 Wärmeleitfähigkeit bei Beginn der Hydratation

λ_R theoretischer Endwert der Wärmeleitfähigkeit

Der in der *öbv-RL „Weiße Wannen“* empfohlene Wert der Wärmeleitfähigkeit des Betons λ_c wird für die Vorausberechnung der Temperaturentwicklung mit $2,5 \text{ W}/(\text{m K})$ angegeben. Im Planungsstadium niedriger angesetzte Werte liegen auf der sicheren Seite. [Vgl. *öbv-RL „Weiße Wannen“* (2018); S. 78]

2.6.6 Wärmeübergangsbedingungen an den Grenzen

Wärmeübergangskoeffizient und Wärmeübergangswiderstand

Die äußeren Wärmeübergangsbedingungen können durch die Konvektion und Strahlungsemission und die vorherrschende Windgeschwindigkeit ermittelt werden. Durch den in Gleichung (2.19) nach RIETSCHEL und RAISZ (1964) angegebenen äußeren Wärmeübergangskoeffizienten α_a oder den in Gleichung (2.20) angegebenen Wärmeübergangswiderstand R_a können diese Einflussfaktoren gesammelt ausgedrückt werden: [Vgl. RÖHLING (2012); S. 349] und [Vgl. RÖHLING (2009); S. 80 f.]

$$\alpha_a = 31,5 + 14,7 \cdot v_W \quad (2.19)$$

$$R_a = \frac{1}{\alpha_a} \quad (2.20)$$

mit

α_a	Wärmeübergangskoeffizient
R_a	Wärmeübergangswiderstand
v_W	Windgeschwindigkeit

Die Miteinbeziehung des Strahlungsanteils am Wärmeübergang reduziert die Temperaturspitzen, vergrößert jedoch den Temperaturgradienten am Bauteilrand und somit die Temperaturdifferenz im Bauteilquerschnitt. [Vgl. RÖHLING (2009); S. 83]

Die *öbv-RL „Weiße Wannen“* trägt diesem Umstand Rechnung und gibt für den Wärmeübergangswiderstand R_{ges} Werte in Abhängigkeit der Windgeschwindigkeit nach Abbildung 2.13 an. Nach einer Vergleichsbetrachtung folgen diese Werte den Angaben gemäß KEHLBECK (1975). [Vgl. KEHLBECK (1975) zit. nach HINTZEN (1998); S. 98 – Tafel 6.4]

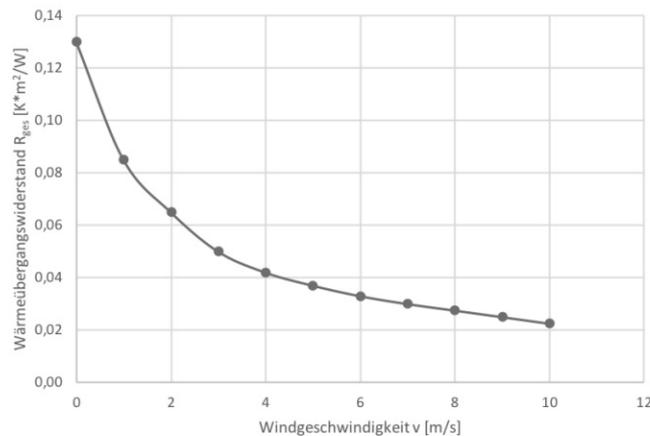


Abbildung 2.13 – Zusammenhang Wärmeübergangswiderstand – Windgeschwindigkeit; Darstellung nach [*öbv-RL „Weiße Wannen“* (2018); S. 79 – Abbildung A.1-1]

Sonnenstrahlungsintensität

Trifft kurzwellige Sonnenstrahlung auf eine Betonoberfläche oder eine Schalung auf, werden Teile davon aufgenommen, der Rest reflektiert. Zur Bestimmung des Temperaturprofils kann der daraus entstehende Wärmegewinn einen nicht zu vernachlässigenden Beitrag leisten. Durch Versuche konnte in HILLER (2001) gezeigt werden, dass sich die Oberflächentemperaturen von jungen Betonplatten in Abhängigkeit der benutzten Abdeckungsmaterialien um bis zu 30 K auf etwa 60 °C durch die solare Strahlung erhöhten. [Vgl. RÖHLING (2009); S. 84]

Zur Einbeziehung der direkten Sonnenbestrahlung ist in der *öbv-RL „Weiße Wannen“* eine Beaufschlagung der Oberfläche mit einem sinusförmigen Wärmefluss im Tagesverlauf in Abhängigkeit von Orientierung und Absorptionsfaktor vorgesehen. Der Wärmefluss schwankt mit einer Periode von 24 h zwischen 0 W/m² als Minimalwert und dem effektiven Tagesmaximalwert $Q_{d,max,eff}$. Dieser wird analog Gleichung (2.21) ermittelt. [Vgl. *öbv-RL „Weiße Wannen“* (2018); S. 79]

$$Q_{d,max,eff} = Q_{solar,max} \cdot A \quad (2.21)$$

mit

$Q_{d,max,eff}$	effektiver Tagesmaximalwert des Wärmeflusses
$Q_{solar,max}$	Maximalwert des Wärmeflusses (900 W/m ² für Platten; 600 W/m ² für Wände)
A	Absorptionsfaktor (30 % für weiße Folien; 95 % für schwarze Folien; 55 % für glatten, grauen Beton)

Wärmedurchgangswiderstand

Der Wärmeübergang an der Bauteiloberfläche wird durch die Schalung oder durch applizierte Dämmungen reduziert. Der Wärmedurchlasswiderstand errechnet sich nach Gleichung (2.22): [Vgl. RÖHLING (2012); S. 349]

$$R_0 = \sum \frac{s_i}{\lambda_i} \quad (2.22)$$

mit

R_0	Wärmedurchlasswiderstand
λ_i	Wärmeleitfähigkeit des betreffenden Materials
s_i	Dicke

Der Wärmeübergangswiderstand zwischen Betonoberfläche und Schalung kann in dieser Beziehung aufgrund der vorhandenen Feuchtigkeit unberücksichtigt bleiben. In Tabelle 2.5 und Tabelle 2.6 werden Werte für die Wärmeleitfähigkeit von Schalhautmaterialien und Dämmstoffen angegeben. [Vgl. RÖHLING (2012); S. 349]

Tabelle 2.5 – Wärmeleitfähigkeit λ für verschiedene Schalhautmaterialien
[Vgl. RÖHLING (2012); S. 350 – Tabelle 3.2]

Werkstoff	λ [kJ/m h K]
Holz (Fichte, Kiefer, Tanne):	
Holzbretter, feucht bis nass	0,65 – 0,80
Holzbretter, natürliche Feuchte	0,50
Holzbretter, getrocknet	0,35 – 0,45
Sperrholz, geschützte Oberfläche	0,40 – 0,45
Schalungsplatten, kunstharzvergütet	0,45
Holzfaserplatten, hart	0,45 – 0,50
Stahl	160
Aluminium	730

Tabelle 2.6 – Wärmeleitfähigkeit λ für verschiedene Dämmstoffe
[Vgl. RÖHLING (2012); S. 350 – Tabelle 3.2]

Dämmstoffe	λ [kJ/m h K]
Mineralische Faserdämmstoffe (wie Holzwole-Leichtbauplatten)	
Plattendicke 15 mm	0,15
Plattendicke > 25 mm	0,09
Polyurethanschaum (PUR) oder Polystyrol-(PS-) Hartschaum	
WLG 025	0,07
WLG 030	0,08
WLG 035	0,10
WLG 040	0,11
Glaswolle	0,20

Die *öbv-RL „Weiße Wannen“* schlägt für Holzschalungen einen Mittelwert der Wärmeleitfähigkeit von 1,5 W/(m K) vor. Dies entspricht in etwa den angegebenen Werten in Tabelle 2.5. [Vgl. *öbv-RL „Weiße Wannen“* (2018); S. 78]

Wärmedurchgangskoeffizient

Durch den Wärmedurchgangskoeffizienten k können die voran genannten Kenngrößen in Gleichung (2.23) zusammengefasst werden. [Vgl. RÖHLING (2009); S. 85] und [Vgl. RÖHLING (2012); S. 350]

$$\frac{1}{k} = R = R_0 + R_a = \frac{1}{\alpha_a} + \sum \frac{s_i}{\lambda_i} \quad (2.23)$$

mit

- k Wärmedurchgangskoeffizient
- R Gesamtwärmedurchlasswiderstand
- α_a Wärmeübergangskoeffizient
- s_i Materialdicken
- λ_i Wärmeleit Zahlen der Materialien

Mit Hilfe des Wärmedurchgangskoeffizienten kann schlussendlich die über die Außenfläche abgegebene Wärmemenge, der Wärmeverlust q_v nach Gleichung (2.24) bestimmt werden. [Vgl. RÖHLING (2009); S. 85]

$$q_v = (T_R - T_L) \cdot k \quad (2.24)$$

mit

- q_v Wärmeverlust
- T_R Temperatur am Bauteilrand
- T_L Lufttemperatur
- k Wärmedurchgangskoeffizient

Werte für den Wärmedurchgangskoeffizienten in Abhängigkeit der Windgeschwindigkeit können Abbildung 2.14 entnommen werden.

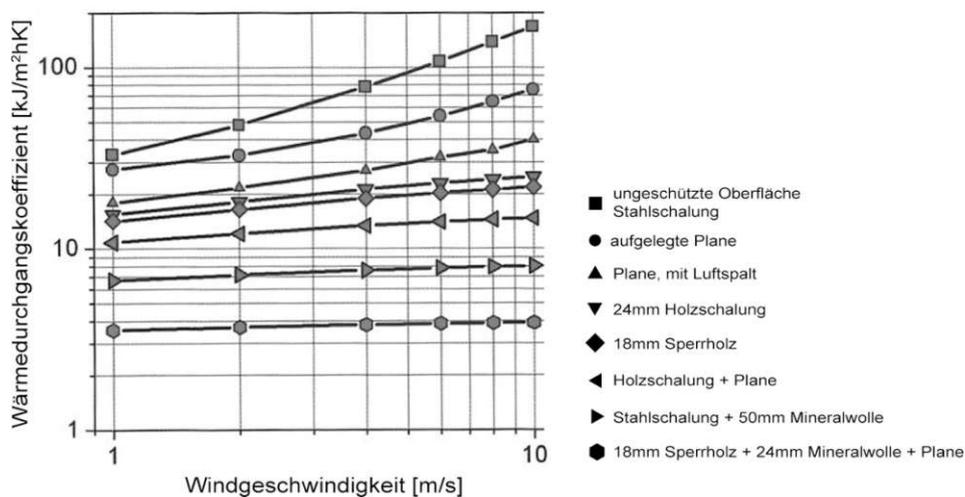


Abbildung 2.14 – Wärmedurchgangskoeffizienten in Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit; Darstellung nach [RÖHLING (2012); S. 351 – Bild 3.3]

Lagern Bauteile auf dem Baugrund auf, kann der Wärmeübergang in den Halbraum durch den Wärmeeindringkoeffizienten b rechnerisch nach Gleichung (2.25) erfasst werden.

$$b = \sqrt{\lambda \cdot c \cdot \rho} \quad (2.25)$$

mit

b	Wärmeeindringkoeffizient
λ	Wärmeleitfähigkeit
c	spezifische Wärmekapazität
ρ	Rohdichte

In obiger Gleichung sind die entsprechenden Werte für Unterbeton oder Boden einzusetzen. Für den Unterbeton können Werte von 6 – 8 kJ/(m h K) angenommen werden. Angaben für den Boden sind stark vom Wassergehalt abhängig und variieren vom Mutterboden mit 1,2 kJ/(m h K) über Kies ohne Grundwasser mit 3,0 kJ/(m h K) bis Kies mit Grundwasser von 6,5 kJ/(m k K). [Vgl. RÖHLING (2012); S. 350]

Die öbv-RL „Weiße Wannen“ gibt für die Wärmeleitfähigkeit des Bodens einen Mittelwert von 2,3 W/(m K) an. Die Abhängigkeit vom Wassergehalt wird jedoch auch hier angeführt. Der Einfluss auf das Temperaturfeld im Beton wird in der Richtlinie als untergeordnet eingestuft. [Vgl. öbv-RL „Weiße Wannen“ (2018); S. 78]

2.6.7 Frischbetontemperatur

Die Wärmefreisetzung in Höhe und Geschwindigkeit sowie die Heranbildung der mechanischen Eigenschaften des Betons sind maßgebend von der Temperatur des Frischbetons zum Zeitpunkt des Erhärtungsbeginns abhängig, wie in Abbildung 2.15 gezeigt. Die vorherrschende Frischbetontemperatur ist vor Einbau abzuschätzen, da vor allem bei sommerlichen Bedingungen die meist vernachlässigten höheren Temperaturen im Anfangsstadium der Erhärtung als Auslöser einer Rissbildung zu betrachten sind. Die maximale Temperatur des Frischbetons wird daher auch in verschiedensten Regelwerken limitiert. [Vgl. RÖHLING (2009); S. 72 f.]

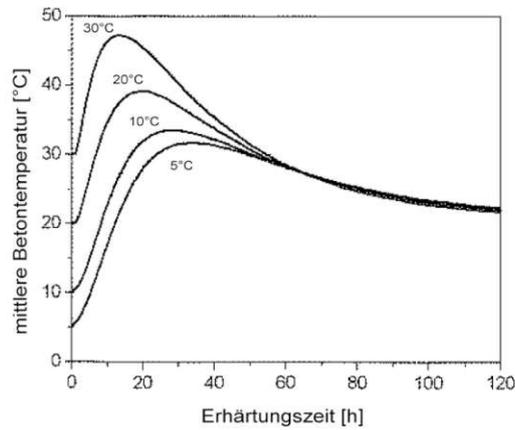


Abbildung 2.15 – Verlauf der mittleren Bauteiltemperatur in Abhängigkeit der Frischbetontemperatur; Darstellung nach [RÖHLING (2009); S. 103 – Bild 4.23f]

Als Folge einer höheren Frischbetontemperatur beschleunigen sich die chemischen Reaktionen, die Hydratationswärme wird schneller freigesetzt und das Temperaturmaximum wird zu einem früheren Zeitpunkt erreicht. Dieser Sachverhalt wird in Abbildung 2.16 graphisch anhand der freigesetzten Wärmerate dargestellt. [Vgl. RÖHLING (2012); S. 46]

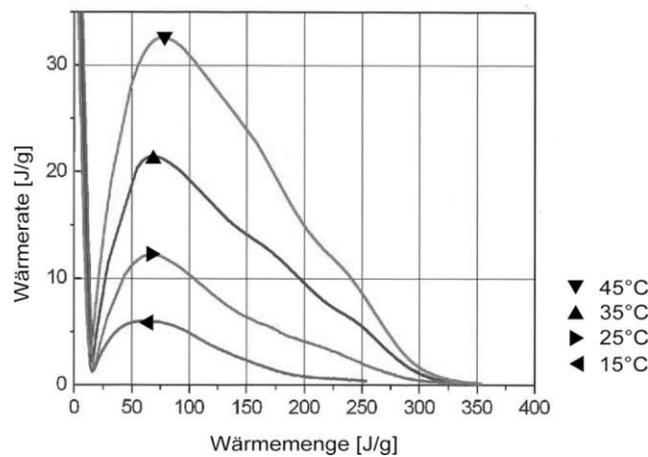


Abbildung 2.16 – Wärmeentwicklungsrate eines CEM I 32,5 R bei verschiedenen isothermen Erhärtungstemperaturen (DCA-Analyse); Darstellung nach [RÖHLING (2012); S. 49 – Bild 1.26]

Berechnung der Frischbetontemperatur

Die Frischbetontemperatur T_{c0} errechnet sich nach den physikalischen Gesetzmäßigkeiten aus der Masse der Betonbestandteile, deren spezifischer Wärmekapazität sowie der vorherrschenden Temperatur der Bestandteile und wird in Gleichung (2.26) dargestellt. [Vgl. RÖHLING (2009); S. 73] und [Vgl. LOHMEYER und EBELING (2018); S.99]

$$T_{c0} = \frac{m_z \cdot c_z \cdot T_z + m_g \cdot c_g \cdot T_g + m_w \cdot c_w \cdot T_w}{m_z \cdot c_z + m_g \cdot c_g + m_w \cdot c_w} \quad (2.26)$$

mit

T_{c0}	Frischbetontemperatur
m_z, m_g, m_w	Massenanteile der Komponenten Zement, Gesteinskörnung und Wassers
c_z, c_g, c_w	Spezifische Wärmekapazität der Komponenten
T_z, T_g, T_w	Ausgangstemperatur der Komponenten

In ÖNORM EN 206 findet sich zur Frischbetontemperatur nur eine untere Schranke zu dieser. Die Temperatur des Frischbetons darf dabei zum Zeitpunkt der Lieferung nicht unter 5 °C liegen. [Vgl. ÖNORM EN 206 (2017); S. 36]

Die ÖNORM B 4710-1 konkretisiert diese Angaben weiter. Liegt die Lufttemperatur an der Einbaustelle unter 3 °C, muss der Beton eine Mindesttemperatur von 10 °C aufweisen. Die maximale Frischbetontemperatur darf im Allgemeinen und in Abhängigkeit der Wärmeentwicklungsklasse die Werte 22 °C (WE1) bzw. 27 °C (WE2) nicht überschreiten. [Vgl. ÖNORM B 4710-1 (2018); S. 53]

Die *öbv-RL „Weiße Wannen“* bezieht sich in mehreren Absätzen auf den großen Einfluss der Frischbetontemperatur in Hinblick auf die Rissgefahr. Empfohlen werden Frischbetontemperaturen um 15 °C. Ab 22 °C steigt die Rissgefahr bereits, Frischbetontemperaturen über 27 °C sind hingegen zu vermeiden, da sie im Allgemeinen negative Folgen für die Verarbeitbarkeit, die Rissgefahr und die Betongüte zur Folge haben. Die in dieser Richtlinie erlaubten Grenzwerte in Abhängigkeit der Konstruktionsklasse, des Betonstandards sowie des jeweiligen Bemessungsmodelles sind in Tabelle 1.3 angeführt. [Vgl. *öbv-RL „Weiße Wannen“* (2018); S. 35]

In diesem Zusammenhang ist auch auf die Temperaturänderung des Frischbetons bei Anlieferung vom Werk auf die Baustelle und beim Fördern zur Einbaustelle hinzuweisen. Dies hat zur Folge das zur Einhaltung der maximal zulässigen Frischbetontemperaturen am Einbauort Vorhaltemaße bei der Betonherstellung im Werk angesetzt werden müssen. An heißen Tagen (> 28 °C) werden die Werte in Tabelle 2.7 empfohlen. [Vgl. STUMMVOLL und TRENKWALDER (2000); S. 349]

Tabelle 2.7 – Vorhaltemaße bei der Betonherstellung
[Vgl. STUMMVOLL und TRENKWALDER (2000); S. 349]

Betontransport im Fahrmischer (1 Stunde)	+ 2 K
Betonpumpe – in Abhängigkeit von Leitungslänge und Förderleistung	+ 1 K bis + 2 K
Vorhaltemaß zur zielsicheren Einhaltung der max. Frischbetontemperatur	+ 1 K

2.6.8 Lufttemperatur

Die Erhöhung der Lufttemperatur wirkt sich stark auf den Temperaturhaushalt aus, da durch die Zunahme eine Annäherung an einen adiabatischen Temperaturverlauf im Bauteil, wie in Abbildung 2.17 dargestellt, herbeigeführt wird. [Vgl. RÖHLING (2009); S. 102] und [Vgl. RÖHLING (2012); S. 360]

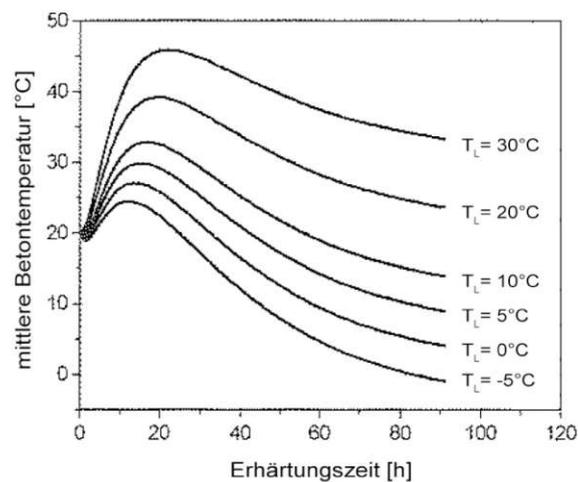


Abbildung 2.17 – Verlauf der mittleren Bauteiltemperatur in Abhängigkeit der Lufttemperatur;
Darstellung nach [RÖHLING (2009); S. 103 – Bild 4.23g]

Werden Modellrechnungen durchgeführt, können meteorologisch gesicherte Daten zum Tagesgang der mittleren Stundenwerte der Lufttemperatur herangezogen werden. Die maximalen Differenzen zwischen Tag und Nachttemperatur, die Werte von etwa 20 – 25 K erreichen können, treten dabei nach PIEHL *et al.* (1980) im Mai und Oktober analog Abbildung 2.18 auf. [Vgl. RÖHLING (2009); S. 77]

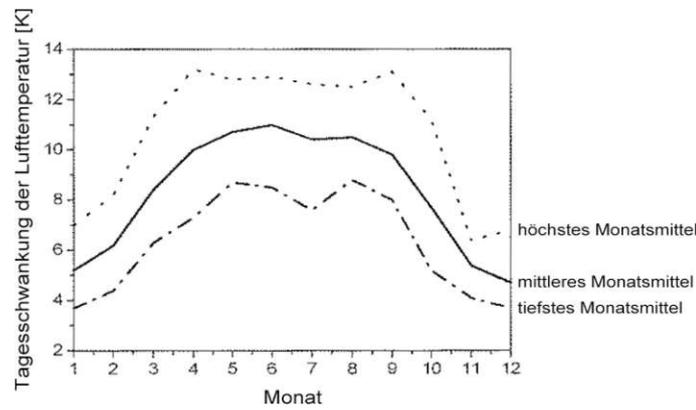


Abbildung 2.18 – Mittelwerte der Tagesschwankungen der Lufttemperatur; Darstellung nach [PIEHL *et al.* (1980) zit. nach RÖHLING (2009); S. 77 – Bild 4.6]

Sollen schwankende Außenlufttemperaturen in der Modellierung berücksichtigt werden, können diese vereinfacht durch eine periodische Schwankung zwischen mittlerer maximaler und mittlerer minimaler Tagestemperatur nach Gleichung (2.27) berücksichtigt werden, wobei das Argument der Winkelfunktionen als Bogenmaß einzusetzen ist. [Vgl. RÖHLING (2009); S. 78]

$$T_L(t) = T_L - \frac{T_E}{2} \cdot \cos\left(\frac{\pi \cdot t}{12}\right) \tag{ 2.27 }$$

mit

$T_L(t)$ Außenlufttemperatur

T_E Temperaturamplitude

$$T_E = T_{L,T} - T_{L,N}$$

$T_{L,T}, T_{L,N}$ Höchste Tages- bzw. niedrigste Nachttemperatur

T_L Tagesmitteltemperatur

$$T_L = \frac{1}{2} \cdot (T_{L,T} + T_{L,N})$$

Gemäß der Gleichung (2.27) wird die Höchsttemperatur formelbedingt um 12 Uhr erreicht. Der sich in der Praxis einstellende Temperaturverlauf liefert jedoch um etwa 5 Uhr die niedrigsten und um etwa 15 Uhr die höchsten Außenlufttemperaturen. Eine Anpassung dieses Sachverhaltes ist ohne größeren Aufwand möglich. Wie in Abbildung 2.19 gezeigt, bestimmt die Außenlufttemperatur stark abgeschwächt und zeitlich etwas verschoben den Temperaturverlauf der oberflächennahen Bereiche des Betonbauteiles, wenn dieser eingeschalt ist. Ausschließlich der ungeschützte, direkte Bauteilrand folgt dem Verlauf der Lufttemperatur. [Vgl. RÖHLING (2009); S. 78]

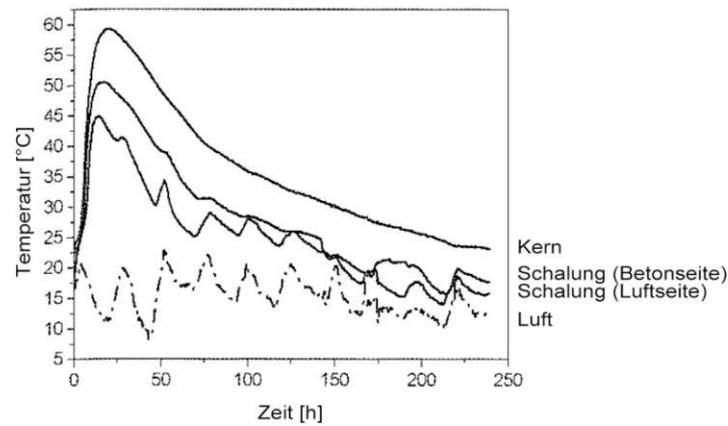


Abbildung 2.19 – Gemessener Verlauf der Luft- und Bauteiltemperatur in einem massigen Betonbauteil von 2,0 m Dicke; Darstellung nach [RÖHLING (2009); S. 79 – Bild 4.7]

Die *öbv-RL „Weiße Wannen“* weist noch auf einen zusätzlichen Effekt der Lufttemperatur hin. Insbesondere bei langen Auskühlungsprozessen bei sehr dicken Bauteilen muss die Änderung der mittleren Tagestemperaturen mitberücksichtigt werden. Im Regelfall sollte jedoch die Unterscheidung „Sommer“ und „Winter“ als Temperaturszenario ausreichend sein. [Vgl. *öbv-RL „Weiße Wannen“* (2018); S. 85]

2.6.9 Künstliche Kühlungsmaßnahmen

Die Gefahr des Überschreitens der zulässigen Frischbetontemperaturen ist vor allem im Sommer gegeben. Ohne künstliche Kühlmaßnahmen liegen diese in der heißen Jahreszeit in der Regel zwischen 25 °C bis 32 °C. Um dennoch die normgemäßen Temperaturen im Frischbeton einhalten zu können, sind nachfolgende Maßnahmen zielführend. [Vgl. STUMMVOLL und TRENKWALDER (2000); S. 349]

Kühlung der Betonausgangsstoffe

Ist eine Reduzierung der Frischbetontemperatur durch Kühlung der Betonausgangsstoffe beabsichtigt, kommen nur die Einflussnahme auf die Temperatur der Gesteinskörnung und des Anmachwassers aus technischer und wirtschaftlicher Hinsicht in Frage. [Vgl. RÖHLING (2009); S. 73]

Werden die Betonausgangsstoffe, getrennt betrachtet, um 10 K abgekühlt, so kann unter Einbeziehung der Gleichung (2.26) bei üblichen Betonrezepturen die Frischbetontemperatur um 7 – 9 K bei Kühlung der Zuschläge gesenkt werden. Werden die Ausgangstemperaturen des Bindemittels oder des Zugabewassers um 10 K abgesenkt, hat dies eine Senkung der Frischbetontemperatur von etwa 1 – 2 K zur Folge. Die Zuschlagskühlung durch Berieselung mit kühlem Grundwasser oder die Verwendung kühler Zuschläge ist demnach die einfachste Methode der Frischbetontemperaturbeeinflussung. [Vgl. STUMMVOLL und TRENKWALDER (2000); S. 349]

Kühlung des Frischbetons durch Zugabe von Scherbeneis

Durch Ersatz eines Teiles des Zugabewassers durch Scherbeneis kann die Frischbetontemperatur signifikant reduziert werden. Die mögliche Absenkung beträgt hier in Abhängigkeit der maximalen Menge an Zugabewasser etwa 12 – 18 K. [Vgl. STUMMVOLL und TRENKWALDER (2000); S. 350]

Kühlung des Frischbetons mit flüssigem Stickstoff

Eine Kühlung des Frischbetons mit flüssigem Stickstoff erfolgt im Fahrnischer. Die größtmögliche Absenkung der Frischbetontemperatur liegt bei dieser Methode bei etwa 10 K. Die Stickstoffkühlung ist eher für seltenen Einsatz und kleine Betonkubaturen geeignet. [Vgl. STUMMVOLL und TRENKWALDER (2000); S. 350 f.]

2.7 Festigkeitseigenschaften des erhärtenden Betons

Die im Hydratationsprozess entstehende Beanspruchung des Betons muss von diesem zu einem Zeitpunkt aufgenommen werden, in dem sich die mechanischen Eigenschaften erst bilden. Eine hinreichend genaue Berechnung der Zwangsschnittgrößen kann daher nur bei Kenntnis der zeitlichen Entwicklung dieser Eigenschaften erfolgen.

Die Bestimmung der Kenngrößen des erhärtenden Betons ist mit voneinander abweichendem Schwierigkeitsgrad zu bewerkstelligen. Aus der relativ einfachen Bestimmung der Druckfestigkeit können auf Grundlage dieser die weiteren Festigkeitsparameter wie Zugfestigkeit und Elastizitätsmodul abgeleitet werden. Der junge Beton wird dadurch charakterisiert, dass sich diese drei Kenngrößen nicht synchron zueinander entwickeln, wie in Abbildung 2.20 gezeigt wird. [Vgl. RÖHLING (2009); S. 131]

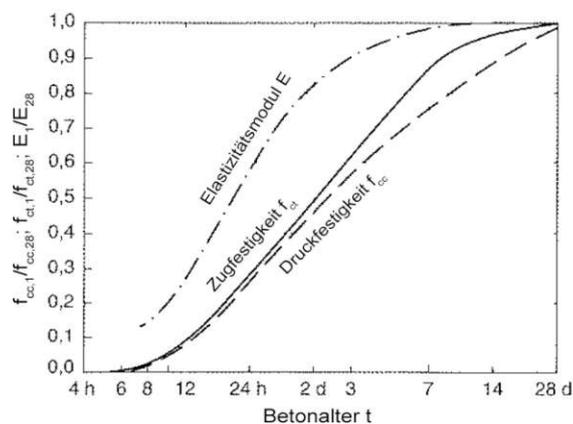


Abbildung 2.20 – Zeitliche Entwicklung von Druck- und Zugfestigkeit sowie Elastizitätsmodul bei Normalbeton nach WEIGLER und KARL (1974); Darstellung nach [RÖHLING (2009); S. 132 – Bild 5.1]

Die mathematische Beschreibung der Entwicklung der Festigkeitseigenschaften kann durch unterschiedliche Modelle bewerkstelligt werden. Neben den normativen Regelungen in der ÖNORM EN 1992-1-1:2015 wird nachstehend das Modell nach WESCHE (1993) gemäß den

Anmerkungen in MFZ (2004) erläutert. Dieser Ansatz stellt den Bezug auf das effektive Betonalter her und gewährleistet somit die Synchronisation von Wärmefreisetzung und Festigkeitsentwicklung. [Vgl. SCHLICKE (2014); S. 15] und [WESCHE (1993); S. 218 f.]

2.7.1 Zeitliche Entwicklung der Betondruckfestigkeit

Gesicherte Daten über die Druckfestigkeit des Betons zu einem bestimmten Prüftermin sind aufgrund der normativen Festlegungen infolge der Konformitätskontrollen für alle Betonzusammensetzungen vorhanden. Angaben zur Festigkeitsentwicklung sind hingegen nur eingeschränkt vorhanden, außer diese werden im Zuge von Bauvorhaben explizit gefordert.

Zur Abschätzung des Festigkeitsverlaufes können die Richtwerte in Tabelle 2.8 herangezogen werden. Diese Informationen sind jedoch nicht dazu geeignet, vorhandene Versuchsdaten zu verdichten und eine Regressionsanalyse zur Festlegung von Funktionsparametern daraus ableiten zu können. [Vgl. RÖHLING (2012); S. 255]

Tabelle 2.8 – Richtwerte für die Druckfestigkeitsentwicklung von Beton aus verschiedenen Zementen bei einer ständigen Lagerung bei 20 °C nach WISCHERS *et al.* (1984)
[Vgl. RÖHLING (2012); S. 255 – Tabelle 2.8]

Zementfestigkeitsklasse	Festigkeit in % der 28 Tage-Druckfestigkeit nach				
	3 Tage	7 Tage	28 Tage	90 Tage	180 Tage
(CEM 22,5)	20 ... 30	40 ... 55	100	115 ... 140	130 ... 160
CEM 32,5 N	30 ... 40	50 ... 65	100	110 ... 125	115 ... 130
CEM 32,5 R; CEM 42,5 N	50 ... 60	65 ... 80	100	105 ... 115	110 ... 120
CEM 42,5 R; CEM 52,5 N und R	70 ... 80	80 ... 90	100	100 ... 105	105 ... 110

In der Arbeit von SCHLICKE (2014) wird die zeitliche Entwicklung von Druck- und Zugfestigkeit sowie des Elastizitätsmoduls nach dem Modell von WESCHE (1993) mithilfe eines Zeitbeiwertes f_{β} nach Gleichung (2.28) beschrieben. Dies ermöglicht eine geschlossene Formulierung der genannten Eigenschaften. [Vgl. SCHLICKE (2014); S. 17]

$$f_{\beta}(t_{eff}) = \exp\{-a \cdot w/b \cdot [t_{eff}^{-b} - 28^{-b}]\} \quad (2.28)$$

mit

w/b Wasser-Bindemittel-Wert der Betonrezeptur

a, b Beiwerte zur Festigkeitsentwicklung

t_{eff} effektives Betonalter in Tagen

Dabei können die freien Parameter a und b in der obigen Gleichung mithilfe der Angaben in WESCHE (1993) in Abhängigkeit der Zementfestigkeitsklasse besetzt werden. Sind Messwerte

aus Versuchen vorhanden, können die Beiwerte auch zur Anpassung der Gleichung (2.29) für die Druckfestigkeitsentwicklung Verwendung finden. [Vgl. SCHLICKE (2014); S. 18]

$$f_c(t_{eff}) = f_{c,28} \cdot f_\beta(t_{eff}) \quad (2.29)$$

mit

$f_{c,28}$ jeweilige Druckfestigkeit nach 28 Tagen

Laut ÖNORM EN 1992-1-1:2015 kann die Entwicklung der Betondruckfestigkeit bei einer mittleren Temperatur von 20 °C und einer Lagerung nach ÖNORM EN 12390-2²² aus den Gleichungen (2.30) und (2.31) ermittelt werden. Für genauere Werte in einem Betonalter unter drei Tagen sollten jedoch Versuche durchgeführt werden. [Vgl. ÖNORM EN 1992-1-1:2015 (2015); S. 27]

$$f_{cm}(t) = \beta_{cc}(t) \cdot f_{cm} \quad (2.30)$$

$$\beta_{cc}(t) = \exp \left\{ s \cdot \left[1 - \left(\frac{28}{t} \right)^{1/2} \right] \right\} \quad (2.31)$$

mit

$f_{cm}(t)$ mittlere Betondruckfestigkeit für ein Alter von t Tagen

f_{cm} mittlere Betondruckfestigkeit nach 28 Tagen

$\beta_{cc}(t)$ vom Alter des Betons t abhängiger Beiwert

t Alter des Betons in Tagen

s vom verwendeten Zementtyp abhängiger Beiwert

- $s = 0,20$ für Zemente der Festigkeitsklassen CEM 42,5 R, CEM 52,5 N und CEM 52,5 R (Klasse R)
- $s = 0,25$ für Zemente der Festigkeitsklassen CEM 32,5 R, CEM 42,5 N (Klasse N)
- $s = 0,38$ für Zemente der Festigkeitsklassen CEM 32,5 N (Klasse S)

²² ÖNORM EN 12390-2:2017 10 01: Prüfung von Festbeton – Teil 2: Herstellung und Lagerung von Probekörpern für Festigkeitsprüfungen

2.7.2 Zeitliche Entwicklung der Betonzugfestigkeit

Die Betonzugfestigkeit und zugehörige temporäre Entwicklung dieser sind Grundlage für die Abschätzung einer möglichen Rissgefährdung, Bestimmung der Risslast und der Mindestbewehrung oder auch der Berechnung der zu erwartenden rechnerischen Rissbreite. [Vgl. RÖHLING und MEICHSNER (2018); S. 88]

Abhängig von Zementfestigkeitsklasse und Wasserbindemittelwert beträgt die Zugfestigkeit des Betons nur etwa 10 % der zugehörigen Druckfestigkeit. Aus Versuchen können dabei die zentrische Zugfestigkeit, die Biegezugfestigkeit sowie die Spaltzugfestigkeit bestimmt werden. Die Rissempfindlichkeit wird überwiegend durch die zentrische Zugfestigkeit zum Zeitpunkt der maßgebenden Zugbeanspruchung bestimmt. Da die experimentelle Bestimmung der zentrischen Betonzugfestigkeit aufwendig und dennoch fehleranfällig ist, wird diese meist über Beziehungen durch die Spaltzugfestigkeit oder die Biegezugfestigkeit ermittelt. [Vgl. LOHMEYER und EBELING (2018); S. 91]

Es ist jedoch anzumerken, dass ausschließlich die zentrische Zugfestigkeit eine tatsächliche Materialkenngröße darstellt. Bei Spalt- und Biegezugfestigkeit hingegen beeinflusst das Bauteilverhalten die ermittelten Werte im Versuch. Die Biegezugfestigkeit nimmt etwa mit zunehmender Bauteildicke ab. Die ÖNORM EN 1992-1-1:2015 berücksichtigt bei der Ermittlung der Biegezugfestigkeit diesen Umstand. [Vgl. KÖNIG und TUE (1996); S. 11]

Der in ÖNORM EN 1992-1-1:2015 angeführte Zusammenhang zwischen zentrischer Zugfestigkeit und Spaltzugfestigkeit ist in Gleichung (2.32) angeführt. [Vgl. ÖNORM EN 1992-1-1:2015 (2015); S. 28]

$$f_{ct} = 0,9 \cdot f_{ct,sp} \quad (2.32)$$

mit

f_{ct} zentrische Zugfestigkeit

$f_{ct,sp}$ Spaltzugfestigkeit

Nach BONZEL (1988) sowie WESCHE (1993) wird das Verhältnis von Spaltzugfestigkeit oder Biegezugfestigkeit zur zentrischen Zugfestigkeit maßgebend durch die Zusammensetzung und die Erhärtungsbedingungen des Betons beeinflusst. Daraus resultiert eine erhebliche Streuung der Verhältnismerte. Aus diesem Beweggrund heraus kann anstelle dieser Beziehungen der nach Auswertungen in BYFORS (1980) erwiesene Zusammenhang zwischen Druck- und Zugfestigkeit analog Abbildung 2.21 verwendet werden. [Vgl. RÖHLING (2009); S. 138]

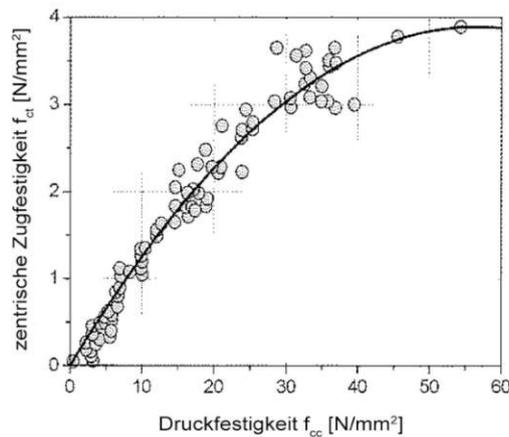


Abbildung 2.21 – Zusammenhang zwischen Druckfestigkeit und zentrischer Zugfestigkeit nach BYFORS; Darstellung nach [BYFORS (1980) zit. nach RÖHLING (2009); S. 138 – Bild 5.5]

Nach SCHLICKE (2014) kann die zeitliche Entwicklung der Zugfestigkeit analog der Bestimmung der zeitabhängigen Betondruckfestigkeitsentwicklung mit Hilfe des Zeitbeiwerts f_β nach Gleichung (2.33) erfolgen. [Vgl. SCHLICKE (2014); S. 18]

$$f_{ctm}(t_{eff}) = f_{ctm} \cdot [f_\beta(t_{eff})]^{2/3} \quad (2.33)$$

mit

f_{ctm} mittlere Zugfestigkeit nach 28 Tagen

Zum Vergleich kann die normgemäße zeitabhängige Zugfestigkeitsentwicklung in Gleichung (2.34) unter Einbeziehung des Zusammenhangs von Druck- und Zugfestigkeit bezogen auf das effektive Betonalter nach ÖNORM EN 1992-1-1:2015 dargestellt werden. [Vgl. SCHLICKE (2014); S. 19]

$$f_{ctm}(t_{eff}) = 0,3 \cdot (f_{cm} - 8)^{2/3} \cdot [\beta_{cc}(t_{eff})]^\alpha \quad (2.34)$$

mit

f_{cm} mittlere Betondruckfestigkeit nach 28 Tagen

$\beta_{cc}(t_{eff})$ Zeitbeiwert der Druckfestigkeitsentwicklung

$$\beta_{cc}(t_{eff}) = f_c(t_{eff})/f_{c,28}$$

α Exponent, $\alpha = 1$ für $t_{eff} < 28 d$ und $\alpha = 2/3$ für $t_{eff} \geq 28 d$

Das in SCHLICKE (2014) verwendete Materialmodell liefert nach Anpassung der freien Parameter eine gute Übereinstimmung mit den experimentell ermittelten Werten. Hingegen weicht die normgemäße Entwicklung der Zugfestigkeit vor allem im sehr frühen Betonalter von den Messwerten ab. Infolge dessen würde die Zwangsbeanspruchung falsch eingeschätzt werden. Es

ist daher empfehlenswert bei Untersuchungen zur Rissgefährdung immer die Festigkeitsentwicklung auf Basis von Messwerten zu bestimmen. Um Aussagen über die Rissgefahr tätigen zu können ist weiters der normgemäße 5 %-Fraktilwert der Zugfestigkeit nach Gleichung (2.35) von Interesse. [Vgl. SCHLICKE (2014); S. 19 f.]

$$f_{ctk,0.05}(t_{eff}) = 0,7 \cdot f_{ctm}(t_{eff}) \quad (2.35)$$

mit

$f_{ctk,0.05}(t_{eff})$ 5 %-Fraktilwert der Zugfestigkeit in Abhängigkeit des effektiven Betonalters

$f_{ctm}(t_{eff})$ mittlere Betonzugfestigkeit in Abhängigkeit des effektiven Betonalters

2.7.3 Elastizitätsmodul

Eine Kenngröße für das elastische Formänderungsverhalten bei Druck- oder Zugbeanspruchung ist der Elastizitätsmodul des Betons. Er liefert die Beziehung der wirkenden Spannung σ_c zur zugehörigen elastischen Verformung $\varepsilon_{c,el}$ für den einachsigen Spannungszustand nach Gleichung (2.36). [Vgl. LOHMEYER und EBELING (2018); S. 96]

$$E_c = \frac{\sigma_c}{\varepsilon_{c,el}} \quad (2.36)$$

mit

E_c Elastizitätsmodul

σ_c Spannung

$\varepsilon_{c,el}$ elastische Formänderung

Im Bereich der Gebrauchsspannungen weichen die Werte, für den unter Zug- oder Druckbelastung ermittelten Elastizitätsmodul, nur geringfügig voneinander ab. Maßgebend für die Ermittlung des Elastizitätsmoduls ist der lineare Bereich der Spannungs-Dehnungs-Linie, aus dem der Sekanten- oder Tangentenmodul abgeleitet wird. Normgemäß wird der mittlere Elastizitätsmodul E_{cm} als Sekante bei $\sigma_c \approx 0,4 \cdot f_{cm}$ ermittelt. Der Tangentenmodul E_{c0} hingegen gibt die Neigung der Spannungs-Dehnungs-Linie im Koordinatenursprung wieder. [Vgl. RÖHLING (2012); S. 274]

Er kann nach ÖNORM EN 1992-1-1:2015 aus dem Sekantenmodul hinreichend genau nach Gleichung (2.37) berechnet werden. [Vgl. ÖNORM EN 1992-1-1:2015 (2015); S. 30]

$$E_{c0} = 1,05 \cdot E_{cm} \quad (2.37)$$

mit

E_{c0} Tangentenmodul

E_{cm} statischer Elastizitätsmodul bzw. Sekantenmodul

Die zeitliche Entwicklung des Elastizitätsmoduls während der Erhärtung schreitet im Verhältnis zur Druck- und Zugfestigkeitsentwicklung rascher voran. Nach einem steilen Anstieg in der Anfangsphase der Erhärtung sind die Steifigkeitseigenschaften von jungem und erhärtetem Beton bereits mit einsetzender Abkühlung als Folge der abfließenden Hydratationswärme annähernd gleich. Der Deutsche Ausschuss für Stahlbetonbau gibt diesbezüglich in *DAfStb*-Heft 555 (2006) nachfolgende Werte an: [Vgl. RÖHLING und MEICHSNER (2018); S. 107 f.]

- $E_c(1d) \geq 0,65 \cdot E_c(28d)$
- $E_c(2d) \geq 0,80 \cdot E_c(28d)$
- $E_c(7d) \geq 0,90 \cdot E_c(28d)$

Verschiedenste Untersuchungsergebnisse zeigen, dass ein Zusammenhang zwischen Festigkeitskenngrößen und dem Elastizitätsmodul unabhängig vom Erhärtungszeitpunkt besteht. Es wird daher vorerst der Elastizitätsmodul nach 28 Tagen bestimmt und unter Einbeziehung der Druckfestigkeitsentwicklung die zeitliche Entwicklung des Elastizitätsmoduls daraus abgeleitet. [Vgl. RÖHLING und MEICHSNER (2018); S. 107 f.]

In SCHLICKE (2014) wird dabei für das vorliegende Materialmodell ein Zusammenhang nach Gleichung (2.38) verwendet.

$$E_{cm}(t_{eff}) = E_{cm} \cdot [f_{\beta}(t_{eff})]^{1/3} \quad (2.38)$$

mit

E_{cm} mittlere Elastizitätsmodul nach 28 Tagen

Zum Vergleich kann die normgemäße zeitabhängige Entwicklung des Elastizitätsmoduls in Gleichung (2.39) unter Einbeziehung des Zusammenhangs von Druckfestigkeit und Elastizitätsmodul bezogen auf das effektive Betonalter nach ÖNORM EN 1992-1-1:2015 dargestellt werden. [Vgl. SCHLICKE (2014); S. 18 f.]

$$E_{cm}(t_{eff}) = 22 \cdot \left[\frac{f_{cm} \cdot \beta_{cc}(t_{eff})}{10} \right]^{0,3} \quad (2.39)$$

mit

f_{cm} mittlere Betondruckfestigkeit nach 28 Tagen

$\beta_{cc}(t_{eff})$ Zeitbeiwert der Druckfestigkeitsentwicklung

mit $\beta_{cc}(t_{eff}) = f_c(t_{eff})/f_{c,28}$

2.7.4 Querdehnungsverhalten

Das Querdehnungsverhalten wird von den Eigenschaften des Zementsteins und des Zuschlages sowie deren Massenanteilen im Beton bestimmt. Die Querdehnungszahl ν kann in Abhängigkeit des Wasser-Bindemittel-Wertes für den Zementstein mit 0,24 – 0,28 angegeben werden. Die Werte für den Zuschlag werden zwischen 0,10 – 0,30 in der Literatur beschrieben. [Vgl. RÖHLING und MEICHSNER (2018); S. 111]

Nach ÖNORM EN 1992-1-1:2015 kann für Berechnungen im ungerissenen Zustand mit einem konstanten Wert für den Beton von $\nu_c = 0,20$ gerechnet werden. [Vgl. ÖNORM EN 1992-1-1:2015 (2015); S. 30]

2.7.5 Temperatureausdehnungskoeffizient

Der proportionale Zusammenhang zwischen einer Temperaturdifferenz ΔT und daraus resultierender Verformung ε_T wird über die Temperaturdehnzahl α_T nach Gleichung (2.40) beschrieben. [Vgl. RÖHLING und MEICHSNER (2018); S. 65]

$$\varepsilon_T = \alpha_T \cdot \Delta T \quad (2.40)$$

Die Temperaturdehnzahl des Betons ist abhängig von dessen Zusammensetzung und der Feuchte. Vor allem in der sehr frühen Phase der Erhärtung unterliegt diese starken Schwankungen. Veränderungen der Temperaturdehnzahl werden jedoch bis zum Beginn der Festigkeitsentwicklung abgeschlossen und haben somit keine Auswirkung auf die entstehenden Zwangsspannungen.

Festbeton weist Temperaturdehnzahlen in Abhängigkeit der verwendeten Gesteinskörnung von $6,0 \cdot 10^{-6}/K$ für dichten Kalkstein oder $13,0 \cdot 10^{-6}/K$ bei Verwendung von quarzitären Gestein auf. Der Zementstein hingegen besitzt mit $20,0 \cdot 10^{-6}/K$ eine verhältnismäßig hohe Temperaturdehnzahl. Daraus resultiert bei Betonen mit hohem Zementsteingehalt auch eine größere Temperaturdehnzahl. [Vgl. RÖHLING und MEICHSNER (2018); S. 66]

Nach ÖNORM EN 1992-1-1:2015 kann für die Wärmedehnzahl von Beton ein Wert von $10,0 \cdot 10^{-6}/K$ angenommen werden. [Vgl. ÖNORM EN 1992-1-1:2015 (2015); S. 30]

Liegen keine experimentell ermittelten Werte vor, wird dieser Wert oft auch für die Spannungsberechnung im erhärtenden Beton angewendet. Dies birgt jedoch die Gefahr, dass die temperaturbedingten Verformungen des Betons wesentlich über- oder unterschätzt werden. [Vgl. RÖHLING und MEICHSNER (2018); S. 66]

Die öbv-RL „Weiße Wannan“ gibt für die Vorbemessung den in der Norm beschriebenen Wert an. Jedoch ist für die endgültige Dimensionierung ein aus Versuchen ermittelter Wert heranzuziehen. [Vgl. öbv-RL „Weiße Wannan“ (2018); S. 8]

2.7.6 Zugbruchdehnung des Betons

Die Zugbruchdehnung des Betons stellt das Dehnvermögen bei maximaler Last im Kurzzeitversuch dar und wird der Zugfestigkeit in der Spannungs-Dehnungs-Linie zugeordnet. Festbeton weist dabei Werte im Bereich von $0,08 - 0,15 \text{ mm/m}$ auf. Einflussfaktoren auf die Dehnfähigkeit sind, neben den zuvor für Zugfestigkeit und Elastizitätsmodul genannten Größen, vor allem die Art, Form und Größe der verwendeten Gesteinskörnung.

Nach einem starken Abfall der Zugbruchdehnung in der anfänglichen Erstarrungsphase wird das Minimum von etwa $40 - 70 \mu\text{m/m}$ zeitlich übereinstimmend mit dem Wendepunkt in der Entwicklungskurve der Zugfestigkeit erreicht. Die Rissgefahr in diesem Zeitintervall von circa 8 bis 12 h ist dabei aufgrund der noch geringen Zugfestigkeit im Verhältnis zum bereits weiter ausgebildeten Elastizitätsmodul hoch. Im Zuge der fortschreitenden Hydratation strebt die Zugbruchdehnung anschließend konstant den angegebenen Werten, wie in Abbildung 2.22 dargestellt, für Festbeton entgegen. [Vgl. RÖHLING und MEICHSNER (2018); S. 108 f.]

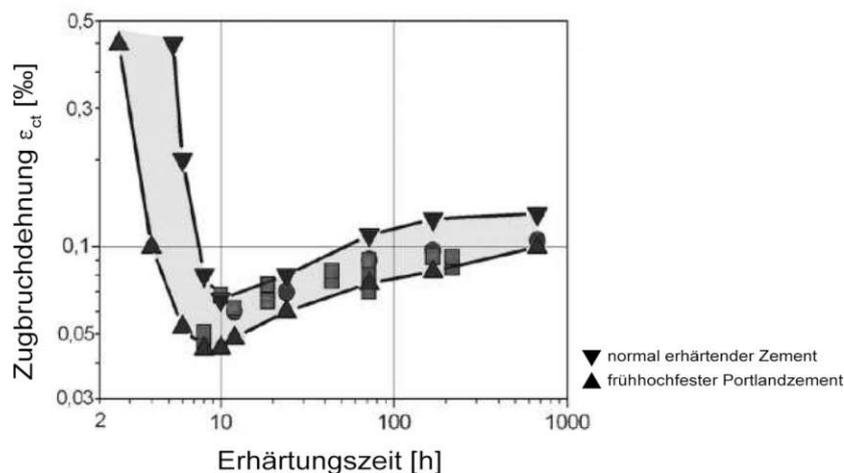


Abbildung 2.22 – Entwicklung der Betonzugbruchdehnung in Abhängigkeit von der Erhärtungszeit; Darstellung nach [RÖHLING und MEICHSNER (2018); S. 109 – Bild 5.25]

Angaben zur Zugbruchdehnung fehlen in den normativen Regelwerken und müssen somit aus experimentellen Untersuchungen in Abhängigkeit der Zugfestigkeit und des Elastizitätsmoduls

hergeleitet werden. In umfassenden Auswertungen nach TASDEMIR *et al.* (1996) und Untersuchungen in BROOKS *et al.* (1987) konnte ein Zusammenhang zwischen dem Verhältnis f_{ctm}/E_{cm} und der in Versuchen ermittelten Bruchdehnung nachgewiesen werden. Diese Korrelation kann mit Hilfe der Abbildung 2.23 grafisch dargestellt werden. Die darin enthaltene Ausgleichsgerade wird dabei anhand Gleichung (2.41) mathematisch beschrieben. Unter Einbeziehung der zeitlichen Entwicklung von Zugfestigkeit und Elastizitätsmodul kann diese Gleichung auch für die zeitabhängige Zugbruchdehnung erweitert werden. [Vgl. RÖHLING und MEICHSNER (2018); S. 109]

$$\varepsilon_{ctu} = \frac{f_{ctm}}{E_{ctm}} \cdot 10^3 \quad (2.41)$$

mit

ε_{ctm}	Zugbruchdehnung
f_{ctm}	Zugfestigkeit
E_{ctm}	Elastizitätsmodul

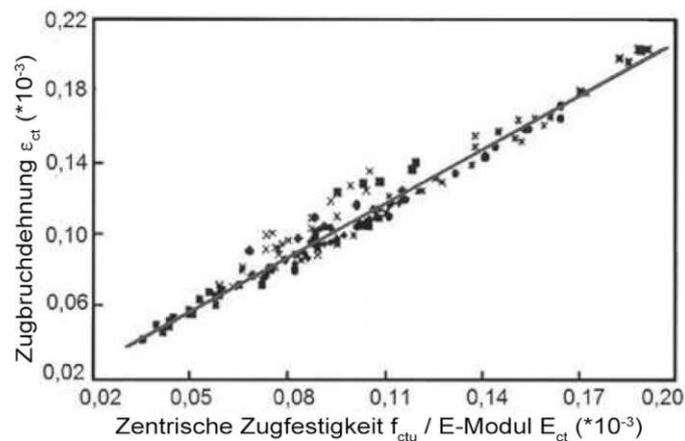


Abbildung 2.23 – Beziehung zwischen der Zugbruchdehnung und dem Verhältnis Zugfestigkeit/Elastizitätsmodul nach TASDEMIR *et al.* (1996); Darstellung nach [RÖHLING und MEICHSNER (2018); S. 111 – Bild 5.29]

SCHLICKE (2014) geht in seinen Untersuchungen, auf der sicheren Seite liegend, etwa von einer linear-elastischen Zugbruchdehnung aus, die von einem Bereich von 0,01 ‰ bei Erstarrungsbeginn bis 0,10 ‰ bei Erreichen der 28-Tage Zugfestigkeit verläuft. [Vgl. SCHLICKE (2014); S. 20]

2.8 Schwinden des Betons

Zwangsbeanspruchungen werden im Beton nicht nur durch thermische Verformungseinwirkungen hervorgerufen, sondern auch durch Schwindverformungen, die sich im Wesentlichen aus dem autogenen Schwinden ε_{ca} und dem Trocknungsschwinden ε_{cd} ergeben. Ausgelöst durch die Hydratation tritt das autogene Schwinden im Zeitraum des erhärtenden Betons auf. Demgegenüber setzt das Trocknungsschwinden darauffolgend erst mit Abschluss der Nachbehandlung oder dem Ausschaltungszeitpunkt ein. [Vgl. SCHLICKE (2014); S. 20] und [Vgl. LOHMEYER und EBELING (2018); S. 122]

Faktoren, die die Größe der Schwinddehnungen beeinflussen, sind:

- Umgebungsbedingungen, abhängig von der relativen Luftfeuchte
- Wasserbindung beim Erhärten des Betons, beeinflusst durch die Hydratationsgeschwindigkeit
- Zementleimgehalt und Kapillarporosität des Zementsteingefüges
- austrocknende Oberfläche des Betonbauteils, abhängig von der Bauteilgeometrie

Das Ausmaß und die zeitliche Entwicklung der Schwinddehnung werden in der ÖNORM EN 1992-1-1:2015 geregelt. Untersuchungen von RAPHAEL *et al.* (2012) befürworten jedoch eine Anpassung der normativ ermittelten Werte, da diese in den ersten 14 Tagen um bis zu 30 % zu hoch und das Endschwindmaß dabei um bis zu 20 % zu niedrig angesetzt werden. [Vgl. SCHLICKE (2014); S. 20]

2.8.1 Autogenes Schwinden

Als Folge der Volumenreduktion der Hydratationsprodukte im Verhältnis zu den Ausgangsstoffen des Betons und durch entstehenden Unterdruck im Porensystem der Zementmatrix wirkt das autogene Schwinden im Zeitraum der Hydratation. [Vgl. SCHLICKE (2014); S. 22]

In Abhängigkeit von Art und Menge des Zementsteins kann der Grundwert der autogenen Schwinddehnung in ÖNORM EN 1992-1-1:2015 aus der Druckfestigkeit des Betons berechnet werden. [Vgl. LOHMEYER und EBELING (2018); S. 123]

Ein Teil der autogenen Schwinddehnung bildet sich bereits vor Einsetzen der Festigkeitsentwicklung des Betons. Dieser Umstand ist bei der Ermittlung der Zwangsspannungen zu berücksichtigen. Die dabei entstehende, überwiegend gleichförmige Verformungseinwirkung hat bei entsprechender Behinderungssituation einen erwiesenen Einfluss auf die Zwangskraft.

In Abhängigkeit der Massigkeit des Querschnittes verläuft das autogene Schwinden annähernd zeitgleich mit der Erwärmung infolge Hydratation ab und vermindert dadurch den Druckspannungsaufbau im Bauteil. Die in der Abkühlungsphase hervorgerufenen Zugspannungen entstehen dadurch schneller und ausgeprägter, wie in Abbildung 2.24 schematisch dargestellt. [Vgl. SCHLICKE (2014); S. 22 f.]

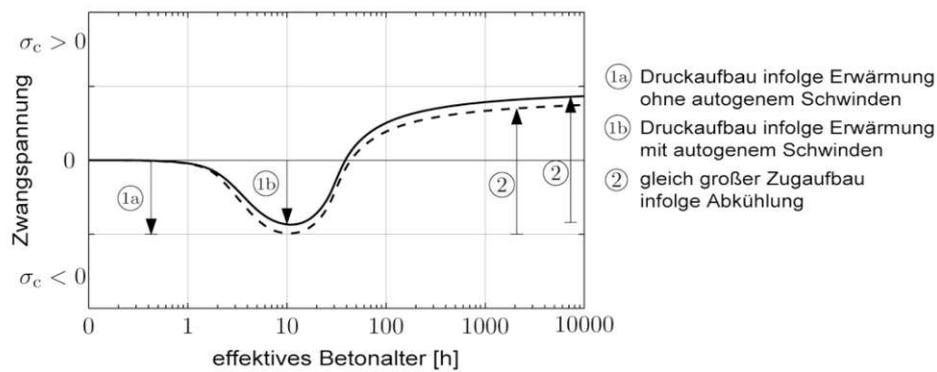


Abbildung 2.24 – Schematische Darstellung einer möglichen Unterschätzung der Zug-Zwangspannungen im Erhärtungszeitraum infolge Vernachlässigung des autogenen Schwindens; Darstellung nach [SCHLICKE (2014); S. 23 – Abb. 2.6]

2.8.2 Trocknungsschwinden

Das Trocknungsschwinden setzt ein, wenn das im Beton nicht chemisch gebundene Wasser an der Oberfläche verdunsten kann und somit ein Feuchteausgleich mit der umgebenden Luft vollzogen wird. Die Größe der zugehörigen Schwinddehnung ist abhängig vom Wasserbindemittelwert, den Eigenschaften des Bindemittels, dem Volumenverhältnis von Zementleim zu Gesteinskörnung und etwaigen schwindreduzierenden Zusatzmitteln. Im Allgemeinen bildet sich im Bauteil ein nicht lineares Feuchteprofil aus, das Zwangs- und Eigenspannungen hervorruft. Der zeitliche Verlauf der Schwinddehnungen wird maßgebend durch das Austrocknungsverhalten des Betonbauteils (relative Luftfeuchte, Temperatur, wirksame Bauteildicke als Verhältnis von Fläche zu Umfang) bestimmt. Bei massigen Bauteilabmessungen kann das Endschwindmaß üblicherweise erst nach Jahren oder sogar Jahrzehnten erreicht werden. [Vgl. RÖHLING und MEICHSNER (2018); S. 79]

Angaben zur Größe des Trocknungsschwindens sind nur selten aus Versuchen vorhanden. Die Berechnung kann deshalb in Abhängigkeit der oben angegebenen Parameter mit Hilfe der in ÖNORM EN 1992-1-1:2015 angegebenen Gleichungen erfolgen. [Vgl. SCHLICKE (2014); S. 20]

Bei erhärtendem Beton kann bis zum Erreichen der Ausgleichstemperatur angenommen werden, dass weniger als 10 % der Austrocknung bis zu diesem Zeitpunkt erfolgt ist. Folglich ist das Trocknungsschwinden im Hinblick auf den Erhärtungszeitraum unbedeutend und kann in diesem Zusammenhang vernachlässigt werden. [Vgl. SCHLICKE (2014); S. 21]

2.9 Viskoelastische Eigenschaften des Betons

Zeitabhängige Volumenänderungen bei Beanspruchung werden durch die viskoelastischen Betoneigenschaften charakterisiert. Diese in der Ingenieurpraxis als Kriechen und Relaxation bezeichneten Eigenschaften werden dort oft unter idealen Randbedingungen als reine Werkstoff-eigenschaften beschrieben. Ein gleichbleibender Spannungszustand und vollkommene

Verformungsfreiheit werden für reines Kriechen vorausgesetzt. Hingegen fordert die reine Relaxation absolute Verformungsbehinderung, die auch bei etwaigem Spannungsabbau in vollem Umfang erhalten bleiben muss. Bei zwangsbeanspruchten Bauteilen liegt in der Praxis eine Mischform der beiden Extremfälle vor, die durch eine teilweise Verformungsbehinderung, quantifiziert durch den von Zeit und Elastizitätsmodul abhängigen Behinderungsgrad $a(t)$, beschrieben werden kann. In Abbildung 2.25 werden dazu schematisch die angeführten Systeme graphisch dargestellt. [Vgl. SCHLICKE (2014); S. 23 f.]

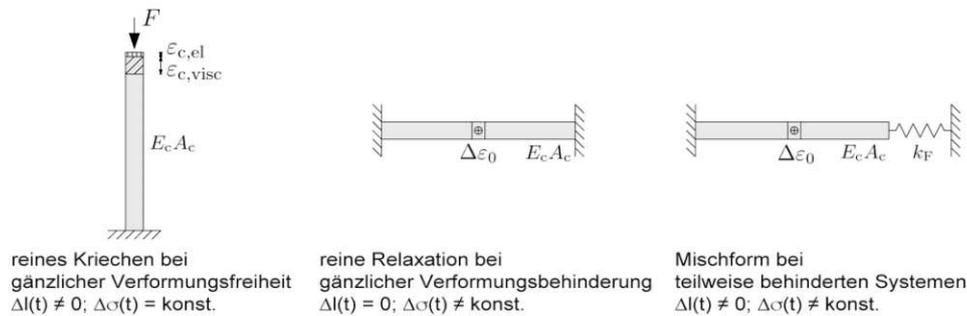


Abbildung 2.25 – Schematische Darstellung des Einflusses des Behinderungsgrads auf die Systemantwort infolge viskoelastischer Eigenschaften des Betons; Darstellung nach [SCHLICKE (2014); S. 24 – Abb. 2.7]

Kennzeichnend für teilweise behinderte Systeme ist, dass Spannungsrelaxation und Kriechverformung zu selben Zeiten ablaufen und sich gegenseitig beeinflussen. Als Folge der Spannungsreduktion im System durch Relaxation wird auch die Kriechverformung abgeschwächt. Bei der mathematischen Formulierung der viskoelastischen Betoneigenschaften werden daher umfangreiche Superpositionen notwendig.

In Hinblick auf die Rissgefahr kann die relaxationsbedingte Verminderung der Spannungen im Bauteil jedoch nicht automatisch als vorteilhaft angesehen werden. Infolge der ansteigenden Temperaturen im erhärtenden Beton werden Druckspannungen aufgebaut, die durch die zu diesem Zeitpunkt noch stark ausgeprägten viskoelastischen Eigenschaften abgemindert werden. Wie in Abbildung 2.26 ersichtlich, entstehen daher in der darauffolgenden Abkühlungsphase die Zugspannungen früher und weisen auch höhere Werte auf. [Vgl. SCHLICKE (2014); S. 24 f.]

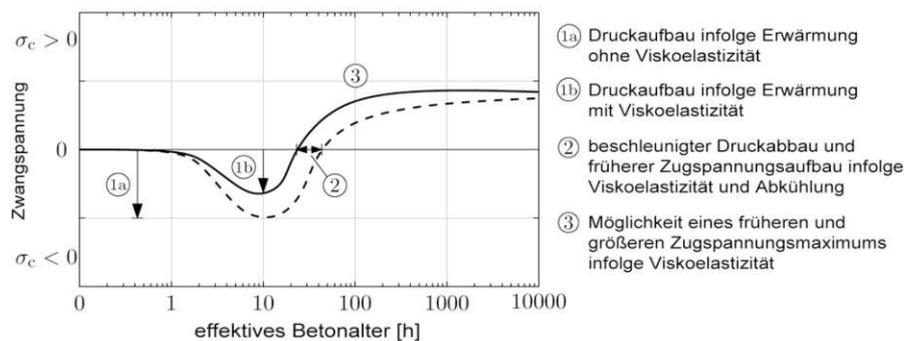


Abbildung 2.26 – Schematische Darstellung einer möglichen Unterschätzung der Zugbeanspruchung im Erhärtungszeitraum bei Vernachlässigung der Viskoelastizität; Darstellung nach [SCHLICKE (2014); S. 25 – Abb. 2.8]

Nach SCHLICKE (2014) können die viskoelastischen Betoneigenschaften mit einem verformungsbasierten Ansatz zeitdiskret formuliert werden. Die aus Kriechen und Relaxation hervorgerufenen Verformungen werden dabei für einen Zeitschritt in Abhängigkeit von Erhärtungszustand und, bis zu diesem Zeitpunkt, eingepprägter Spannungsgeschichte ermittelt und daraus folgend superpositioniert. Folgende Annahmen liegen diesem Ansatz zu Grunde: [Vgl. SCHLICKE (2014); S. 23 f.]

- Relaxation und Kriechen sind zeitdiskrete Systemantworten auf ein spannungsabhängiges Verformungsbestreben in Abhängigkeit des Systembehinderungsgrades.
- Die Größe des viskoelastischen Potentials aus zugehöriger Spannungserhöhung kann mithilfe der Kriechkurven nach ÖNORM EN 1992-1-1:2015 hinreichend genau berechnet werden.
- Die lineare Abhängigkeit von Viskoelastizität und Beanspruchungsniveau ist unter Druck bis zu einer Größe von $0,4 \cdot f_c$ und unter Zug bis zum Beginn der Rissbildung bei $f_{ctk,0.05}$ gegeben.
- Im Zeitverlauf können viskoelastische Effekte superpositioniert werden und unter Berücksichtigung von belastend und entlastend wirkenden Verformungseinwirkungen zeitdiskret nach SCHLICKE *et al.* (2013) berücksichtigt werden.
- Viskoelastizität und Schwinden sind unabhängig voneinander.
- Die Abhängigkeit des viskoelastischen Potentials von der Reife kann zufriedenstellend genau mit Hilfe der Endkriechzahl auf Basis des effektiven Betonalters bestimmt werden.
- Die zeitliche Entwicklung der Viskoelastizität ist bei den betrachteten Temperaturgeschichten bis 55 °C temperaturunabhängig.

Umfangreiche Angaben über den verformungsbasierten Ansatz für die Berücksichtigung der viskoelastischen Eigenschaften des Betons können in SCHLICKE (2014) gefunden werden.

3 Rissverhalten von Betonbauteilen

Die Zugfestigkeit bzw. die Dehnfähigkeit in Betonbauteilen bei Zugbeanspruchung ist relativ niedrig, die Beanspruchbarkeit auf Zug daher begrenzt. Dieser Umstand hat jedoch zur Folge, dass die Rissgefahr bei Zugbeanspruchung des Betons groß ist. [Vgl. LOHMEYER und EBELING (2018); S. 132]

3.1 Rissarten und ihre Auswirkung auf die Wasserundurchlässigkeit

Mit Hauptaugenmerk auf die Wasserundurchlässigkeit der Bauteile ist zwischen folgenden Rissen zu unterscheiden: [Vgl. LOHMEYER und EBELING (2018); S. 132]

- Schalenrisse: Risse im Bereich der Oberfläche
- Biegerisse: Risse in der Biegezugzone
- Trennrisse: durch den Bauteilquerschnitt gehende Risse

Schalenrisse

Als Schalen- oder Oberflächenrisse werden Risse bezeichnet, die nur geringfügig in den Beton reichen. Ihren Ursprung haben diese meist aus Eigenspannungen des Betons infolge Verformungsbehinderung. Überschreiten die vorliegenden Eigenspannungen die Zugfestigkeit des Betons, entstehen Risse im Oberflächenbereich der Bauteile.

Die Wasserundurchlässigkeit eines Bauteils wird durch Schalenrisse nicht beeinflusst. Sie stellen aber eine Vorschädigung, die als Ausgangspunkt nachfolgend entstehender Trennrisse angesehen werden kann, dar. Das Risiko der Schalenrissbildung wird durch eine möglichst frühzeitig einsetzende und ausreichend lange wirksame Nachbehandlung des Betons minimiert. Eine, Rissbreiten begrenzende oder verhindernde Bewehrung hat jedoch keinen Einfluss auf die Entstehung von Schalenrissen.

Im jungen Beton ist die Rissgefahr infolge Eigenspannungen am größten und nimmt mit steigendem Alter ab. Eine langsame Festigkeitsentwicklung der verwendeten Betone wirkt sich daher positiv aus. In Tabelle 3.1 werden Rissursache, Vermeidung und Bedeutung tabellarisch für die Rissart „Schalenrisse“ aufgelistet. [Vgl. LOHMEYER und EBELING (2018); S. 133 f.]

Tabelle 3.1 – Schalenrisse, ihre Entstehungsursache und deren Vermeidung
 [Vgl. LOHMEYER und EBELING (2018); S. 133 – Tafel 4.8]

Rissart	Rissursachen	Vermeidung und Bedeutung
Schalenrisse	Eigenspannungen durch: <ul style="list-style-type: none"> – Frühschwinden – Abkühlen – Absetzen des Betons 	Vermeidung durch: <ul style="list-style-type: none"> – Schutz vor zu schnellem Austrocknen – Schutz vor zu schneller Wärmeabgabe – sorgfältiges Verdichten und ggf. Nachverdichten
		Bedeutung: Schalenrisse als netzartige, oberflächennahe Risse haben keinen Einfluss auf die Wasserundurchlässigkeit der Bauteile.

Biegerisse

Biegerisse entstehen, wenn die Biegezugfestigkeit des Betons durch die vorhandene Biegezugspannung im Bauteil überschritten wird. Auftretende Risse müssen jedoch nicht automatisch den nicht erbrachten Gebrauchstauglichkeitsnachweis in Bezug auf die Wasserundurchlässigkeit bedeuten. Es ist dabei nachzuweisen, dass die Biegerisse nur teilweise in den Bauteil vordringen und im restlichen Querschnitt das Eindringen der Risse durch vorherrschende Druckspannungen unterbunden werden kann. Die Wasserundurchlässigkeit ist gegeben, wenn: [Vgl. LOHMEYER und EBELING (2018); S. 136 f.]

- es zu keiner Rissbildung im Beton kommt.
 Diese Bedingung erfordert neben der vollständigen Erfassung aller Lastfälle und Lastkombinationen auch die Miteinbeziehung aller Zwangsschnittgrößen resultierend aus Temperaturzuständen, Schwind- und Kriechvorgängen.
- eine ausreichend dicke Betondruckzone vorhanden ist.
- eine vorhandene Bewehrung die Rissbreite in der Biegezugzone auf ein akzeptables Maß begrenzt.

In Tabelle 3.2 werden Rissursache, Vermeidung und Bedeutung tabellarisch für die Rissart „Biegerisse“ aufgelistet.

Tabelle 3.2 – Biegerisse, ihre Entstehungsursache und deren Vermeidung
[Vgl. LOHMEYER und EBELING (2018); S. 136 – Tafel 4.8]

Rissart	Rissursachen	Vermeidung und Bedeutung
Biegerisse	Biegezugspannungen durch: <ul style="list-style-type: none"> – zu große Verformungen – zu große Biegebeanspruchung – zu große Betondeckung 	Vermeidung durch: <ul style="list-style-type: none"> – Verringerung der Biegeschlankheit – geringere Ausnutzung der Stahlspannungen – Sicherung der Bewehrung gegen Verschieben
		Bedeutung: Biegerisse haben keinen Einfluss auf die Wasserdurchlässigkeit, wenn die Biegedruckzone $\geq 30 \text{ mm}$ oder $\geq 1,5 \cdot D_{max}$ ist.

Trennrisse

Verlaufen Risse durchgehend durch die gesamte Dicke eines Bauteils, werden sie als Trennrisse bezeichnet. Ursache dafür sind Zugspannungen aus Lasten oder aus Zwang. Lastinduzierte Zugspannungen können rechnerisch ausreichend genau erfasst werden. Zugspannungen aus Zwangsbeanspruchungen hingegen können nur schwer abgeschätzt werden. Im jungen sowie im älteren Beton können Trennrisse durch nachfolgende Sachverhalte hervorgerufen werden: [Vgl. LOHMEYER und EBELING (2018); S. 138]

- bei zu raschem Abkühlen durch abfließende Hydratationswärme bei Erhärtungsbeginn
- bei zu raschem Austrocknen des Betons durch fehlenden Schutz der Oberfläche im erhärteten Beton
- bei Temperaturschwankungen im Laufe des Tages und des Jahres
- beim Schwinden des Betons durch späteres Austrocknen
- bei ungleichmäßigen Setzungen der Bauteile

In Tabelle 3.3 werden Rissursache, Vermeidung und Bedeutung tabellarisch für die Rissart „Trennrisse“ aufgelistet.

Tabelle 3.3 – Trennrisse, ihre Entstehungsursache und deren Vermeidung
[Vgl. LOHMEYER und EBELING (2018); S. 133 – Tafel 4.8]

Rissart	Rissursachen	Vermeidung und Bedeutung
Trennrisse	Früher Zwang durch abfließende Hydratationswärme	Vermeidung durch: <ul style="list-style-type: none"> – Wahl einer einfachen und nicht komplizierten Konstruktion – zweckmäßige Wahl des Berechnungsmodells – richtige Annahmen der Zwangsbeanspruchung – ausreichend dimensionierte Bewehrung – Beton mit niedriger Wärmeentwicklung – Schutz gegen zu schnelles Abkühlen – Anordnung von Solrissquerschnitten
		Bedeutung: Nachweis der Bewehrung zur Begrenzung der Rissbreite
	Später Zwang durch Schwinden des Betons	Vermeidung durch: <ul style="list-style-type: none"> – Wahl einer einfachen und nicht komplizierten Konstruktion – zweckmäßige Wahl des Berechnungsmodells – richtige Annahmen der Zwangsbeanspruchung – ausreichend dimensionierte Bewehrung – Beton mit geringem Schwindmaß – Schutz des Betons vor zu schnellem Austrocknen – Anordnung von Solrissquerschnitten
		Bedeutung: Nachweis der Bewehrung zur Begrenzung der Rissbreite
	Später Zwang durch Temperaturbeanspruchungen oder Setzungen	Vermeidung durch: <ul style="list-style-type: none"> – ggf. Schutz vor schnellen Temperaturwechseln – Anordnung von Solrissquerschnitten – keine ungleichmäßigen Setzungen
		Bedeutung: Nachweis der Bewehrung zur Begrenzung der Rissbreite

3.2 Zwangsspannungen im Beton

Erkenntnisse über die Bildung und die zeitliche Entwicklung der Zwangsspannungen können aus Versuchen mit der Temperatur-Spannungsprüfmaschine oder dem Reißrahmen gewonnen werden. Mithilfe dieser experimentellen Untersuchungen, in denen prismenförmige Beton-

körper infolge Hydratation teiladiabatisch erwärmt und im Anschluss verformungsbehindert abgekühlt werden, wird eine Simulation des annähernd realen Bauteilverhaltens im gesamten Erhärtungsprozess ermöglicht. [Vgl. RÖHLING (2009); S. 191]

Neben der versuchsgesteuerten Bestimmung können Zwangsspannungen auch mathematisch ermittelt werden. Hierfür stehen analytische und numerische Methoden zur Auswahl. Diese beiden unterscheiden sich im Allgemeinen durch die zutreffende Beschreibung des Behinderungsgrades und in ihrem Rechenaufwand. Analytische Methoden weisen einen überschaubaren Rechenaufwand auf, erfordern jedoch eine korrekte Vorhersage des zu erwartenden Behinderungsgrades. Zum Unterschied dazu beschreiben numerische Methoden das tatsächliche Bauteilverhalten exakt, bedürfen aber oft einer aufwendigen Modellierung und eines erheblichen Rechenaufwandes. [Vgl. SCHLICKE (2014); S. 42]

3.2.1 Grundlegende Entwicklung von Zwangsspannungen im Versuch

Anschließend an eine Anfangsphase, in Abbildung 3.1 als Stadium I bezeichnet, ohne merklichen Temperaturanstieg, die mit dem Erstarrungsbeginn abschließt, bewirkt die nachfolgende Temperaturerhöhung infolge des Hydratationsprozesses eine Ausdehnung des Versuchskörpers. Aufgrund der behinderten Verformungsmöglichkeiten in Längsrichtung erfährt dieser dabei eine Stauchung, die jedoch keine messbaren Spannungen zur Folge haben, da der Beton noch plastisch verformbar ist. Diese Phase wird dem Stadium II in Abbildung 3.1 zugeordnet.

Mit der fortlaufenden Verfestigung und Herausbildung der mechanischen Kenngrößen entstehen ab der ersten Nullspannungsgrenze und der in Bezug dazu stehenden Temperatur T_{01} weitere Temperaturdehnungen sowie damit verknüpfte Druckspannungen in Stadium III nach Abbildung 3.1. In dieser Phase der Hydratation wachsen die mechanischen Kenngrößen stetig an, die Verformbarkeit des jungen Betons hingegen nimmt parallel dazu kontinuierlich ab. Im Verlauf dieses Stadiums streben die Temperatur sowie die Druckspannungen, die teilweise durch Kriechen und Relaxation zeitgleich wieder abgebaut werden, ihrem Maximum entgegen. Das Erreichen der Höchsttemperatur beendet diese Phase.

Die fortlaufende Abnahme der Druckspannungen kennzeichnet das anschließende Stadium IV in Abbildung 3.1, das mit Erreichen der zweiten Nullspannungsgrenze und der zugehörigen Temperatur T_{02} beendet wird.

Im Stadium V nach Abbildung 3.1 führt der anhaltende Abkühlungsvorgang bis zur Ausgleichstemperatur zu einer stetigen Zunahme der Zugspannungen, die in Folge der vorhandenen mechanischen Kenngrößen immer geringer durch Relaxation abgebaut werden. Wird die Zugfestigkeit dabei überschritten, kommt es schlussendlich zur Rissbildung im Versuchskörper. [Vgl. RÖHLING (2009); S. 191 f.] und [Vgl. LOHMEYER und EBELING (2018); S. 146 f.]

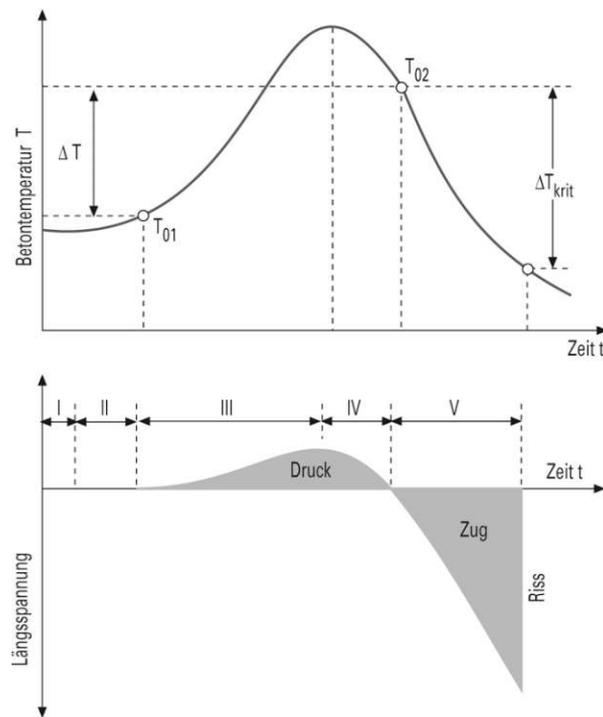


Abbildung 3.1 – Temperaturverlauf und Zwangsspannungen im jungen Beton bei behinderter Temperaturverformung (schematisch); Darstellung nach [SPRUNG (1992) & WEIGLER und KARL (1974) zit. nach VEREIN DEUTSCHER ZEMENTINDUSTRIE e. V., Hrsg. (2002); S. 361 – Bild II.6.4-1]

3.2.2 Innerer und äußerer Zwang

Die mit der Hydratation einhergehende Erwärmung des Betons bedingt die Ausdehnung des Betonvolumens, die sich im weiteren zeitlichen Verlauf in der Abkühlungsphase umkehrt und zu einer Stauchung des Betonvolumens führt. Kann dieser Prozess theoretisch ohne Zwang ablaufen, resultieren daraus auch keine Spannungen im Betonquerschnitt. In der Praxis ist ein Betonbauteil jedoch immer differenzierten Behinderungen ausgesetzt, die in inneren und äußeren Zwang unterteilt werden können.

Durch den nichtlinearen Temperaturgradienten, der sich einstellt, wenn Wärme zu einem kälteren Rand hin abfließt, wird dadurch ein innerer Zwang aktiviert. Dieser erzeugt wiederum Eigenspannungen durch die Bedingung des Ebenbleibens der Querschnitte. Sie sind über den gesamten Querschnitt nicht linear verteilt, stehen jedoch in Summe im Gleichgewicht zueinander und erzeugen somit keine Schnittgrößen.

Der äußere Zwang hingegen resultiert im Allgemeinen aus der statisch unbestimmten Lagerung der Betonbauteile. Bei Bodenplatten kann dies der Baugrund, bei Wänden das darunterliegende Fundament oder der zuvor betonierte Wandabschnitt darstellen. Je nach Spannungsverteilung wird der äußere Zwang in zentrischen Zwang und Biegezwang unterteilt.

Der zentrische Zwang ergibt sich beispielsweise, wenn im Pilgerschrittverfahren ein Abschnitt einer Wand zwischen zwei zuvor betonierte Wandabschnitten hergestellt wird.

Biegezwang resultiert beispielsweise bei Bodenplatten aus dem nahezu einseitigen Abfluss der Temperatur zur Luftseite hin. Daraus wird eine Verkrümmung der Platte hervorgerufen, der das Eigengewicht entgegenwirkt und somit zu Spannungen im Betonquerschnitt führt.

In der Regel tritt in der Praxis meist eine Kombination aus Eigenspannungen σ_{n-lin} aus innerem Zwang, Zwangsnormalspannungen σ_k aus zentrischem Zwang sowie Zwangsbiegespannungen σ_n aus Biegezwang nach Abbildung 3.2 auf. [Vgl. BÖDEFELD (2010); S. 11]

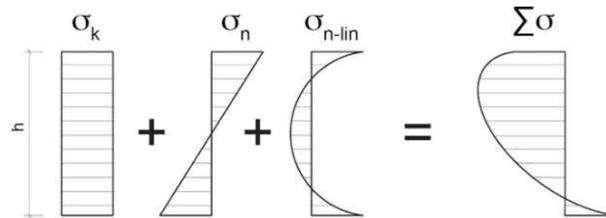


Abbildung 3.2 – Aufteilung der Spannungsprofile; Darstellung nach [BUNDESANSTALT FÜR WASSERBAU, Hrsg. (2011); S. 4 – Bild 4]

3.3 Rissgefahr infolge Zwangsbeanspruchung

Eine Beurteilung der Rissgefahr erfolgt anhand der Spannungsergebnisse im maßgebenden Querschnitt des ungerissenen Systems. In einem ersten Schritt wird dazu die Gesamtspannung eines Materialpunktes betrachtet. Kann dabei eine Rissbildung nicht kategorisch ausgeschlossen werden, muss in einem zweiten Schritt eine Analyse der Spannungsverteilung nach Art und Intensität, mit Hilfe einer Aufteilung in die einzelnen Spannungsprofile nach Abbildung 3.2, durchgeführt werden. [Vgl. SCHLICKE (2014); S. 73]

Ausschlaggebend für diese Vorgehensweise sind die im Querschnitt vorhandenen Eigenspannungen bei Erreichen der Ausgleichstemperatur. Zu diesem Zeitpunkt liegen im Querschnitt inneren Zugeigenspannungen sowie am Querschnittsrand Druckeigenspannungen vor. Für die Gesamtspannung bedeutet dies, dass die Eigenspannungen den am stärksten gezogenen Querschnittsrand in Summe günstig vorspannen, wie in Abbildung 3.3 – oben, zu ersehen ist.

Erreicht jedoch die Gesamtspannung $\sigma_{c,i}$ als Summe von Eigenspannung, Zwangsnormalspannung und Biegezwangsspannung im Maximum die Zugfestigkeit, kann eine lokale Rissbildung nicht ausgeschlossen werden. Mit dieser lokalen Rissbildung geht aber das Ebenbleiben des Querschnitts verloren und die günstig wirkenden Druckeigenspannungen am Querschnittsrand werden damit abgebaut. Als Folge des Wegfalles der gesamten Eigenspannungen muss damit gerechnet werden, dass die Summe der verbleibenden Zwangsnormalspannungen und Biegezwangsspannungen die Zugfestigkeit überschreitet, analog Abbildung 3.3 – unten, und es somit zu Rissbildung kommt. [Vgl. SCHLICKE und TUE (2016); S. 121 f.]

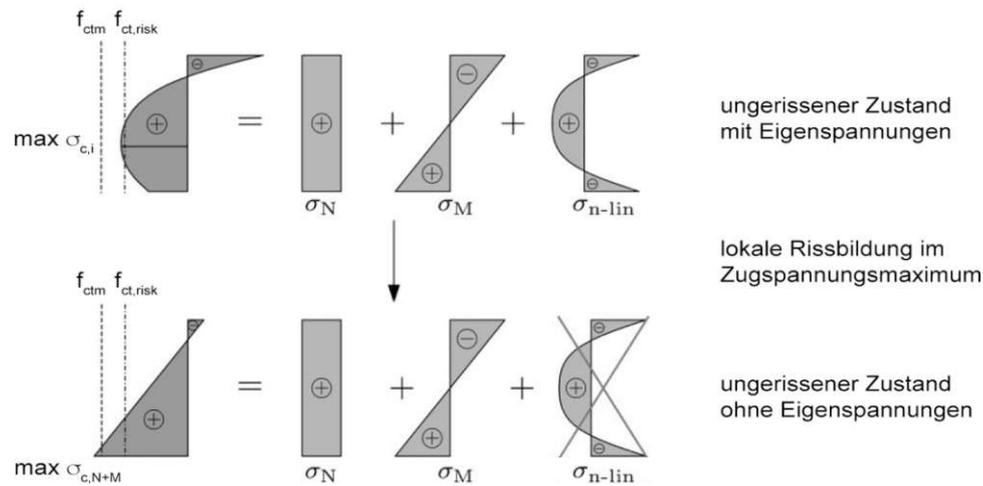


Abbildung 3.3 – Einfluss der Eigenspannungen auf die Gefahr von bemessungsrelevanter Rissbildung bei Erreichen der Ausgleichstemperatur; Darstellung nach [SCHLICKE und TUE (2016); S. 121 – Bild 1]

Die rechnerische Berücksichtigung der günstigen Wirkung von Eigenspannungen sollte deshalb nur Berücksichtigung finden, wenn selbst lokale Rissbildung im Materialpunkt ausgeschlossen werden kann. In Anlehnung an den *DIN-Fachbericht 102* (2000) wird in SCHLICKE und TUE (2016a) daher vorgeschlagen, dass Rissbildung nur ausgeschlossen werden kann, wenn die Gesamtspannung $\sigma_{c,i}$ in jedem Materialpunkt unter der Zugfestigkeit zur Beurteilung der Rissgefahr $f_{ct,risk}$ liegt. Diese Zugfestigkeit wird darin nach Gleichung (3.1) mit 80 % des 5 %-Fraktilwertes der vorhandenen mittleren Betonzugfestigkeit definiert. [Vgl. SCHLICKE und TUE (2016); S. 122]

$$f_{ct,risk}(t) = 0,80 \cdot f_{ct,0.05}(t_{eff}) = 0,80 \cdot 0,7 \cdot f_{ctm}(t_{eff}) \quad (3.1)$$

mit

$f_{ct,risk}(t)$	Zugfestigkeit zur Beurteilung der Rissgefahr
t	Betrachtungszeitpunkt (tatsächliche Zeit)
$f_{ct,0.05}(t_{eff})$	5 %-Fraktilwert der Zugfestigkeit in Abhängigkeit des effektiven Betonalters
$f_{ctm}(t_{eff})$	mittlere Betonzugfestigkeit in Abhängigkeit des effektiven Betonalters

3.4 Bauteilspezifisches Verhalten infolge Zwangsbeanspruchung

Die Art der Zwangsbeanspruchung resultiert neben den Materialeigenschaften auch im hohen Maße aus der Bauteilgeometrie und Bauteilart. Je nach Kombination von vorliegendem Temperaturänderungsprofil und Verformungsbehinderung bilden sich die einzelnen Komponenten der Gesamtspannung heraus. Zentrischer Zwang baut sich demgemäß nur bei einer konstant im

Querschnitt verteilten Temperaturänderung und zeitgleich von außen wirkenden Verformungsbehinderung auf. Der Biegezwang benötigt zur Entfaltung eine Verkrümmungsbehinderung bei gleichzeitigem Vorliegen eines linear verteilten Temperaturprofils. Der nichtlineare Temperaturanteil ruft Eigenspannungen, unter der Bedingung des Ebenbleibens des Querschnittes, hervor. [Vgl. SCHLICKE (2014); S. 74]

Im folgenden Unterabschnitt wird diesbezüglich das zugehörige Bauteilverhalte für „Bodenplatten“ näher beschrieben.

3.4.1 Bodenplatten

Bodenplatten charakterisieren Bauteile, die flächig auf dem Baugrund lagern. Sie interagieren in horizontaler wie vertikaler Richtung mit dem darunterliegenden Untergrund. Im Zeitraum des laufenden Hydratationsprozesses werden durch ungleiche Randbedingungen Temperaturunterschiede an Ober- und Unterseite der Platte hervorgerufen. Mit steigender Massigkeit der Bodenplatte wird auch der Einfluss der Wärmespeicherung des Baugrundes angehoben, in deren Folge der Temperaturgradient an Größe zunimmt. Zeitgleich vergrößern sich mit ansteigender Plattendicke die konstanten Temperaturanteile und Eigenspannungen.

Je nach Orientierung des Temperaturgradienten hat dieser eine Verkrümmungsbestrebung (Aufschüsseln oder Verwölben) der Platte zur Folge, die in beiden Fällen ein Anheben der Bodenplatte aus seiner Lage heraus anstrebt. Das dadurch aktivierte Eigengewicht steht diesem Vorgang mit einem rückdrehenden Moment gegenüber – Biegespannungen in der Bodenplatte, wie in Abbildung 3.4 schematisch gezeigt, entstehen. [Vgl. SCHLICKE und TUE (2016); S. 123]

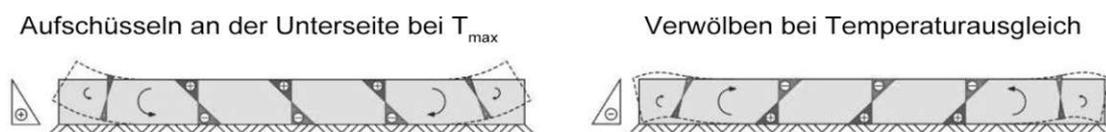


Abbildung 3.4 – Behinderungssituation von Bodenplatten – Biegezwang infolge Eigengewichtsaktivierung; Darstellung nach [öbv-MB „Weißer Wanne optimiert“ (2018); S. 9 – Abbildung 4-2]

Zu einer Wechselwirkung mit dem Baugrund hingegen führen die gleichmäßig im Querschnitt verteilten Verformungseinwirkungen. Der daraus entstehende zentrische Zwang kann in der Bemessungspraxis anhand zweier Modelle, dem Reibungsmodell und dem Modell zur Berücksichtigung der Nachgiebigkeit des Baugrundes nach KÖNIG *et al.* (2008), bewertet werden. Die zugehörigen Modellvorstellungen werden in Abbildung 3.5 graphisch dargestellt. [Vgl. KÖNIG *et al.* (2008); S. 282 f.]

Im Allgemeinen entwickelt sich die Zwangskraft F_{ZW} , in Abhängigkeit von Bauteillänge und Eigengewicht, über Reibung in der Lagerfuge gemäß dem Reibungsmodell. Da hierbei aber die Baugrundnachgiebigkeit sowie die Größe der Verformungseinwirkung nicht miteinfließen, führt dieser Ansatz bei ausgedehnten und massigen Platten oft zu unwirtschaftlichen Ergebnissen.

Hier schafft das Modell zur Berücksichtigung der Nachgiebigkeit des Baugrundes Abhilfe, indem als Obergrenze für die Bewehrungsermittlung die maximale Zugkraft $F_{ZW,max}$, jedoch unter der Annahme des vollen Verbundes zwischen Bodenplatte und Baugrund, eingeführt wird. [Vgl. SCHLICKE (2014); S. 81]

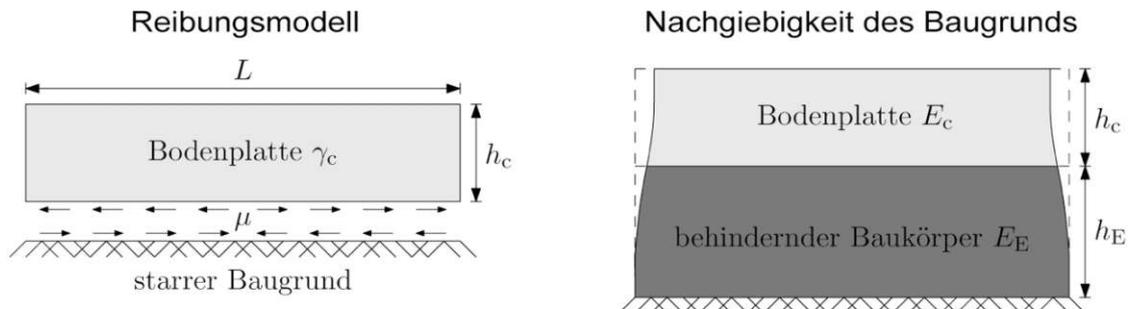


Abbildung 3.5 – Modelle zur äußeren Behinderung von Bodenplatten; Darstellung nach [KÖNIG *et al.* (2008); S. 282 f. – Abb. 8.20 & Abb. 8.21]

Bei Untersuchungen auf Grundlage der FE-Methode wird im Allgemeinen nur das Modell zur Berücksichtigung der Nachgiebigkeit des Baugrundes angewendet. Für dünne Bodenplatten mit kleinen Längsabmessungen führt dieses Modell aufgrund der Unterstellung des vollen Verbundes zu einer deutlichen Überschätzung der zentrischen Zwangsbeanspruchung und somit zu unwirtschaftlichen Ergebnissen in der Bewehrungsanordnung. In SCHLICKE (2014) wird daher für solche Modellierungen eine Modifikation des horizontalen Elastizitätsmodul des Baugrundes vereinfacht nach Gleichung (3.2) vorgeschlagen. [Vgl. SCHLICKE (2014); S. 81]

$$E_{E,mod} = \min \left\{ E_E; \frac{h_c}{h_E} \cdot \left(\frac{-\varepsilon_0}{\mu \cdot L/2 \cdot \gamma_c} - \frac{1}{E_c} \right)^{-1} \right\} \quad (3.2)$$

mit

$E_{E,mod}$	modifizierter horizontaler E-Modul des Baugrundes (Boden, Sauberkeitsschicht, vorheriger Bauabschnitt)
E_E	horizontaler E-Modul des Baugrundes (Boden, Sauberkeitsschicht, vorheriger Bauabschnitt)
ε_0	Verformungseinwirkung
μ	Reibbeiwert in der Kontaktfläche
L	Länge der Platte in der betrachteten Richtung
γ_c	Wichte des Betons
E_c	Elastizitätsmodul des Betons

In SCHLICKE (2014) werden für die erhärtungsbedingte Rissgefahr bei Bodenplatten nachfolgende Festlegungen formuliert: [Vgl. SCHLICKE (2014); S. 88]

- 1) Die Gefahr von oberseitiger Mikrorissbildung steigt mit anwachsender Plattendicke.
- 2) Kann Rissbildung nicht ausgeschlossen werden, so sind Biegerisse immer bemessungsrelevant, da angenommen werden muss, dass der Biegezwang das Rissmoment erreicht.
- 3) Aus dem Biegezwang resultiert der geometrisch vorgegebene Abstand der primären Risse.
- 4) Im Allgemeinen ist die Gefahr von Trennrissen klein, da die kritische Behinderung in der Lagerfuge in der Praxis vorkommende Gegebenheiten bei Weitem überschreitet. Ausnahmen hierzu sind:
 - Betonagen auf kompaktem Fels mit gewollt gutem Verbund in der Lagerfuge, wie etwa im Fußbereich von Staumauern und
 - Dünne Platten auf steifem Untergrund mit entsprechend großem Verkrümmungsbestreben, deren Länge darüber hinaus eine starke Wechselwirkung mit dem Baugrund hervorruft.

Rissbild bei Bodenplatten

Makrorisse folgen bei Bodenplatten immer aus der kombinierten Wirkung von Biegezwang und zentrischem Zwang. In Abhängigkeit des Biegezwangs, der durch die Aktivierung des Eigengewichtes aufgebaut wird, kann der Abstand der Risse zueinander bestimmt werden. Da dieser aber durch das Rissmoment nach oben hin limitiert ist, kann der Rissabstand durch Gegenüber-

stellung von Rissmoment und Moment aus Eigengewichtsaktivierung in Gleichung (3.3) formuliert werden. [Vgl. SCHLICKE und TUE (2016); S. 128]

$$l_{cr} = \sqrt{\frac{1}{3} \cdot \frac{f_{ct,design} \cdot h_c}{\gamma_c}} \quad (3.3)$$

mit

l_{cr}	Rissabstand
$f_{ct,design}$	Bemessungszugfestigkeit des Betons
h_c	Plattendicke
γ_c	Wichte des Betons

Die dahinterstehende Modellvorstellung nach Abbildung 3.6 kann dabei im Fall des Aufschüsselns mit einem Einspannmoment M_{cr} eines Kragträgers veranschaulicht werden. Für den Fall des Verwölbens wird das Einspannmoment M_{cr} durch einen einseitig eingespannten, vertikal verschieblich gelagerten Einfeldträger charakterisiert. [Vgl. SCHLICKE und TUE (2016); S. 128]

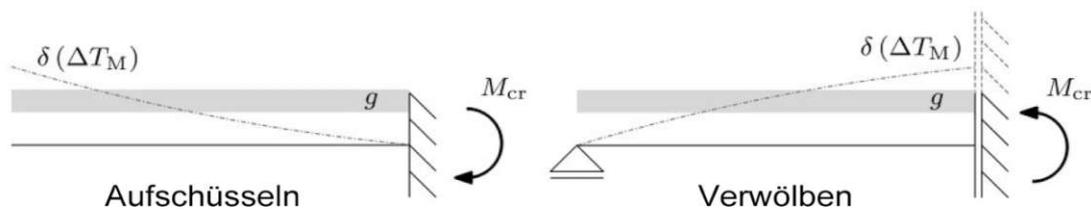


Abbildung 3.6 – System zur Erfassung des Verformungsverlaufs im Randbereich; Darstellung nach [SCHLICKE und TUE (2016); S. 128 – Bild 15]

Da in Gleichung (3.3) eine unendlich drucksteife Bettung unterstellt wird, stellt diese nur eine Näherungslösung in Bezug auf den Rissabstand dar. In SCHLICKE (2014) konnte beispielsweise gezeigt werden, dass der Abstand bei weniger steifen Baugrundverhältnissen ansteigt. Für die Ermittlung der Mindestbewehrung kann Gleichung (3.3) jedoch Anwendung finden, da hierbei auch eine konstante Biegebeanspruchung zwischen den Primärrissen angenommen wird. Die tatsächlichen Bettungsverhältnisse und die Spannungsverteilung zwischen den Rissen beeinflussen sich jedoch gegenläufig und es kann somit davon ausgegangen werden, dass die der Bemessung zugrundeliegenden Verformungen, auf der sicheren Seite liegend, aufgenommen werden können. [Vgl. SCHLICKE und TUE (2016); S. 128]

4 Bemessungsmodelle

Die aktuelle Auflage der *öbv-RL „Weiße Wannen“* führt drei verschiedene Bemessungsmodelle auf, die alle die Führung des Gebrauchstauglichkeitsnachweises bei überwiegender Zwangsbeanspruchung aus abfließender Hydratationswärme zum Inhalt haben. Neben dem altbewährten Bemessungsmodell „Weiße Wanne klassisch“, das den Entwurfsgrundsatz der Rissebegrenzung durch eine rissstreuende Bewehrung verfolgt, wurde die vorliegende Richtlinie um das Bemessungsmodell „Weiße Wanne optimiert“ erweitert. Ziel dieses Bemessungsmodells ist dabei nicht vorrangig die Rissebegrenzung, sondern die Verfolgung des Entwurfsgrundsatzes der Rissevermeidung. Der Nachweis der Gebrauchstauglichkeit bei überwiegender Zwangsbeanspruchung kann dabei nach einer analytischen Berechnung gemäß *öbv-MB „Weiße Wanne optimiert“* bei statisch einfachen Systemen bauteilspezifisch oder allgemein über die Modellierung von thermomechanischen Simulationen erfolgen. [Vgl. *öbv-RL „Weiße Wannen“* (2018); S. 13 f.]

Die allgemeinen Inhalte der verschiedenen Bemessungsmodelle wurden bereits in Kapitel 1 – Stand der Technik angeführt. Da das Bemessungsmodell „Weiße Wanne klassisch“ allgemein auf den Rissbreitennachweisen nach ÖNORM EN 1992-1-1:2015 und ÖNORM B 1992-1-1:2018 beruhen, werden nachfolgend im ersten Abschnitt diese Nachweise ausführlich betrachtet.

4.1 Rissbreitennachweise nach ÖNORM

Der erforderliche Bewehrungsquerschnitt zur Begrenzung der Rissbreite im Bemessungsmodell „Weiße Wanne klassisch“ laut *öbv-RL „Weiße Wannen“* wird anhand der Gleichungen nach ÖNORM EN 1992-1-1:2015, Abs. 7.3 und ÖNORM B 1992-1-1:2018, Abs. 10.2 ermittelt.

4.1.1 Rissbreitennachweis nach ÖNORM EN 1992-1-1:2015

Die charakteristische Rissbreite w_k ergibt sich nach Gleichung (4.1) zu: [Vgl. ÖNORM EN 1992-1-1:2015 (2015); S. 136 f.]

$$w_k = s_{r,max} \cdot (\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm}) \quad (4.1)$$

mit

$s_{r,max}$	maximaler Rissabstand bei abgeschlossenem Rissbild
ε_{sm}	mittlere Dehnung der Bewehrung unter der maßgebenden Einwirkungskombination, einschließlich der Auswirkungen aufgebrachtener Verformungen und unter Berücksichtigung der Mitwirkung des Betons auf Zug

ε_{cm} mittlere Dehnung des Betons zwischen den Rissen

Die Dehnungsdifferenz $\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm}$ wird hierzu nach Gleichung (4.2) bestimmt:

$$\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm} = \frac{\sigma_s - k_t \cdot \frac{f_{ct,eff}}{\rho_{p,eff}} \cdot (1 + \alpha_e \cdot \rho_{p,eff})}{E_s} \geq 0,6 \cdot \frac{\sigma_s}{E_s} \quad (4.2)$$

mit

σ_s Absolutwert der maximal zulässigen Spannung in der Betonstahlbewehrung unmittelbar nach Rissbildung nach Gleichung (4.3)

k_t Faktor, abhängig von der Dauer der Lasteinwirkung

$k_t = 0,6$ für kurzzeitige Lasteinwirkungen

$k_t = 0,4$ für langfristige Lasteinwirkungen

$f_{ct,eff}$ Mittelwert der wirksamen Zugfestigkeit des Betons zum Risszeitpunkt

$f_{ct,eff} = f_{ctm}$ für erwartete Rissbildung nach 28 Tagen

$f_{ct,eff} = f_{ctm}(t)$ für erwartete Rissbildung vor 28 Tagen

$\rho_{p,eff}$ wirksamer Bewehrungsgrad

$$\rho_{p,eff} = A_s / A_{ct,eff}$$

α_e Verhältnis der Elastizitätsmoduln von Betonstahl und Beton

$$\alpha_e = E_s / E_{cm}$$

$A_{ct,eff}$ wirksame Zugzonenfläche nach Gleichung (4.4)

Die maximal zulässige Spannung in der Betonstahlbewehrung σ_s wird nach ÖNORM EN 1992-1-1:2015, Abs. 7.3.2 (2) ermittelt und nach Gleichung (4.3) berechnet:

$$\sigma_s = k_c \cdot k \cdot f_{ct,eff} \cdot \frac{A_{ct}}{A_s} \quad (4.3)$$

mit

k_c Beiwert zur Berücksichtigung des Einflusses der Spannungsverteilung innerhalb des Querschnitts vor der Erstrissbildung sowie der Änderung des inneren Hebelarmes

$k_c = 1,0$ bei reinem Zug

k_c nach ÖNORM EN 1992-1-1:2015, Abs. 7.3.2 (2) bei Biegung oder Biegung mit Normalkraft

k	Beiwert zur Berücksichtigung von nichtlinear verteilten Betonzugspannungen, die zum Abbau von Zwang führen $k = 1,0$ für Bauteildicken mit $h \leq 300 \text{ mm}$ $k = 0,65$ für Bauteildicken mit $h \geq 800 \text{ mm}$ Zwischenwerte dürfen linear interpoliert werden
A_{ct}	Fläche der Betonzugzone im ungerissenen Zustand je Bauteilseite
A_s	Querschnittsfläche der Betonstahlbewehrung

Die wirksame Zugzonenfläche des Betons $A_{c,eff}$ wird auch als Wirkungsbereich der Bewehrung bezeichnet und für Gleichung (4.2) nach Gleichung (4.4) bestimmt. [Vgl. ÖNORM EN 1992-1-1:2015 (2015); S. 132 f.]

$$A_{c,eff} = b \cdot h_{c,ef} = b \cdot \min \left\{ 2,5 \cdot (h - d); \frac{h - x}{3}; \frac{h}{2} \right\} \quad (4.4)$$

mit

b	Querschnittsbreite
$h_{c,ef}$	wirksame Zugzonenhöhe
h	Querschnittshöhe
d	statische Nutzhöhe des Querschnitts
x	Druckzonenhöhe bei auf Biegung beanspruchten Querschnitten

Die ÖNORM EN 1992-1-1:2015 hat für die Ermittlung des maximalen Rissabstandes bei abgeschlossenem Rissbild in Gleichung (4.1) für Österreich keine Gültigkeit und wird nach einer nationalen Festlegung in der ÖNORM B 1992-1-1:2018, Abs. 10.2.7 nach Gleichung (4.5) bestimmt.

$$s_{r,max} = \frac{\phi_s}{3,6 \cdot \rho_{p,eff}} \leq \frac{\sigma_s \cdot \phi_s}{3,6 \cdot f_{ct,eff}} \quad (4.5)$$

mit

ϕ_s	Durchmesser der Stahlbewehrung
----------	--------------------------------

Wird nun eine zulässige Rissbreite w_k vorgegeben, kann mit Hilfe der Gleichungen (4.1) bis (4.5) durch Rückrechnen der erforderliche Bewehrungsquerschnitt zur Begrenzung der Rissbreite ermittelt werden.

4.1.2 Rissbreitennachweis nach ÖNORM B 1992-1-1:2018

Zusätzlich zu diesem Formelapparat in der ÖNORM EN 1992-1-1:2015 stellt der nationale Anhang ÖNORM B 1992-1-1:2018 eine weitere Gleichung zur Ermittlung der rissbreitenbegrenzenden Bewehrung, bei auf zentrischem Zwang beanspruchten Bauteilen, zur Verfügung, die aus Untersuchungen nach MAURER *et al.* (2005) und MAURER (2007) hervorgeht. Dieser Nachweis ist in Gleichung (4.6) angeführt: [Vgl. ÖNORM B 1992-1-1:2018 (2018); S. 33], [Vgl. MAURER *et al.* (2005); S. 481 f.] und [Vgl. MAURER (2007); S. 86 f.]

$$A_s = \frac{f_{ct,eff} \cdot A_{c,eff}}{\sigma_s} \geq \frac{k \cdot f_{ct,eff} \cdot A_{ct}}{f_{yk}} \quad (4.6)$$

mit

$A_{c,eff}$	wirksame Zugzonenfläche nach Gleichung (4.7)
σ_s	Stahlspannung nach Gleichung (4.8)
A_{ct}	Fläche der Betonzugzone im ungerissenen Zustand je Bauteilseite
k	Beiwert zur Berücksichtigung von nichtlinear verteilten Betonzugspannungen, die zum Abbau von Zwang führen $k = 1,0$ für Bauteildicken mit $h \leq 300 \text{ mm}$ $k = 0,65$ für Bauteildicken mit $h \geq 800 \text{ mm}$ Zwischenwerte dürfen linear interpoliert werden
f_{yk}	Charakteristischer Wert der Steckgrenze des Betonstahls

In Abweichung zum vorangegangenen Rissbreitennachweis nach ÖNORM EN 1992-1-1:2015 ist dabei der Wert für die wirksame Zugzonenfläche $A_{c,eff}$ für den Nachweis nach ÖNORM B 1992-1-1:2018 nach Gleichung (4.7) zu bestimmen. [Vgl. ÖNORM B 1992-1-1:2018 (2018); S. 33]

$$A_{c,eff} = b \cdot h_{c,ef} = b \cdot \min \left\{ k_2 \cdot (h - d); \frac{h}{2} \right\} \quad (4.7)$$

mit

b	Querschnittsbreite
$h_{c,ef}$	wirksame Zugzonenhöhe
k_2	Faktor, $k_2 = 2,5$ für $h \leq 5 \cdot (h - d)$ $k_2 = 5,0$ für $h \geq 30 \cdot (h - d)$ Zwischenwerte dürfen linear interpoliert werden
h	Querschnittshöhe
d	statische Nutzhöhe des Querschnitts

Die zugehörige Stahlspannung kann in Abhängigkeit der Rissbreite w_k nach Gleichung (4.8) ermittelt werden. [Vgl. GORIS und BENDER (2017); S. 289]

$$\sigma_s = \sqrt{\frac{w_k \cdot 3,48 \cdot 10^6}{\phi_s^*}} \quad (4.8)$$

mit

w_k	charakteristische Rissbreite
ϕ_s^*	Grenzdurchmesser der Stahlbewehrung $\phi_s^* = \phi_s \cdot (2,9/f_{ct,eff})$
ϕ_s	Durchmesser der Stahlbewehrung

Der Rissbreitennachweis, und somit die Ermittlung der erforderlichen Bewehrung, kann nach den zwei zuvor angeführten Nachweisformaten nach ÖNORM EN 1992-1-1:2015 sowie ÖNORM B 1992-1-1:2018 geführt werden.

Nach GORIS und BENDER (2017) muss jedoch nur der jeweilige Minimalwert der erforderlichen Bewehrung zur Begrenzung der Rissbreite in ein Bauteil eingelegt werden. [Vgl. GORIS und BENDER (2017); S. 289]

Abminderungsfaktoren für die Rissbreitennachweise gemäß ÖNORM B 1992-1-1:2018

Nach ÖNORM B 1992-1-1:2018, Abs. 10.2.2 dürfen bei Einhaltung gewisser Voraussetzungen folgende Annahmen getroffen werden: [Vgl. ÖNORM B 1992-1-1:2018 (2018); S. 32]

- 1) Wird der Rissbreitennachweis für den Belastungsfall „Abfließen der Hydratationswärme“ geführt, darf $f_{ct,eff}$ unter der Voraussetzung der Verwendung eines Betons der Festigkeitsentwicklung „Mittel“ (EM), „Langsam“ (EL) sowie „Sehr Langsam“ (EO)

gemäß Tabelle 4.1 und einer ausreichenden Nachbehandlung für die Ermittlung der Risschnittgröße mit $0,5 \cdot f_{ctm}$ angenommen werden.

- 2) Bei Zugspannungen infolge Zwang aus dem Abfließen der Hydratationswärme darf der Faktor k in Gleichung (4.3) und Gleichung (4.6) mit 0,8 multipliziert werden.
- 3) Werden langsam erhärtende Betone mit $r = f_{cm2}/f_{cm28} \leq 0,3$ verwendet, darf die erforderliche Bewehrung zur Begrenzung der Rissbreiten gemäß Gleichung (4.3) und Gleichung (4.6) mit einem Faktor von 0,85 verringert werden.

Tabelle 4.1 – Festigkeitsentwicklung des Betons
[Vgl. ÖNORM B 1992-1-1:2018 (2018); S. 12 – Tabelle 2]

Klasse ^a gemäß ÖNORM EN 1992-1-1	Klasse gemäß ÖNORM B 4710-1	Festigkeits- entwicklung
R	ES	Schnell
N	EM	Mittel
S	EL	Langsam
S	E0	Sehr Langsam
^a Diese Klasseneinteilung gilt unabhängig von der verwendeten Zementsorte und ist unabhängig von der Bezeichnung der Festigkeitsentwicklung von Zement gemäß ÖNORM EN 197-1.		

Die oben genannten Bedingungen werden für die in der *öbv-RL „Weiße Wannen“* angeführten Betonstandards BS 1 und BS 1 PLUS erfüllt. Einzige Ausnahme hiervon bildet der Betonstandard BS 1 für das Bemessungsmodell „Weiße Wanne klassisch“, der nicht mit ausreichender Sicherheit allgemein in die Festigkeitsentwicklung „Langsam“ (EL) oder Sehr langsam (E0) nach Tabelle 4.1 eingestuft werden kann. Somit darf bei Anwendung dieses Betonstandards die erforderliche Bewehrung zur Begrenzung der Rissbreite nicht mit dem Faktor 0,85 abgemindert werden, wenn hierfür notwendige Versuchswerte nicht ermittelt werden. [vgl. SCHLICKE (2019); *E-Mail*]

4.2 Bemessungsmodell „Weiße Wanne klassisch“

Die Ermittlung der erforderlichen Bewehrung zur Begrenzung der Rissbreite nach *öbv-RL „Weiße Wannen“* im Bemessungsmodell „Weiße Wanne klassisch“ erfolgt, in Abhängigkeit der zulässigen Rissbreite der jeweiligen Konstruktionsklasse sowie der vorliegenden Betondeckung, nach den in Abbildung 4.1, Abbildung 4.2 sowie Abbildung 4.3 abgebildeten Bemessungsdiagrammen. [Vgl. *öbv-RL „Weiße Wannen“* (2018); S. 14]

Da diese Diagramme für die dritte Auflage der *öbv-Richtlinie „Wasserundurchlässige Betonbauwerke – weiße Wannen“* aus dem Jahr 2009 erstellt wurden und für die nunmehr vorliegende vierte Auflage der Richtlinie aus dem Jahr 2018 unverändert übernommen wurden,

basieren die darin enthaltenen Bewehrungsangaben auf der Grundlage der ÖNORM EN 1992-1-1:2005²³ und ÖNORM B 1992-1-1:2007²⁴. Begründet wird diese Vorgehensweise einerseits mit der positiven Rückmeldung aus der Baupraxis betreffend das Verhältnis von erforderlicher rissbreitenbegrenzender Bewehrungsmenge zu gemessener Rissbreite und andererseits aus dem Umstand heraus, dass die Einhaltung der zulässigen Rissbreiten auch bei Einhaltung aller in der *öbv-RL „Weiße Wannan“* angeführten Qualitätskriterien nicht mit absoluter Sicherheit ausgeschlossen werden kann. [Vgl. MOSER (2019a); *Interview*]

Der Rissbreitennachweis in Unterabschnitt 4.1.1 nach alter und aktueller Normenlage ist ident. Eingangswerte für $f_{ct,eff}$ sowie $E_{cm,eff}$ und mögliche Abminderungsfaktoren wurden jedoch in der ÖNORM EN 1992-1-1:2015 und ÖNORM B 1992-1-1:2018 angepasst oder neu eingeführt. Für die Erstellung der Bemessungsdiagramme nach *öbv-RL „Weiße Wannan“* nach ÖNORM EN 1992-1-1:2005 und ÖNORM B 1992-1-1:2007 werden diese nachfolgend angeführt. [Vgl. MOSER (2019b); *Interview*]

- Mittelwert der wirksamen Zugfestigkeit des Betons zum Risszeitpunkt

$$f_{ct,eff} = 0,30 \cdot f_{ctm} \quad (4.9)$$

- Mittelwert des wirksamen Elastizitätsmoduls des Betons zum Risszeitpunkt

$$E_{ct,eff} = (f_{ct,eff}/f_{ctm})^{0,3} \cdot E_{cm} \quad (4.10)$$

- Beiwert zur Berücksichtigung des Einflusses der Spannungsverteilung innerhalb des Querschnitts vor der Erstrissbildung sowie der Änderung des inneren Hebelarmes gemäß Gleichung (4.3)

$$k_c = 1,00 \quad (4.11)$$

- Faktor, abhängig von der Dauer der Lasteinwirkung gemäß Gleichung (4.2)

$$k_t = 0,60 \quad (4.12)$$

Des Weiteren war in der ÖNORM B 1992-1-1:2007 noch kein Abminderungsfaktor für den Faktor k und eine generelle Abminderung der erforderlichen rissbreitenbegrenzenden Bewehrung bei Verwendung langsam erhärtender Betone in Gleichung (4.3) vorgesehen. [Vgl. ÖNORM B 1992-1-1:2007 (2007); S. 9 f.]

²³ ÖNORM EN 1992-1-1:2005 11 01: Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken – Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau

²⁴ ÖNORM B 1992-1-1:2007 02 01: Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken: – Teil 1-1: Grundlagen und Anwendungsregeln für den Hochbau – Nationale Festlegungen zu ÖNORM EN 1992-1-1, nationale Erläuterungen und nationale Ergänzungen

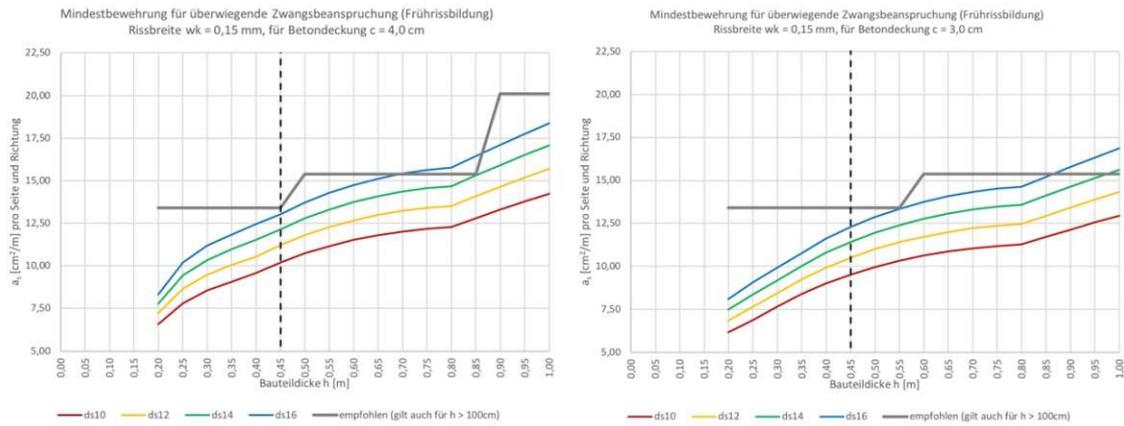


Abbildung 4.1 – Mindestbewehrung für überwiegende Zwangsbeanspruchung (Frührissbildung), Rissbreite $w_k = 0,15$ mm, für Betondeckungen $c = 4,0$ cm (links) und $c = 3,0$ cm (rechts)
Darstellung nach [öbv-RL „Weiße Wannen“ (2018); S. 14 f. – Abbildung 4-5 und Abbildung 4-6]

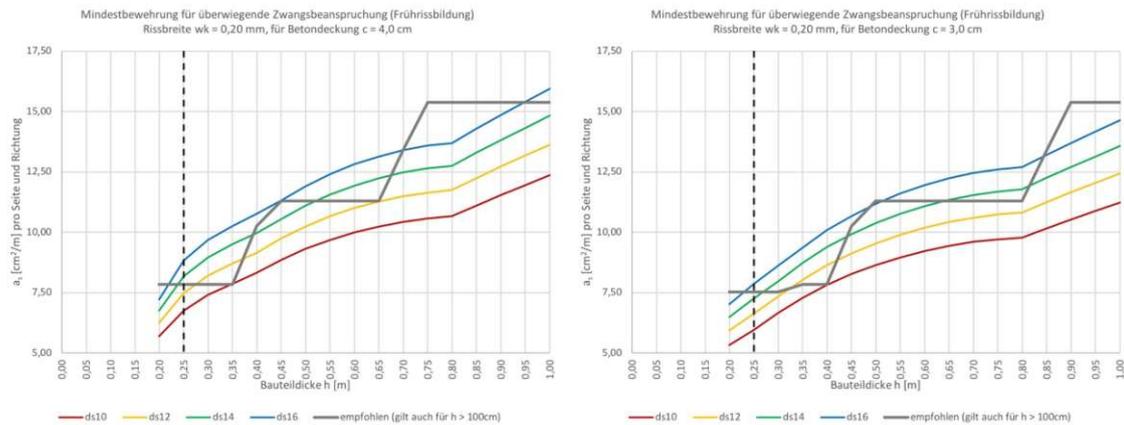


Abbildung 4.2 – Mindestbewehrung für überwiegende Zwangsbeanspruchung (Frührissbildung), Rissbreite $w_k = 0,20$ mm, für Betondeckungen $c = 4,0$ cm (links) und $c = 3,0$ cm (rechts)
Darstellung nach [öbv-RL „Weiße Wannen“ (2018); S. 15 f. – Abbildung 4-7 und Abbildung 4-8]



Abbildung 4.3 – Mindestbewehrung für überwiegende Zwangsbeanspruchung (Frührissbildung), Rissbreite $w_k = 0,25$ mm, für Betondeckungen $c = 4,0$ cm (links) und $c = 3,0$ cm (rechts)
Darstellung nach [öbv-RL „Weiße Wannen“ (2018); S. 16 f. – Abbildung 4-9 und Abbildung 4-10]

4.3 Bemessungsmodell „Weiße Wanne optimiert“

Der Nachweis der Gebrauchstauglichkeit bei überwiegender Zwangsbeanspruchung kann beim Bemessungsmodell „Weiße Wanne optimiert“ nach einer analytischen Berechnung gemäß *öbv-MB „Weiße Wanne optimiert“* bei statisch einfachen Systemen bauteilspezifisch oder allgemein über die Modellierung von thermomechanischen Simulationen erfolgen.

Für die, in dieser Diplomarbeit ausschließlich betrachteten und analysierten, Bodenplatten wird in den folgenden Unterabschnitten das Nachweisformat „Weiße Wanne optimiert“ näher betrachtet. Zuvor werden jedoch in Unterabschnitt 4.3.1 der Anwendungsbereich und die Voraussetzungen für die Anwendung der Bestimmungsgleichungen für das Bemessungsmodell „Weiße Wanne optimiert“ allgemein erörtert. [Vgl. *öbv-RL „Weiße Wannen“* (2018); S. 13 f.]

4.3.1 Anwendungsbereich und Voraussetzungen

Das Bemessungsmodell „Weiße Wanne optimiert“ in Verbindung mit dem analytischen Bemessungsverfahren darf unter folgenden Voraussetzungen angewendet werden: [Vgl. *öbv-MB „Weiße Wanne optimiert“* (2018); S. 2]

- Verwendung des Betonstandards BS 1 PLUS
- Einhaltung von Frischbetontemperaturen $\leq 22\text{ °C}$
- Anordnung von Fugenabständen gemäß *öbv-RL „Weiße Wannen“*

Allgemein wird das zeitabhängige Verhalten des erhärtenden Betons während der Hydratation durch eine äquivalente Temperatureinwirkung ΔT_{eq} und einer zugehörigen Zugfestigkeit $f_{ct,zugh}$ zum Zeitpunkt der Gefahr von Rissbildung, auf der sicheren Seite liegend, abgeschätzt.

Voraussetzung für die Anwendung der Bestimmungsgleichungen ist die Einhaltung gewisser Grenzen in der Wärme- und Festigkeitsentwicklung des verwendeten Betonstandards. Die Bandbreite der zulässigen Wärmeentwicklung bezieht sich mit den nachstehenden Gleichungen (4.13), (4.14) sowie (4.15) auf die erforderlichen Messergebnisse des Langavantversuchs gemäß ONR 23303:2010²⁵. Zusätzlich zu diesen Grenzen darf die Wärmeentwicklung zum Bezugszeitpunkt nach 70 h das Maximum von 270 J/g nicht überschreiten. Eine graphische Darstellung dieser Funktionen wird in Abbildung 4.4 gezeigt. [Vgl. *öbv-MB „Weiße Wanne optimiert“* (2018); S. 3 f.]

²⁵ ONR 23303:2010 09 01: Prüfverfahren Beton (PVB) – Nationale Anwendung der Prüfnormen für Beton und seiner Ausgangsstoffe

- Untergrenze Hydratationswärme

$$Q(t)/Q(70h) > 1,21 \cdot \exp \left\{ -8,0 \cdot \left[\ln \left(1 + \frac{t}{1,6} \right) \right]^{-2,5} \right\} \quad (4.13)$$

- erste Obergrenze Hydratationswärme

$$Q(t)/Q(70h) < 1,12 \cdot \exp \left\{ -3,5 \cdot \left[\ln \left(1 + \frac{t}{3,0} \right) \right]^{-3,0} \right\} \quad (4.14)$$

- zweite Obergrenze Hydratationswärme

$$Q(t)/Q(70h) < 1,53 \cdot \exp \left\{ -8,0 \cdot \left[\ln \left(1 + \frac{t}{1,6} \right) \right]^{-2,2} \right\} \quad (4.15)$$

mit

$Q(t)$ Hydratationswärme zum Messzeitpunkt

$Q(70h)$ 70 h-Wert der Hydratationswärme

t Messzeitpunkt

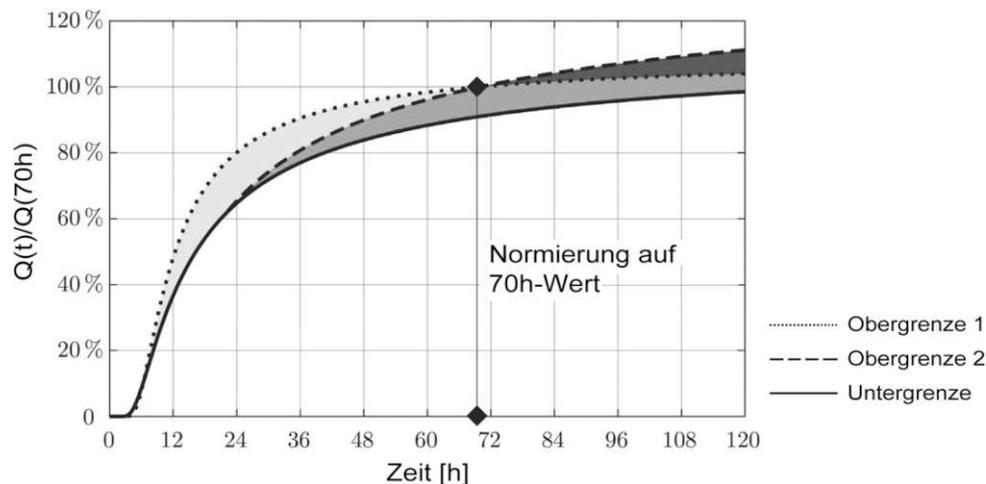


Abbildung 4.4 – Anwendungsvoraussetzung hinsichtlich Wärmeentwicklung des Betons; Darstellung nach [öbv-MB „Weiße Wanne optimiert“ (2018); S. 3 – Abbildung 2-1]

Mit Blick auf die Festigkeitsentwicklung des Betons werden die Anwendungsgrenzen nach den Modellvorstellungen von WESCHE (1993) in den Gleichungen (4.16) und (4.17) für die Unter- bzw. Obergrenze des Elastizitätsmoduls sowie in Gleichung (4.18) für die Untergrenze der Zugfestigkeit definiert. Die zugehörigen Graphiken zeigt Abbildung 4.5. [Vgl. öbv-MB „Weiße Wanne optimiert“ (2018); S. 4] und [WESCHE (1993); S. 265 f.]

- Untergrenze Elastizitätsmodul

$$E_c(t_{eff}) > E_{cm} \cdot \exp\{-1,34 \cdot (t_{eff}^{-0,7} - 28^{-0,7})\} \quad (4.16)$$

- Obergrenze Elastizitätsmodul

$$E_c(t_{eff}) < E_{cm} \cdot \exp\{-0,80 \cdot (t_{eff}^{-0,3} - 28^{-0,3})\} \quad (4.17)$$

- Untergrenze Zugfestigkeit

$$f_{ctm}(t_{eff}) > f_{ctm} \cdot \exp\{-2,67 \cdot (t_{eff}^{-0,7} - 28^{-0,7})\} \quad (4.18)$$

mit

$E_c(t)$ Elastizitätsmodul des Betons in Abhängigkeit des effektiven
Betonalters in Tagen

E_{cm} 28-Tage-Wert des Elastizitätsmodul des Betons

t_{eff} effektives Betonalter in Tagen

$f_{ctm}(t_{eff})$ mittlere Betonzugfestigkeit in Abhängigkeit des effektiven
Betonalters

f_{ctm} 28-Tage-Wert der mittleren Betonzugfestigkeit

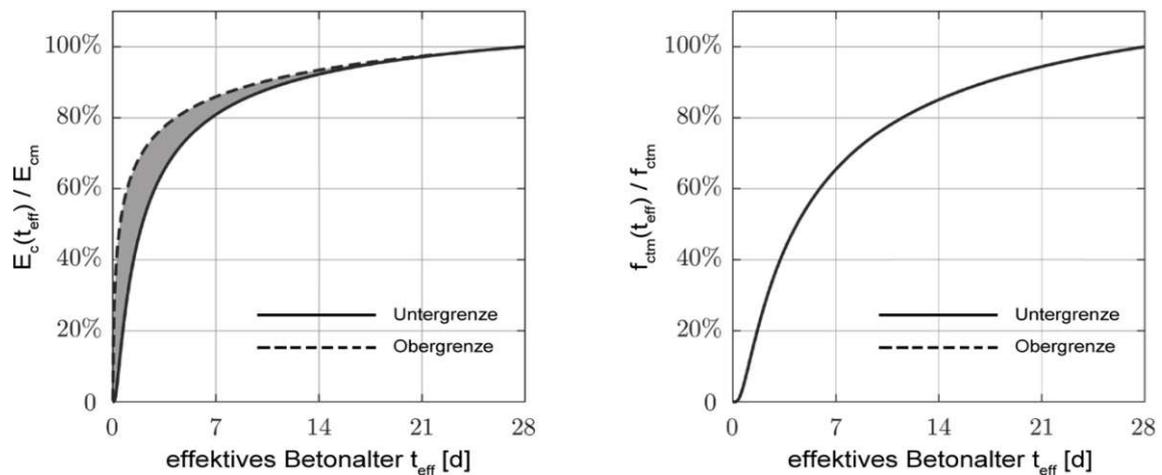


Abbildung 4.5 – Anwendungsvoraussetzung hinsichtlich Entwicklung von Elastizitätsmodul und Zugfestigkeit; Darstellung nach [öbv-MB „Weiße Wanne optimiert“ (2018); S. 4 – Abbildung 2-2]

Hier müssen als Eingangswerte in die Bestimmungsgleichungen zuvor Werte betreffend der Wärmeentwicklung des verwendeten Betonstandards BS 1 PLUS und der klimatischen Randbedingungen festgelegt werden. Für die maximale Temperaturzunahme des Betons gemäß Langavant gilt hierzu Gleichung (4.19). [Vgl. öbv-MB „Weiße Wanne optimiert“ (2018); S. 5]

$$\Delta T_{Q,max} = \frac{Q_{max}}{S_c} \cdot m_{BM} \quad (4.19)$$

mit

Q_{max}	maximale Hydratationswärme gemäß Langavantversuch nach ONR 23303:2010
S_c	Wärmespeicherkapazität
m_{BM}	Bindemittelmenge

Zusätzlich zu diesem Wert wird ein Vorhaltemaß zur Berücksichtigung des Unterschiedes zwischen Frischbetontemperatur und mittlerer Tagestemperatur für Bodenplatten definiert. Eine einfache Prognose dieser Größe ist schwierig, da sie neben klimatischen Randbedingungen auch vom Dickenverhältnis zwischen erhärtendem Bauteil und behinderndem Bauteil abhängig ist. Im *öbv-MB „Weiße Wanne optimiert“* wird dieses Vorhaltemaß ΔT_{nom} vorerst mit 5 °C festgelegt.

Klimatisch wirkt sich vor allem die Schwankung der Temperatur im Tagesverlauf auf den anzusetzenden Zwang aus Abfließen der Hydratationswärme, besonders bei dünnen Querschnitten, aus. Dieser Einfluss wird durch die Amplitude der Tagestemperaturschwankungen $\Delta T_{a,var}$ berücksichtigt. Für praktische Anwendungen wird im *öbv-MB „Weiße Wanne optimiert“* ein Wert für $\Delta T_{a,var} \geq 10\text{ °C}$ empfohlen.

Neben diesen Eingangswerten müssen die Materialkennwerte des verwendeten Betonstandards BS 1 PLUS gemäß der *öbv-RL „Weiße Wannen“* versuchstechnisch ermittelt werden. Diese betreffen die zuvor genannte maximale Temperaturzunahme des Betons durch Ermittlung der maximalen Hydratationswärme Q_{max} und der Wärmespeicherkapazität S_c sowie den mittleren Elastizitätsmodul des Betons E_{cm} , die mittlere Zugfestigkeit f_{ctm} und den Wärmeausdehnungskoeffizienten des Betons. Liegen keine genauen Werte für die Vorbemessung vor, kann $\alpha_T = 1,0 \cdot 10^{-5}/K$ angenommen werden.

Voraussetzung für die Anwendung der nachfolgenden Bestimmungsgleichungen ist die projektspezifische Ermittlung der genannten materialbezogenen Eingangsgrößen. Im *öbv-MB „Weiße Wanne optimiert“* werden hierzu für die Vorbemessung Anhaltswerte für neun verschiedene Betone des Betonstandards BS 1 PLUS gemäß Tabelle 4.2 angegeben.

Die mittlere Zugfestigkeit f_{ctm} wird in der Höhe des Laborwertes für die Nachweisführung angesetzt und nicht auf eine Bauwerkszugfestigkeit umgerechnet. Eine Abminderung auf den 5%-Fraktile-Wert kann ausbleiben, da etwaige Schwankungen in der Zugfestigkeit durch lokale Umlagerungen im Querschnitt aufgenommen werden können. [Vgl. *öbv-MB „Weiße Wanne optimiert“* (2018); S. 5 und S. 15]

Tabelle 4.2 – Anhaltswerte für relevante Materialeigenschaften des Betonstandards BS 1 PLUS nach FFG (2011) und VÖZ (2012) [Vgl. *öbv-MB „Weiße Wanne optimiert“* (2018); S. 7 – Tabelle 3-1]

Typ	Wärme Q_{max}	BS 1 A PLUS			BS 1 C PLUS			Wärme- speicherung S_c
		m_{BM}	E_{cm}	f_{ctm}	m_{BM}	E_{cm}	f_{ctm}	
[–]	[J/g]	[kg/m ³]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[kg/m ³]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[kJ/(°C · m ³)]
1	257,3	312	34100	3,95	362	38100	4,05	2400
2	269,1	308	34200	3,60	345	36700	4,15	
3	269,9	316	35300	3,50	363	35500	3,60	
4	288,7	354	28300	3,30	385	32900	4,40	
5	255,0	-	-	-	330	26500	3,05	

4.3.2 Gebrauchstauglichkeitsnachweis nach *öbv-MB „Weiße Wanne optimiert“*

Im Nachweis der Gebrauchstauglichkeit nach *öbv-MB „Weiße Wanne optimiert“* für Bodenplatten werden zwei kritische Szenarien betreffend die Rissgefahr beim Abfließen der Hydratationswärme untersucht. Diese sind: [Vgl. *öbv-MB „Weiße Wanne optimiert“* (2018); S. 5]

- frühzeitige Gefahr von Biegerissen an der Oberseite
- Gefahr von Biegerissen an der Plattenunterseite sowie bei externer Behinderung die Gefahr von Trennrissen bei Erreichen der Ausgleichstemperatur

Für die Beurteilung von Biegerissgefahr an der Plattenoberseite wird das zugehörige Temperaturäquivalent $\Delta T_{M,eq,F,o}$ nach Gleichung (4.20) bestimmt.

$$\Delta T_{M,eq,F,o} = 0,6 \cdot \left[\Delta T_{nom} + \Delta T_{Q,max} \cdot \left(0,8 - \frac{1,1}{1,2 + h_F} \right) + \frac{\Delta T_{a,var}}{(0,8 + h_F)^4} \right] \quad (4.20)$$

mit

h_F Bodenplattendicke

Im *öbv-MB „Weiße Wanne optimiert“* wird zu dieser Gleichung ein Abminderungsfaktor in Abhängigkeit der Bauteildicke bei Ausdehnung der Nachbehandlungsdauer von 36 h auf 72 h angegeben. Da die Nachbehandlung gemäß *öbv-RL „Weiße Wannen“*, Abs. 8.1 ohnedies für mindestens drei Tage aufrechterhalten werden muss, kann nach SCHLICKE (2019) dieser Reduktionsfaktor k_{NB} gemäß Gleichung (4.21) eine generelle Anwendung in der Nachweisführung finden. [Vgl. *öbv-MB „Weiße Wanne optimiert“* (2018); S. 5], [Vgl. *öbv-RL „Weiße Wannen“* (2018); S. 66] und [Vgl. SCHLICKE (2019); E-Mail]

$$k_{NB} = 1 - \frac{1}{(0,9 + h_F)^4} \quad (4.21)$$

Zugehörig zu diesem Temperaturäquivalent wird die Zugfestigkeit für das erste kritische Szenario in Abhängigkeit der Bauteildicke nach Gleichung (4.22) festgelegt.

$$f_{ct,zugh,F,o} = f_{ctm} \cdot \left(1,3 - \frac{1,2}{0,8 + h_F}\right) \leq f_{ctm} \quad (4.22)$$

Die Gefahr von Makrorissbildung an der Plattenoberseite ist nahezu unabhängig von der horizontalen Bodensteifigkeit. Die Aktivierung des Eigengewichtes der Bodenplatte führt alleinig zu einer Verkrümmungsbehinderung gemäß Abbildung 3.4 (oben) und somit zu Biegezwang. Die Größe des Zwangsmomentes zur nachfolgenden Bestimmung der vorliegenden Globalspannung kann nach Gleichung (4.23) ermittelt werden.

Anzumerken ist, dass bei Bodenplatten in Abhängigkeit von Länge und Breite der Biegezwang sowie Zwangsnormalkräfte in beide Richtungen der Platte aufgebaut werden. Nachstehende Gleichungen werden für die x-Richtung betrachtet, gelten jedoch auch für die y-Richtung bei Beachtung der Indizes. [Vgl. *öbv-MB „Weiße Wanne optimiert“* (2018); S. 9]

$$M_{F,o,x} = -\frac{\alpha_T \cdot \Delta T_{M,eq,F,o}}{h_F} \cdot E_F I_F \leq \frac{\gamma_c \cdot A_F \cdot L_{F,x,eff}^2}{2} \quad \text{und} \quad N_{F,zugh,x} = 0 \quad (4.23)$$

mit

α_T	Wärmeausdehnungskoeffizient
$E_F I_F$	Biegesteifigkeit der Bodenplatte in der betrachteten Richtung
γ_c	Wichte des Betons
A_F	Querschnittsfläche der Bodenplatte in der betrachteten Richtung
$L_{F,x,eff}$	Abstand des freien Randes der Bodenplatte zum gedachten Verformungsruhepunkt in der x-Richtung

Durch einen Vergleich der Spannungen infolge Zwangsschnittgrößen mit der mittleren Zugfestigkeit zum Zeitpunkt des Temperaturmaximums an der Plattenunterseite wird letztendlich die Gefahr erhärtungsbedingter Makrorissbildung an der Plattenoberseite gemäß Gleichung (4.24) beurteilt. [Vgl. *öbv-MB „Weiße Wanne optimiert“* (2018); S. 10 und S. 15]

$$\sigma_{F,o,x} = \min \left\{ \frac{\alpha_T \cdot \Delta T_{M,eq,F,o}}{2} \cdot E_F; 3 \cdot \frac{\gamma_c \cdot L_{F,x,eff}^2}{h_F} \right\} \leq f_{ct,zugh,F,o} \quad (4.24)$$

Nach dem Nachweisformat „Makrorissindex“ im *öbv-MB „Weiße Wanne optimiert“* kann diese Gegenüberstellung auch nach Gleichung (4.25) durchgeführt werden. Der Verhältniswert von Spannung infolge Zwangsschnittgrößen und mittlerer Zugfestigkeit wird auch als Rissindex i bezeichnet. [Vgl. *öbv-MB „Weiße Wanne optimiert“* (2018); S. 15]

$$i_{F,o,x} = \frac{\sigma_{F,o,x}}{f_{ct,zugh,F,o}} \leq 1,0 \quad (4.25)$$

Die Temperaturäquivalente für das zweite kritische Szenario, der Gefahr von Biegerissen an der Plattenunterseite sowie bei externer Behinderung die Gefahr von Trennrissen bei Erreichen der Ausgleichstemperatur, werden in dem *öbv-MB „Weiße Wanne optimiert“* nach Gleichung (4.26) und (4.27) errechnet. [Vgl. *öbv-MB „Weiße Wanne optimiert“* (2018); S. 6]

$$\Delta T_{M,eq,F,u} = -0,8 \cdot \left[\Delta T_{nom} + \Delta T_{Q,max} \cdot \left(0,8 - \frac{0,6}{0,5 + h_F} \right) + \frac{2 \cdot \Delta T_{a,var}}{(0,8 + h_F)^4} \right] + \Delta T_{M,eq,F,o} \quad (4.26)$$

$$\Delta T_{N,eq,F} = -0,8 \cdot \left[\Delta T_{nom} + \Delta T_{Q,max} \cdot \left(1 - \frac{0,6}{0,5 + h_F} \right) + \frac{\Delta T_{a,var}/2}{(0,8 + h_F)^4} \right] \quad (4.27)$$

Die zugehörige Zugfestigkeit für das zweite Szenario wird nach Gleichung (4.28) mit f_{ctm} fixiert.

$$f_{ct,zugh,F,u} = f_{ctm} \quad (4.28)$$

Zwar spricht das *öbv-MB „Weiße Wanne optimiert“* der vorangegangenen Gleichung explizit nur Bodenplatten mit einer Bauteildicke $h_F \geq 0,5$ m ihre Gültigkeit zu, jedoch wird im gleichen Merkblatt die Gleichung (4.28) auch bei einer Bodenplatte mit $h_F = 0,35$ m angewendet. Es wird daher angenommen, dass die Gleichung (4.28) allgemeingültig für Bodenplatten von 0,20 – 5,00 m ist. [Vgl. *öbv-MB „Weiße Wanne optimiert“* (2018); S. 6 und S. 21]

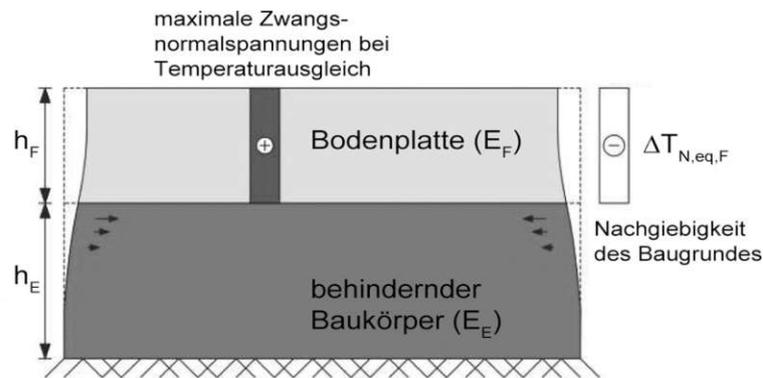


Abbildung 4.6 – Behinderungssituation von Bodenplatten – horizontale Behinderung durch den Baugrund; Darstellung nach [öbv-MB „Weiße Wanne optimiert“ (2018); S. 9 – Abbildung 4-3]

Die Gefahr von später Trenn- bzw. Biegerissbildung an der Plattenunterseite kann in Einzelfällen infolge starker Horizontalbehinderung durch den Baugrund für die Nachweisführung maßgebend werden. Zu diesem späten Zeitpunkt liegen an der Plattenunterseite Biegezugspannungen vor, die sich mit etwaigen Normalzugspannungen aus der horizontalen Boden-Bauwerk-Interaktion ungünstig überlagern. Graphisch können diese Biegezugsspannungen an der Plattenunterseite nach Abbildung 3.4 (unten) und die Normalzugspannungen gemäß Abbildung 4.6 illustriert und das zugehörige Biegemoment nach Gleichung (4.29) sowie die zugehörige Normalkraft in Gleichung (4.30) bestimmt werden. [Vgl. öbv-MB „Weiße Wanne optimiert“ (2018); S. 9]

$$M_{F,u,x} = -\frac{\alpha_T \cdot \Delta T_{M,eq,F,u}}{h_F} \cdot E_F I_F \leq \frac{\gamma_c \cdot A_F \cdot L_{F,x,eff}^2}{2} \quad (4.29)$$

$$N_{F,zugh,x} = -a_{F,x} \cdot \alpha_T \cdot \Delta T_{N,eq,F} \cdot E_F A_F \quad (4.30)$$

mit

$a_{F,x}$ Behinderungsgrad der Bodenplatte für horizontale Ausdehnung in x-Richtung gemäß Gleichung (4.31)

$E_F A_F$ Dehnsteifigkeit der Bodenplatte in der betrachteten Richtung

Der Behinderungsgrad a_F für die horizontale Verkürzung der Bodenplatte kann aufgrund der großen flächigen Ausdehnung in Abhängigkeit des Dehnsteifigkeitsverhältnisses zwischen Bodenplatte und Baugrund ermittelt werden. Auf der sicheren Seite liegend, kann dieser mit Beachtung der fortschreitenden Steifigkeitsentwicklung sowie eines Spannungsausbreitungswinkels im Boden nach SIMONS (1993) in Gleichung (4.31) berechnet werden. [Vgl. öbv-MB „Weiße Wanne optimiert“ (2018); S. 10]

$$a_{F,x} = \frac{1}{1 + \frac{E_F A_F}{E_B A_{B,eff,x}}} \quad (4.31)$$

mit

$E_B A_{B,eff,x}$ Dehnsteifigkeit des aktivierten Baugrunds in der betrachteten Richtung mit

$$A_{B,eff,x} \approx \left(L_{F,y} + 2 \cdot 0,6 \cdot \frac{2}{3} \cdot L_{F,x,eff} \right) \cdot \frac{2}{3} \cdot L_{F,x,eff}$$

$L_{F,y}$ tatsächliche Abmessung der Bodenplatte in y-Richtung

Final wird der Nachweis im gedachten Verformungsruehpunkt der Bodenplatte für die Unterseite geführt. Die maßgebende Globalspannung infolge Zwangsschnittgrößen wird an dieser Stelle für die Plattenunterseite nach Gleichung (4.32) berechnet. [Vgl. *öbv-MB „Weiße Wanne optimiert“* (2018); S. 10]

$$\sigma_{F,u,x} = -a_{F,x} \cdot \alpha_T \cdot \Delta T_{N,eq,F} \cdot E_F + \min \left\{ -\frac{\alpha_T \cdot \Delta T_{M,eq,F,u}}{2} \cdot E_F; 3 \cdot \frac{\gamma_c \cdot L_{F,x,eff}^2}{h_F} \right\} \quad (4.32)$$

Durch einen Vergleich der Spannungen infolge Zwangsschnittgrößen mit der mittleren Zugfestigkeit zum Zeitpunkt des Temperatenausgleichs wird letztendlich die Gefahr erhärtungsbedingter Trenn- bzw. Biegerissbildung gemäß Gleichung (4.33) beurteilt. [Vgl. *öbv-MB „Weiße Wanne optimiert“* (2018); S. 10 & S. 15]

$$\sigma_{F,u,x} \leq f_{ct,zugh,F,u} \quad (4.33)$$

Nach dem Nachweisformat „Makrorissindex“ im *öbv-MB „Weiße Wanne optimiert“* kann diese Gegenüberstellung auch nach Gleichung (4.34) durchgeführt werden. [Vgl. *öbv-MB „Weiße Wanne optimiert“* (2018); S. 15]

$$i_{F,u,x} = \frac{\sigma_{F,u,x}}{f_{ct,zugh,F,u}} \leq 1,0 \quad (4.34)$$

Gelingt der Nachweis – liegen also die Globalspannungen unter der zugehörigen mittleren Zugfestigkeit oder anders ausgedrückt liegt der Rissindex i unter 1,0 – bleibt die Konstruktion rissfrei und somit ist keine aktive Rissbreitenbegrenzung mit Bewehrung erforderlich.

In diesen Fällen ist lediglich eine Mindestbewehrung zur Sicherstellung einer robusten Oberfläche nach Gleichung (4.35) anzuordnen. [Vgl. *öbv-RL „Weiße Wannen“* (2018); S. 17]

$$A_{s,min} = 0,07 \cdot A_c \cdot \frac{f_{ctm}}{f_{yk}} \quad (4.35)$$

mit

$A_{s,min}$	konstruktive Mindestbewehrung zur Sicherstellung einer robusten Oberfläche
A_c	Gesamtfläche des Betonquerschnitts
f_{ctm}	versuchstechnisch ermittelte mittlere Zugfestigkeit des Betons
f_{yk}	charakteristischer Wert der Steckgrenze des Betonstahls

4.3.3 Begrenzung der Rissbreite unter Beachtung der Verformungskompatibilität

Gelingt der vorstehende Nachweis in Unterabschnitt 4.3.2 nicht – liegen also die Globalspannungen über der zugehörigen mittleren Zugfestigkeit oder anders ausgedrückt liegt der Rissindex i über 1,0 – kommt es im Betonbauteil zu Rissbildung. Übersteigt die Breite der so entstehenden primären Risse ohne Bewehrung die zulässige Rissbreite w_{rest} , müssen im Umfeld dieser primären Risse weitere Sekundärrisse erzeugt werden, bis das Rissystem die behinderte Verformung aufnimmt, während der Primärriss auf die zulässige Rissbreite begrenzt bleibt. Eine graphische Illustration dieser Zusammenhänge liefert Abbildung 4.7. [Vgl. SCHLICKE und TUE (2016); S. 122]

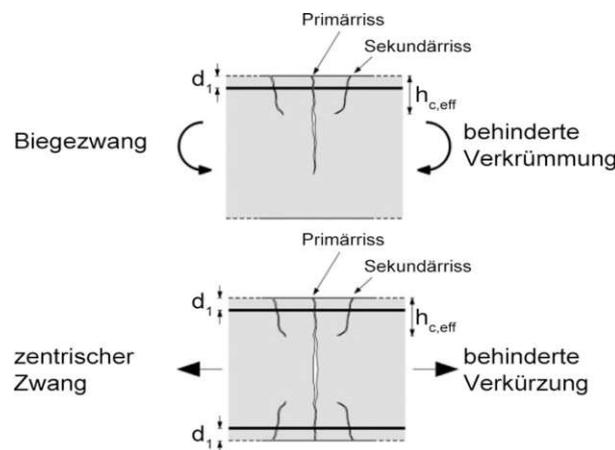


Abbildung 4.7 – Rissysteme je nach Zwangsbeanspruchung, bestehend aus geometrisch vorgegebenem Primärriss und Sekundärrissen infolge der Bewehrung; Darstellung nach [SCHLICKE und TUE (2016); S. 122 – Bild 3]

Die in einem Primärriss aufzunehmende Verformung entspricht der Rissbreite des Risses, die sich ohne Bewehrung ergeben würde. Diese kann in Abhängigkeit des Abstandes der Risse zueinander gemäß Gleichung (3.3) und der behinderten Verformung zwischen diesen Rissen nach Gleichung (4.36) bestimmt werden. [Vgl. SCHLICKE und TUE (2016); S. 122]

$$w_{rest} = \frac{\sigma_{rest}}{E_{c,eff}} \cdot l_{cr} \quad (4.36)$$

mit

σ_{rest}	maßgebende Zwangsspannung
$E_{c,eff}$	Elastizitätsmodul des Betons zum Betrachtungszeitpunkt
l_{cr}	Abstand der primären Risse zueinander

Die erforderliche Sekundärrissanzahl kann nach BÖDEFELD (2010) gemäß Gleichung (4.37) ermittelt werden. [Vgl. SCHLICKE und TUE (2016); S. 122 f.]

$$n = \left(\frac{w_{rest}}{w_k} - 1 \right) \cdot 1,1 \quad (4.37)$$

mit

n	Anzahl der erforderlichen Sekundärrisse als natürliche Zahl
w_k	zulässige Rissbreite gemäß den Anforderungen

Letztendlich kann die erforderliche Bewehrung zur Begrenzung der Rissbreite nach BÖDEFELD (2010) anhand der nachstehenden Gleichung (4.38) bestimmt werden. [Vgl. SCHLICKE und TUE (2016); S. 123]

$$A_{s,erf} = \sqrt{\frac{d_s \cdot b^2 \cdot d_1^2 \cdot f_{ctm,eff} \cdot (0,69 + 0,34 \cdot n)}{w_k \cdot E_s}} \quad (4.38)$$

mit

d_s	Bewehrungsdurchmesser
b	Querschnittsabmessung senkrecht zur Dicke
$f_{ctm,eff}$	Betonzugfestigkeit zum Betrachtungszeitpunkt
E_s	Elastizitätsmodul der Bewehrung

5 Vergleichende Berechnungen für Bodenplatten

Im nachfolgenden Kapitel werden die, in Kapitel 4 – Bemessungsmodelle, erörterten theoretischen Grundlagen für den Gebrauchstauglichkeitsnachweis bei überwiegender Zwangsbeanspruchung für Bodenplatten anhand verschiedenster Eingangsparameter ausgewertet und verglichen. Die erforderliche rissbreitenbegrenzende Bewehrung sowie die Mindestbewehrung zur Sicherstellung einer robusten Oberfläche werden hierzu gemäß

- *öbv-RL „Weiße Wannen“* (Bemessungsmodell „Weiße Wanne klassisch“),
- *öbv-MB „Weiße Wanne optimiert“* (Bemessungsmodell „Weiße Wanne optimiert“),
- ÖNORM EN 1992-1-1:2015 sowie
- ÖNORM B 1992-1-1:2018

in Abhängigkeit der Konstruktionsklassen berechnet und gegenübergestellt. In den folgenden Abschnitten werden das Bemessungsmodell „Weiße Wanne klassisch“ mit *BM „WW klassisch“* sowie das Bemessungsmodell „Weiße Wanne optimiert“ als *BM „WW optimiert“* abgekürzt.

5.1 Vergleich *BM „WW klassisch“* versus ÖNORM

Der Vergleich der erforderlichen rissbreitenbegrenzenden Bewehrung gemäß den Bemessungsdiagrammen aus der *öbv-RL „Weiße Wanne“* und dieser gemäß ÖNORM EN 1992-1-1:2015 sowie ÖNORM B 1992-1-1:2018 erfolgt anhand einer Tabellenkalkulation in Microsoft Excel©.

Nach MOSER (2019a) wurden die Bemessungsdiagramme auf Grundlage der damals gültigen ÖNORM EN 1992-1-1:2005 und ÖNORM B 1992-1-1:2007 erstellt und unverändert in die vierte Ausgabe der Richtlinie übernommen. Ein Vergleich der erforderlichen Bewehrungsmengen ist jedoch aufgrund des unveränderten Formelapparates zur Nachweisführung möglich. [Vgl. MOSER (2019a); Interview]

Basis für die nachfolgende Auswertung bilden die Gleichungen (4.1) bis (4.8) aus Abschnitt 4.1 mit der Annahme, dass Bodenplatten auf zentrischen Zwang beim Abfließen der Hydratationswärme für den Nachweis der Begrenzung der Rissbreite bemessen werden müssen. Die erforderliche Bewehrungsmenge nach *öbv-RL „Weiße Wannen“* muss hierzu auf der Unter- und Oberseite je Richtung angeordnet werden. Als Festigkeitsklasse des Betons wird C 25/30 mit den damit verbundenen normgemäßen Materialkennwerten unterstellt. [Vgl. *öbv-RL „Weiße Wannen“* (2018); S. 13 f.]

5.1.1 Eingangswertparameter *BM „WW klassisch“* versus ÖNORM

Die Eingangswertparameter wurden nach MOSER (2019a), SCHLICKE (2019) sowie ÖNORM EN 1992-1-1:2015 und ÖNORM B 1992-1-1:2018 festgelegt. Unterschiedliche Parameter finden sich hierzu in Tabelle 5.1 zusammengefasst.

Tabelle 5.1 – Eingangswerte für den Rissbreitennachweis nach *öbv-RL „Weiße Wannan“* und ÖNORM EN 1992-1-1:2015 sowie ÖNORM B 1992-1-1:2018

Eingangswert	<i>BM „WW klassisch“</i>	ÖNORM EN 1992-1-1:2015 ÖNORM B 1992-1-1:2018
$f_{ct,eff}$	$0,30 \cdot f_{ctm}$	$0,50 \cdot f_{ctm}$
$E_{cm,eff}$	$(0,30)^{0,3} \cdot E_{cm}$	$(0,50)^{0,3} \cdot E_{cm}$
Abminderungsfaktor gemäß ÖNORM B 1992-1-1:2018; Abs. 10.2.2 für k	1,00	0,80
Abminderungsfaktor gemäß ÖNORM B 1992-1-1:2018; Abs. 10.2.2 für $A_{s,erf}$	1,00	1,00 für den Betonstandard BS 1 0,85 für den Betonstandard BS 1 PLUS

Weitere Eingangswerte können dem Anhang A.1 in Abhängigkeit der Konstruktionsklasse sowie der Betondeckung entnommen werden.

5.1.2 Auswertung *BM „WW klassisch“* versus ÖNORM

Da ein Vergleich der erforderlichen Bewehrungsmengen analog den Bemessungsdiagrammen gemäß *öbv-RL „Weiße Wannan“* zu unübersichtlichen Graphiken führen würde, wird in Abbildung 5.1 exemplarisch die Auswertung für die Konstruktionsklasse Kon_1 mit einer zulässigen Rissbreite $w_k = 0,20$ mm und einer Betondeckung $c_{nom} = 4,0$ cm für einen Bewehrungsdurchmesser $d_s = 14$ mm erörtert.

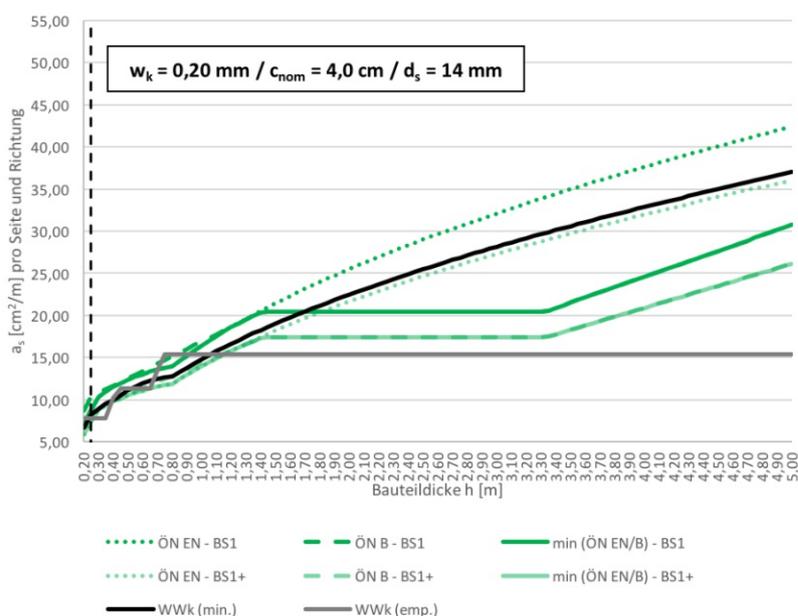


Abbildung 5.1 – Mindestbewehrungsvergleich zur Begrenzung der Rissbreite gemäß *öbv-RL „Weiße Wannen“* / ÖNORM EN 1992-1-1:2015 und ÖNORM B 1992-1-1:2018 für die Konstruktionsklasse Kon₁ ($c_{nom} = 4,0 \text{ cm} / d_s = 14 \text{ mm}$)

In Abbildung 5.1 ist deutlich ersichtlich, dass die Bewehrungsangaben für die Mindestbewehrung in den Bemessungsdiagrammen der *öbv-RL „Weiße Wannen“* für den Betonstandard BS 1 (schwarze Linie) für Bauteildicken von 0,25 – 1,70 m unter den normgemäßen Werten (grüne Volllinie) zu liegen kommen und somit für diesen Bereich auf der unsicheren Seite liegen. Dieser Sachverhalt resultiert aus dem Umstand, dass der verwendete Betonstandard BS 1 nach SCHLICKE (2019) nicht mit Sicherheit als langsam erhärtender Beton eingestuft werden kann und somit auch keine um 15 % reduzierte Mindestbewehrung angeordnet werden darf. Eine Erklärung diesbezüglich wurde bereits in Abschnitt 4.2 nach MOSER (2019) gegeben.

Bei Verwendung des Betonstandards BS 1 PLUS im *BM „WW klassisch“* kommt die erforderliche Bewehrung zur Begrenzung der Rissbreite im gesamten Auswertungsbereich unter den Werten nach *öbv-RL „Weiße Wannen“* (pastellgrüne Volllinie), und daher auf der sicheren Seite, zu liegen. Diese Erkenntnisse gelten jedoch streng genommen nur für den Anwendungsbereich von Bauteildicken von $h = 0,25 - 1,00 \text{ m}$. Für dickere Bodenplatten wird ein quadratisches Bewehrungsnetz mit $\emptyset 14/10 \text{ cm}$ ($15,39 \text{ cm}^2/\text{m}$, graue Volllinie) für die Konstruktionsklasse Kon₁ bei einer Betondeckung von $c_{nom} = 4,00 \text{ cm}$ nach Richtlinie empfohlen. Die normgemäßen Berechnungen liefern in diesem Bereich von 1,00 – 5,00 m unabhängig vom verwendeten Betonstandard aber größere erforderliche Bewehrungsmengen. Werden alle Bewehrungsverläufe von $d_s = 10 - 20 \text{ mm}$ für die Konstruktionsklasse Kon₁ / $c_{nom} = 4,00 \text{ m}$ in einem Diagramm zusammengefasst für den Betonstandard BS 1 betrachtet, wird ersichtlich, dass die Bewehrungsangaben laut *öbv-RL „Weiße Wannen“* generell unter den normgemäß berechneten Werten, wie in Abbildung 5.2 dargestellt, zu liegen kommen.

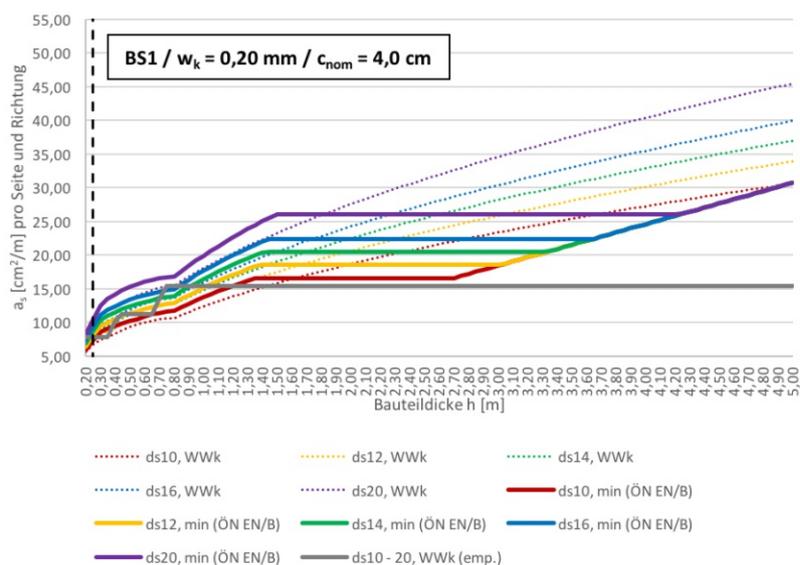


Abbildung 5.2 – Mindestbewehrungsvergleich zur Begrenzung der Rissbreite gemäß *öbv-RL „Weiße Wannen“* / ÖNORM EN 1992-1-1:2015 und ÖNORM B 1992-1-1:2018 für die Konstruktionsklasse Kon_1 ($c_{nom} = 4,0$ cm; Betonstandard BS 1)

Die normgemäße Mindestbewehrung zur Begrenzung der Rissbreite für den Betonstandard BS 1 PLUS hingegen unterschreitet in sämtlichen Bewehrungsverläufen von $d_s = 10 - 20$ mm die Mindestbewehrung laut *öbv-RL „Weiße Wannen“*, wie in Abbildung 5.3 ersichtlich. Jedoch ist auch hier darauf hinzuweisen, dass die in der Richtlinie empfohlene Bewehrung von $15,39 \text{ cm}^2/\text{m}$ ($\emptyset 14/10$ cm) im Dickenbereich von $h = 1,00 - 5,00$ m geringer als die normgemäß berechnete Bewehrungsmenge angegeben wird.

Augenscheinlich ersichtlich wird dieser Sachverhalt, vergleicht man die Abweichungen der normgemäß berechneten Mindestbewehrung im Verhältnis zu den Angaben in der *öbv-RL „Weiße Wannen“*. Abbildung 5.4 zeigt hierzu die Auswertung für den Betonstandard BS 1. Für Fundamentplatten mit Bauteildicken $h = 0,25 - 1,80$ m fordert die Berechnung der Mindestbewehrung gemäß ÖNORM EN 1992-1-1:2015 sowie ÖNORM B 1992-1-1:2018 im Durchschnitt um circa 10 % größere Bewehrungsmengen als diese in der Richtlinie für das *BM „WW klassisch“* angegeben werden.

Betrachtet man die Abweichung der normgemäßen Berechnung für den Bewehrungsdurchmesser $d_s = 14$ mm mit den empfohlenen Werten gemäß Richtlinie für Bauteildicken größer $1,00$ m ($\emptyset 14/10$ cm), müsste laut Norm die angeordnete Bewehrungsmenge um circa 30 % erhöht werden.

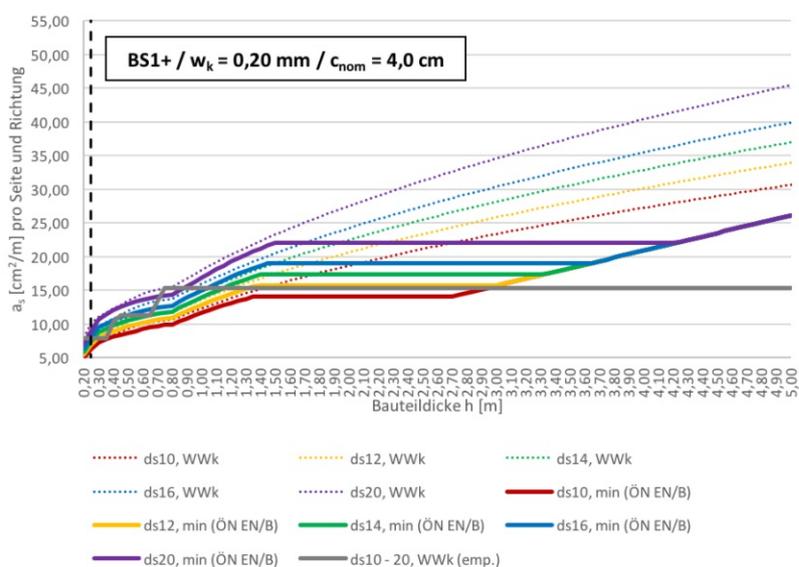


Abbildung 5.3 – Mindestbewehrungsvergleich zur Begrenzung der Rissbreite gemäß *öbv-RL „Weiße Wannen“* / ÖNORM EN 1992-1-1:2015 und ÖNORM B 1992-1-1:2018 für die Konstruktionsklasse Kon₁ ($c_{nom} = 4,0$ cm; Betonstandard BS 1 PLUS)

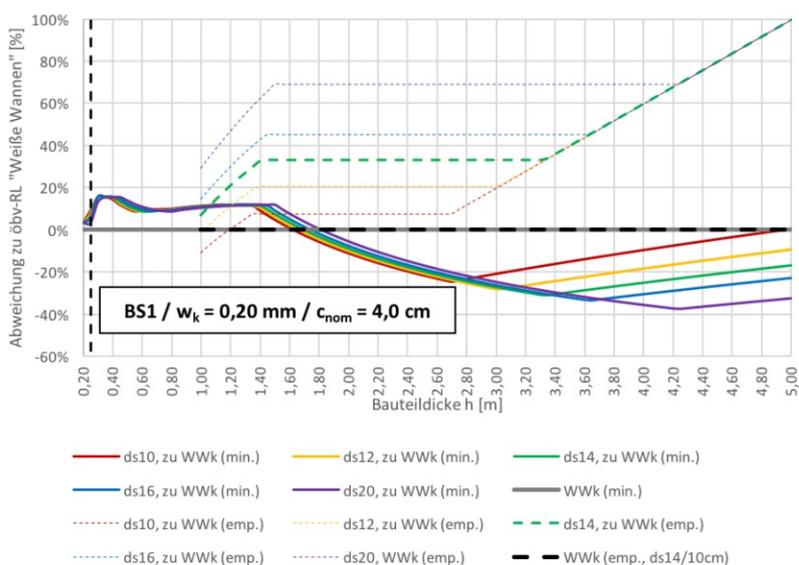


Abbildung 5.4 – Abweichung der Mindestbewehrung gemäß Norm zu den Werten in der *öbv-RL „Weiße Wannen“* für die Konstruktionsklasse Kon₁ / $c_{nom} = 4,0$ cm / Betonstandard BS 1

Analog dazu liefert Abbildung 5.5 den Vergleich für den Betonstandard BS 1 PLUS. Wie bereits zuvor beschrieben, unterschreiten die normgemäß berechneten Werte für die Mindestbewehrung die Angaben der *öbv-RL „Weiße Wannen“*.

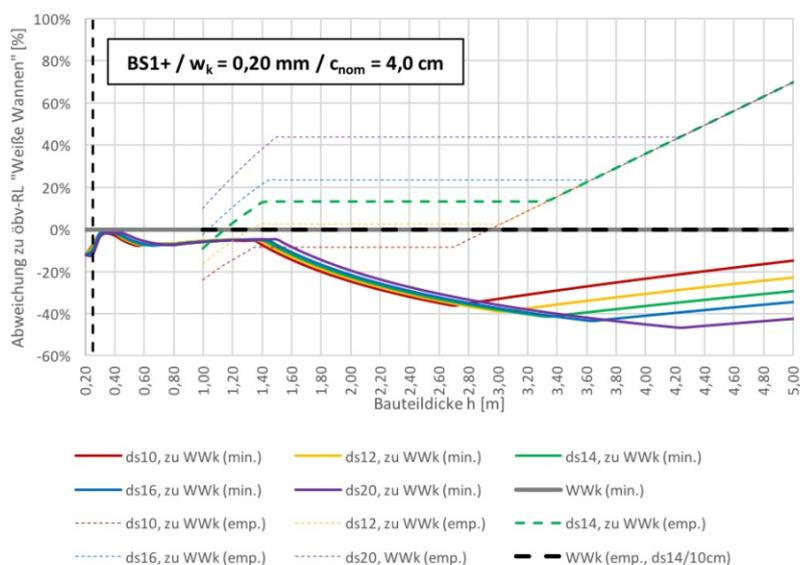


Abbildung 5.5 – Abweichung der Mindestbewehrung gemäß Norm zu den Werten in der *öbv-RL „Weiße Wannen“* für die Konstruktionsklasse Kon_1 / $c_{nom} = 4,0 \text{ cm}$ / Betonstandard BS 1 PLUS

Jedoch überschreiten die normgemäßen Werte der Mindestbewehrung für den Bewehrungsdurchmesser $d_s = 14 \text{ mm}$ auch bei Verwendung des Betonstandards BS 1 PLUS die empfohlene Bewehrung ($\emptyset 14/10 \text{ cm}$) im Schnitt um circa 15 %.

Eine vollständige Auswertung für die Konstruktionsklassen Kon_S , Kon_1 und Kon_2 jeweils für eine Betondeckung mit 3,0 cm bzw. 4,0 cm in Abhängigkeit der Bauteildicke h im Bereich von 0,20 – 5,00 m liefert Anhang A.1.

5.2 Vergleich *BM „WW optimiert“* versus *BM „WW klassisch“* / ÖNORM

Der Vergleich der erforderlichen rissbreitenbegrenzenden Bewehrung, gemäß dem *öbv-MB „Weiße Wanne optimiert“* bzw. den Ausführungen in SCHLICKE (2014), mit jener aus den Bemessungsdiagrammen der *öbv-RL „Weiße Wanne“* sowie gemäß ÖNORM EN 1992-1-1:2015 und ÖNORM B 1992-1-1:2018 erfolgt anhand einer Tabellenkalkulation in Microsoft Excel©.

Da das vorliegende Merkblatt den Nachweis der Rissevermeidung zum Ziel hat, muss der nachfolgende Vergleich zweistufig erfolgen.

In einem ersten Schritt wird für verschiedene Betone gemäß Tabelle 4.2, die im *öbv-MB „Weiße Wanne optimiert“* beispielhaft angeführt werden, sowie allgemein für einen normgemäßen Beton der Festigkeitsklasse C 25/30 überprüft, ob die untersuchten Bodenplatten in Abhängigkeit ihrer maximalen Längsausdehnungen gemäß der gewählten Konstruktionsklasse rissfrei bleiben oder ob eine aktive rissbreitenbegrenzende Bewehrung nach SCHLICKE (2014) anzuordnen wäre. Der erste Teil der Nachweisführung erfolgt hierbei nach den Gleichungen (4.20) bis (4.35) gemäß Unterabschnitt 4.3.2.

Im zweiten Teil der Auswertung werden die Bereiche näher betrachtet, in denen der Nachweis der Rissfreiheit nicht gegeben ist. Die Gleichung (3.3) und Gleichung (4.36) bis (4.38) in

Unterabschnitt 4.3.3 bilden hierzu die Grundlage. Um einen Vergleich der vorliegenden Modelle gemäß ÖNORM EN 1992-1-1:2015 und ÖNORM B 1992-1-1:2018 sowie *BM „WW klassisch“* und *BM „WW optimiert“* führen zu können, werden die zuvor ermittelten erforderlichen Bewehrungen einer Flächenbewehrung zugeordnet, aufsummiert und als Gesamtbewehrungsgehalt ρ in kg/m² Bodenplatte dargestellt.

5.2.1 Eingangparameter – Nachweis gemäß *öbv-MB „Weiße Wanne optimiert“*

Die Eingangparameter für den Gebrauchstauglichkeitsnachweis gemäß *öbv-MB „Weiße Wanne optimiert“* wurden bereits in Abschnitt 4.3 hinreichend erörtert. Hier werden diese nochmals kurz aufgelistet und in die geometrischen, materialtechnologischen und klimatischen Eingangparameter sowie Randbedingungen eingeteilt.

- **geometrische Eingangparameter:** Die Bauteildicke h sowie die tatsächlichen Längsabmessungen $L_{F,x}$ und $L_{F,y}$ der Fundamentplatte fallen unter die geometrischen Eingangparameter. Einerseits wird die Auswertung über die Höhe h der Fundamentplatte durchgeführt, andererseits implementieren die maximalen Längsabmessungen der Fundamentplatte gemäß Tabelle 3-2 der *öbv-RL „Weiße Wannen“* die zugehörigen Konstruktionsklassen Kon_s , Kon_1 und Kon_2 in den ersten Teil der Nachweisführung. [vgl. *öbv-RL „Weiße Wannen“* (2018); S. 8 – Tabelle 3-2]
- **materialtechnologische Eingangparameter:** Unter diesem Unterpunkt werden alle versuchstechnisch ermittelten Materialkennwerte laut Eignungs- und Konformitätsprüfung sowie dem Identitätsnachweis gemäß *öbv-RL „Weiße Wannen“* für den anzuwendenden Beton zusammengefasst. Für den Nachweis der Gebrauchstauglichkeit gemäß *öbv-RL „Weiße Wanne optimiert“* finden folgende Materialkennwerte ihren Eingang in die Berechnung: [vgl. *öbv-RL „Weiße Wannen“* (2018); S. 54 f.]
 - maximale Hydratationswärme Q_{max}
 - Wärmespeicherkapazität S_c
 - mittlere Zugfestigkeit nach 28 Tagen f_{ctm}
 - mittlerer Elastizitätsmodul des Betons nach 28 Tagen E_{cm}
 - Wichte des Betons γ_c
 - Wärmeausdehnungskoeffizient des Betons α_T
 - Bindemittelmenge m_{BM}
- **klimatische Eingangparameter sowie Randbedingungen:** Im Unterschied zur allgemeinen thermomechanischen Simulation werden für das *BM „WW optimiert“* laut *öbv-MB „Weiße Wanne optimiert“* hier verschiedene Randbedingungen für den Eingang in die Berechnung definiert. Dies sind: [vgl. *öbv-MB „Weiße Wanne optimiert“* (2018); S. 5 f.]

- das Vorhaltemaß zur Berücksichtigung des Unterschiedes zwischen Frischbetontemperatur und mittlerer Tagestemperatur ΔT_{nom} ,
- die Amplitude der Tagestemperaturschwankung $\Delta T_{a,var}$ sowie
- die Nachbehandlungsdauer und
- der Elastizitätsmodul des angrenzenden Erdreiches E_B

5.2.2 *öbv-MB „Weiße Wanne optimiert“ für Betone gemäß Tabelle 4.2*

Zur Vermeidung unübersichtlicher Graphiken und zur Erklärung der prinzipiellen Vorgehensweise der Auswertung werden zu Beginn die Ergebnisse für eine quadratische Bodenplatte der Konstruktionsklasse Kon_s , Kon_1 und Kon_2 mit einer maximalen Längsausdehnung von 15, 30 sowie 60 m Seitenlänge im Auswertungsbereich der Bauteildicke h von 0,20 – 5,00 m analysiert.

Für die labortechnisch ermittelten Materialkennwerte wird die Betonrezeptur BS 1 A PLUS / Typ 1 gemäß Tabelle 4.2 angenommen. Weiters wird für das anschließende Erdreich ein Elastizitätsmodul E_B mit 100 N/mm² sowie der Wärmeausdehnungskoeffizient α_T des Betons mit $10,0 \cdot 10^{-6}$ /K festgelegt.

Gemäß SCHLICKE (2014) liegt die obige Annahme zum Elastizitätsmodul in den überwiegenden Fällen auf der sicheren Seite. Ausgenommen davon sind Betonagen auf kompaktem Fels sowie dichten kantigen Schotterlagen. [Vgl. SCHLICKE (2014); S. 88]

Die Annahme des Wärmeausdehnungskoeffizienten des Betons mit $10,0 \cdot 10^{-6}$ /K beruht auf den Anmerkungen der *öbv-RL „Weiße Wannen“* sowie der ÖNORM EN 1992-1-1:2015. Wie bereits in Unterabschnitt 2.7.5 ausgeführt, unterliegt dieser Koeffizient Schwankungen in Abhängigkeit der verwendeten Gesteinskörnung, der Bindemittelmenge sowie des w/b -Wertes. Da jedoch die beiden letztgenannten Werte für Betone im Anwendungsbereich der *öbv-RL „Weiße Wannen“* eher geringgehalten werden sollen, wird angenommen, dass auch dieser Wert auf der sicheren Seite zu liegen kommt. [Vgl. ÖNORM EN 1992-1-1:2015 (2015); S. 30] sowie [Vgl. *öbv-RL „Weiße Wannen“* (2018); S. 8]

In Abbildung 5.6 ist der Vergleich der Spannungen infolge Zwangsschnittgrößen $\sigma_{F,i,j}$ mit der mittleren Zugfestigkeit des Betons $f_{ct,zugh,F,i}$ mit obigen Eingangswerten graphisch dargestellt.

Der Indizes i steht hierbei für die betrachtete Fundamentplattenoberseite oder Fundamentplattenunterseite. Der Indizes j für die jeweilige betrachtete Längsrichtung. Da die nachfolgende Auswertung vorerst quadratische Fundamentplatten betrachtet, sind die Spannungen richtungsunabhängig.

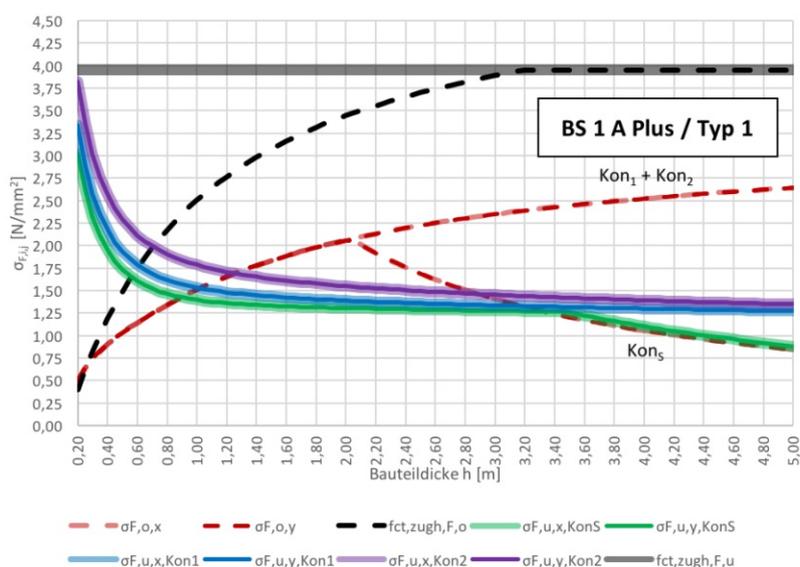


Abbildung 5.6 – Vergleich der Spannungen infolge Zwangsschnittgrößen mit der zugehörigen mittleren Zugfestigkeit für die quadratischen Maximalabmessungen der Konstruktionsklassen Kon_S , Kon_1 und Kon_2 für die Betonrezeptur BS 1 A PLUS / Typ 1 gemäß Tabelle 4.2

Nachweis der Rissevermeidung an der Plattenoberseite

Augenscheinlich wird der Nachweis der Rissevermeidung für den verwendeten Beton BS 1 A PLUS / Typ 1 fast im gesamten Auswertungsbereich erfüllt. Die vorliegenden Zwangsspannungen überschreiten die zugehörige mittlere Zugspannung nur an der Plattenoberseite (strichlierte schwarze und dunkelrote Linien) für Bauteildicken kleiner 30 cm.

Weiters kann nachgewiesen werden, dass das Maximum der Zwangsspannungen an der Plattenoberseite (oberer strichlierter dunkelroter Ast) unabhängig von deren Längsausdehnungen bestimmt werden kann. Auch eine abweichende Annahme einer rechteckigen anstelle einer quadratischen Platte beeinflusst dieses Ergebnis nicht.

Der abfallende Ast der plattenoberseitigen Zwangsspannungen bei der Konstruktionsklasse Kon_S erklärt sich aus der maximalen Längsausdehnung von 15 m. Hier wird ab einer Bauteildicke von 2,05 m der rechte Teil in Gleichung (4.24) maßgebend. Infolge der weiter ansteigenden Bauteildicke nehmen die zugehörigen Zwangsspannungen ab. Auch sind die vorliegenden Zwangsspannungen unabhängig von den vorherrschenden Untergrundverhältnissen.

Nachweis der Rissevermeidung an der Plattenunterseite

Hier unterscheiden sich die zugehörigen Zwangsspannungen an der Plattenunterseite in Abhängigkeit ihrer Längsausdehnungen. Mit steigender Seitenlänge der untersuchten Fundamentplatte steigen die Zwangsspannungen. Für den verwendeten Beton BS 1 A PLUS / Typ 1 wird der Nachweis der Rissevermeidung im gesamten Auswertungsbereich erfüllt, wobei anzumerken bleibt, dass mit zunehmender Bauteildicke die zugehörigen Zwangsspannungen abfallen und somit die Sicherheit des Nachweises steigt.

Die Abhängigkeit der Zwangsspannungen an der Plattenunterseite von deren Längsausdehnung oder allgemein von deren Seitenverhältnis $L_{F,x}:L_{F,y}$ wird nachstehend für die Betonrezeptur BS 1 A PLUS / Typ 1 für die Konstruktionsklasse Kon₂ untersucht. Die Auswertung dazu wird in Abbildung 5.7 graphisch dargestellt.

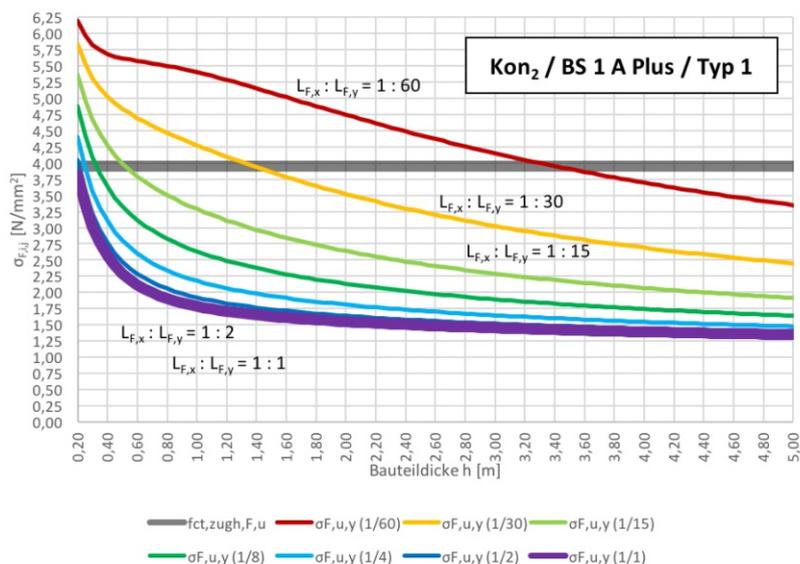


Abbildung 5.7 – Vergleich der Zwangsspannung $\sigma_{F,u,y}$ mit der mittleren zugehörigen Zugfestigkeit für einen Beton BS 1 A PLUS / Typ 1 gemäß Tabelle 4.2 für unterschiedliche Seitenverhältnisse

Die Auswertung der Abbildung 5.7 zeigt, dass die Annahme einer quadratischen Fundamentplatte mit den Maximalabmessungen für die verschiedenen Konstruktionsklassen nicht den „worst case“ darstellt, sondern die maximal möglichen Zwangsspannungen an der Plattenunterseite bei einem Seitenverhältnis $L_{F,x}:L_{F,y} = 1:60$ (rote Volllinie) aufgefunden werden. Jedoch nähern sich die Ergebnisse für $\sigma_{F,u,y}$ mit fallendem Seitenverhältnis schnell den Werten für eine quadratische Bodenplatte an. Ab einem Verhältnis $L_{F,x}:L_{F,y} = 1:2$ (dunkelblaue Volllinie) liegen diese in guter Näherung zur quadratischen Fundamentplatte. Für die nachfolgenden Auswertungen wird festgehalten, dass diese streng genommen nur für quadratische Bodenplatten ihre Gültigkeit besitzen. Sie liegen für Seitenverhältnisse unter 1:2 aber in guter Näherung. Für größere Seitenverhältnisse müssten jedoch separate Auswertungen geführt werden.

Nachweis der Rissevermeidung / Zusammenfassung

Anstelle des Vergleiches von vorliegender Zwangsspannung mit der zugehörigen mittleren Zugspannung des verwendeten Betons kann der Nachweis auch mithilfe des Rissindex $i_{F,i,j}$ gemäß Gleichung (4.25) und Gleichung (4.34) geführt werden. Abbildung 5.8 zeigt den zugehörigen Verlauf im Auswertungsbereich von 0,20 – 5,00 m für die Betonrezeptur BS 1 A PLUS / Typ 1 gemäß Tabelle 4.2.

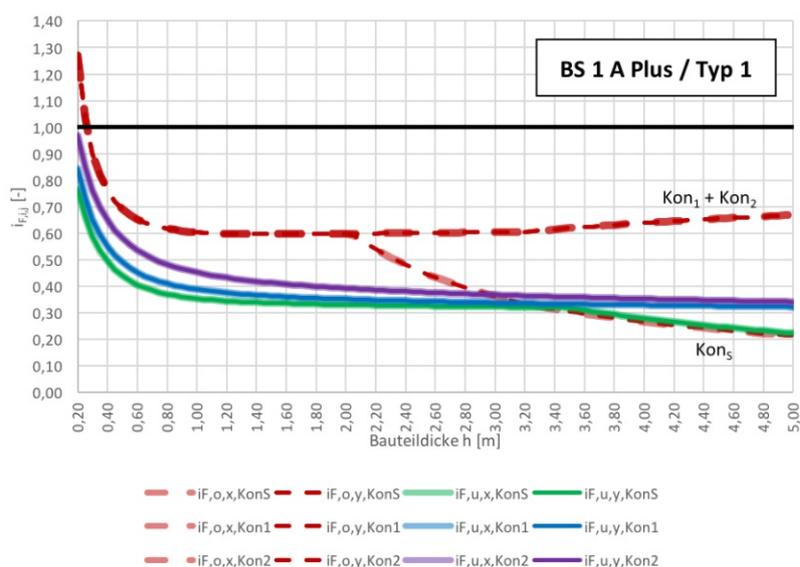


Abbildung 5.8 – Rissindex für die quadratischen Maximalabmessungen der Konstruktionsklassen KonS, Kon₁ und Kon₂ für die Betonrezeptur BS 1 A PLUS / Typ 1 gemäß Tabelle 4.2

Auch hier kann gezeigt werden, dass der verwendete Beton den Grenzwert im gesamten Auswertungsbereich, mit Ausnahme an der Plattenoberseite für Bauteildicken kleiner 30 cm, unterschreitet und somit den Nachweis der Rissevermeidung erfüllt.

Eine vollständige Auswertung für die Betone gemäß Tabelle 4.2 in Abhängigkeit der Bauteildicke h im Bereich von 0,20 – 5,00 m für quadratische Fundamentplatten liefert Anhang A.2. Die betrachteten neun Betonrezepturen BS 1 A PLUS / Typ 1 – 4 sowie BS 1 C PLUS / Typ 1 – 5 liefern für den gesamten Auswertungsbereich vergleichbare Werte analog dem exemplarisch erläuterten Beton BS 1 A PLUS / Typ 1.

5.2.3 öbv-MB „Weiße Wanne optimiert“ für Betone gemäß ÖN EN 1992-1-1:2015

Da der angestrebte Vergleich der Bemessungsmodelle nur unter gleichen Festigkeitseigenschaften der verwendeten Betone zu vergleichbaren Ergebnissen führen kann, wird im nachfolgenden der Nachweis der Rissevermeidung an einem Beton der Festigkeitsklasse C 25/30 betrachtet. Die Festigkeitskennwerte werden hierfür aus der ÖNORM EN 1992-1-1:2015 übernommen und nicht versuchstechnisch ermittelt. Der Elastizitätsmodul des angrenzenden Erdreichs wird wieder mit 100 N/mm^2 sowie der Wärmeausdehnungskoeffizient mit $10,0 \cdot 10^{-6} / \text{K}$ angenommen. Zusätzlich müssen jedoch noch weitere Eingangswerte, da messtechnisch nicht bekannt, festgelegt werden.

Maximale Hydratationswärme

Die maximale Hydratationswärme Q_{max} wird für Praxisanwendungen anhand des Langavantversuchs gemäß ONR 23303:2010 ermittelt. Die Entwicklung der Hydratationswärme muss dabei die in Unterabschnitt 4.3.1 genannten Bedingungen und Grenzen einhalten und darf zusätzlich den 70h-Wert von 270 J/g nicht überschreiten. Laut ONR 23303:2010 wird dabei die Dauer des Langavantversuchs mit 72 h für Bauteildicken bis zu vier Meter festgelegt. Da die vorliegende Auswertung Bauteildicken bis fünf Meter abdecken soll, wird die maximale mögliche Hydratationswärme in Abhängigkeit des 70h-Wertes und den Gleichungen (4.14) und (4.15) für eine Dauer von 120 h in den Gleichungen (5.1) und (5.2) festgelegt. Diese Vorgehensweise wird dadurch begründet, dass laut ONR 23303:2010 der Zeitpunkt der Höchsttemperatur bei Erhärtung im Bauteil bei üblichen Betonzusammensetzungen und Umgebungstemperaturen für Bauteildicken von einem Meter nach 24 h, für zwei Meter nach 48 h sowie für drei Meter nach 72 h erreicht wird. [Vgl. ONR 23303 (2010); S. 154]

- erste Obergrenze Hydratationswärme für 120 h

$$\begin{aligned} Q(120h) &< 1,12 \cdot \exp \left\{ -3,5 \cdot \left[\ln \left(1 + \frac{t}{3,0} \right) \right]^{-3,0} \right\} \cdot Q(70h) \\ &= 1,12 \cdot \exp \left\{ -3,5 \cdot \left[\ln \left(1 + \frac{120}{3,0} \right) \right]^{-3,0} \right\} \cdot 270 \\ &= 282,42 \text{ J/g} \end{aligned} \quad (5.1)$$

- zweite Obergrenze Hydratationswärme für 120 h

$$\begin{aligned} Q(120h) &< 1,53 \cdot \exp \left\{ -8,0 \cdot \left[\ln \left(1 + \frac{t}{1,6} \right) \right]^{-2,2} \right\} \cdot Q(70h) \\ &= 1,53 \cdot \exp \left\{ -8,0 \cdot \left[\ln \left(1 + \frac{120}{1,6} \right) \right]^{-2,2} \right\} \cdot 270 \\ &= 300,52 \text{ J/g} \end{aligned} \quad (5.2)$$

Die maximale Hydratationswärme Q_{max} wird somit für die nachfolgende Auswertung mit den Ergebnissen für $Q(120h)$ gleichgesetzt und mit 300,52 J/g festgelegt. Ohne die Anwendungsgrenzen des *öbv-MB „Weiße Wanne optimiert“* zu verletzen kann für Q_{max} kein höherer Wert als dieser Anwendung finden.

Bindemittelmenge

Zur Bestimmung der maximalen Bindemittelmenge m_{BM} wird auf die Ausführungen in der *öbv-RL „Weiße Wannen“* zurückgegriffen. Darin werden für den Betonstandard BS 1 PLUS folgende Bindemittelmengen gemäß Tabelle 5.2 empfohlen: [Vgl. *öbv-RL „Weiße Wannen“* (2018); S. 40 f.]

Tabelle 5.2 – Anwendungsbereich und empfohlene Bindemittelmenge für den Betonstandard BS 1 PLUS [Vgl. öbv-RL „Weiße Wannen“ (2018); S. 40 – Tabelle 5-2 und S. 42 – Tabelle 5-3]

Kurzbezeichnung	BS 1 A PLUS	BS 1 C PLUS
Anwendungsbereich	Wände und Platten	Verkehrsbauwerke mit Taumittleinwirkung
Festigkeitsklasse	C 25/30 (56)	C 20/25 (56) C 25/30 (90)
empfohlene Bindemittelmenge mit HWZ Anteil bis 40 % [kg/m ³]	285 – 315	320 – 360

Für die Auswertung des allgemeinen Falles für die Festigkeitsklasse C25/30 wird somit für den Betonstandard BS 1 A PLUS eine maximale Bindemittelmenge $m_{BM} = 315 \text{ kg/m}^3$ sowie für den Betonstandard BS 1 C PLUS von 360 kg/m^3 fixiert.

Führt man den Nachweis der Rissevermeidung gemäß *öbv-MB „Weiße Wanne optimiert“* für Materialkennwerte gemäß ÖNORM EN 1992-1-1:2015 für Betone der Festigkeitsklasse C 25/30 mit den vorher fixierten Werten für die maximale Hydratationswärme und der maximalen Bindemittelmenge an annähernd quadratischen Fundamentplatten, so kann die Auswertung nach Abbildung 5.9 (Spannungen zufolge Zwangsschnittgrößen) und Abbildung 5.11 (Rissindex) für die Betonrezeptur BS 1 A PLUS sowie nach Abbildung 5.10 (Spannungen zufolge Zwangsschnittgrößen) und Abbildung 5.12 (Rissindex) für den Betonstandard BS 1 C PLUS graphisch dargestellt werden. Im Gegensatz zu den Betonrezepturen gemäß Tabelle 4.2 können hier nicht die gleichen eindeutigen Erkenntnisse aus der Auswertung gezogen werden.

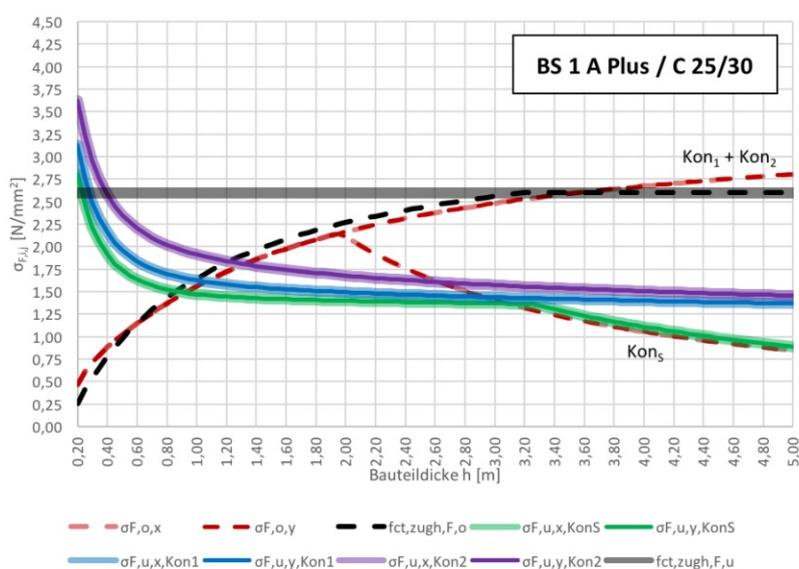


Abbildung 5.9 – Vergleich der Spannungen infolge Zwangsschnittgrößen mit der zugehörigen mittleren Zugfestigkeit für die quadratischen Maximalabmessungen der Konstruktionsklassen KonS, Kon1 und Kon2 für Betone BS 1 A PLUS mit Materialkennwerten gemäß ÖNORM EN 1992-1-1:2015

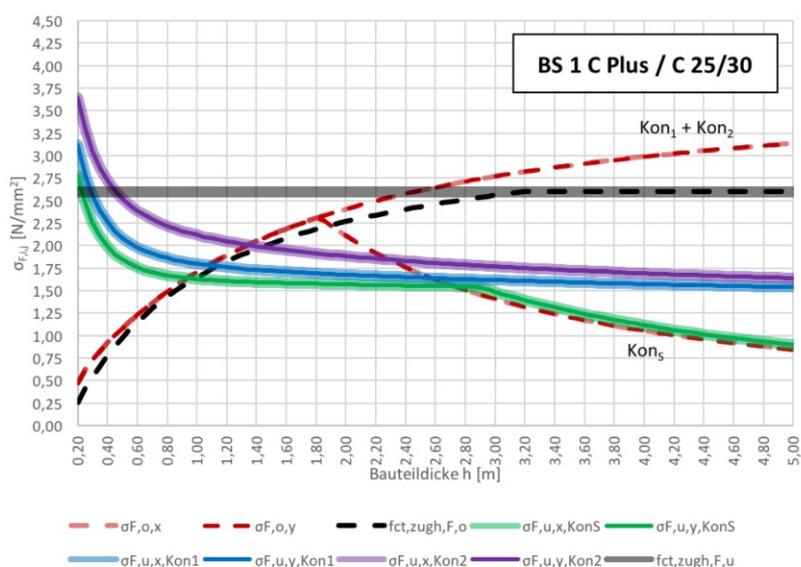


Abbildung 5.10 – Vergleich der Spannungen infolge Zwangsschnittgrößen mit der zugehörigen mittleren Zugfestigkeit für die quadratischen Maximalabmessungen der Konstruktionsklassen Kon_S, Kon₁ und Kon₂ für Betone BS 1 C PLUS mit Materialkennwerten gemäß ÖNORM EN 1992-1-1:2015

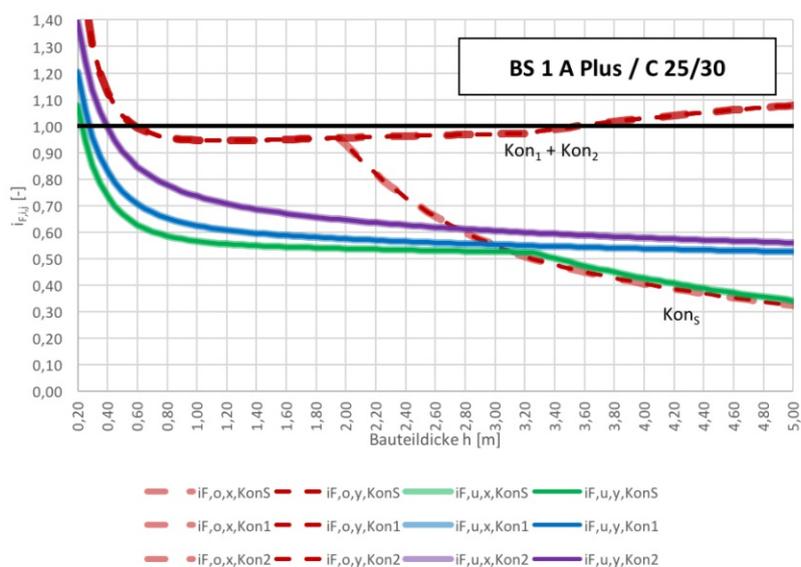


Abbildung 5.11 – Rissindex für die quadratischen Maximalabmessungen der Konstruktionsklassen Kon_S, Kon₁ und Kon₂ für die Betonrezeptur BS 1 A PLUS mit Materialkennwerten gemäß ÖNORM EN 1992-1-1:2015

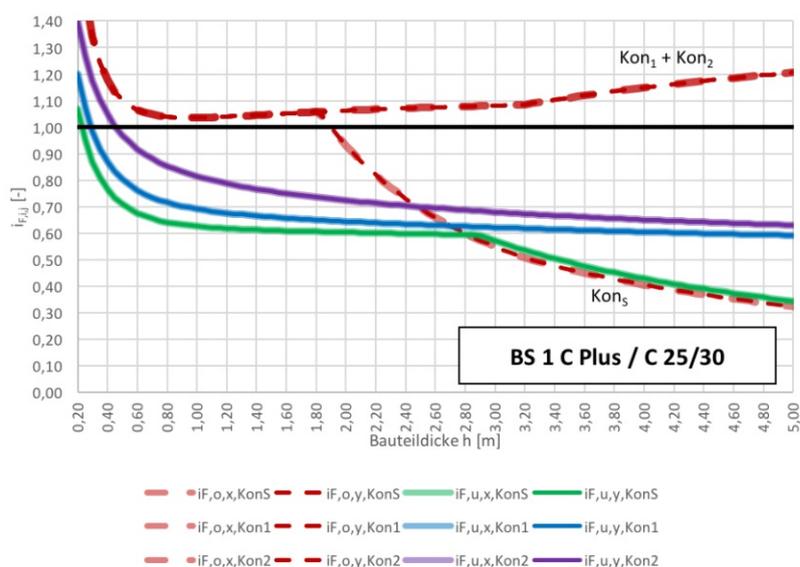


Abbildung 5.12 – Rissindex für die quadratischen Maximalabmessungen der Konstruktionsklassen Kon₅, Kon₁ und Kon₂ für die Betonrezeptur BS 1 C PLUS mit Materialkennwerten gemäß ÖNORM EN 1992-1-1:2015

Nachweis der Rissevermeidung an der Plattenoberseite

Für den allgemeinen Fall der Festigkeitsklasse C 25/30 für die Betonrezeptur BS 1 A PLUS kann in den vorangestellten Abbildungen gezeigt werden, dass der Nachweis der Rissevermeidung gemäß *öbv-MB „Weiße Wanne optimiert“* an der Plattenoberseite nicht allgemein im gesamten Auswertungsbereich erbracht werden kann. Für alle Konstruktionsklassen kann der Nachweis unter einer Bauteildicke von 0,40 m nicht erbracht werden. Weiters überschreiten die Zwangsspannungen die zugehörigen mittleren Zugfestigkeiten bei Bauteildicken über 3,55 m in den Konstruktionsklassen Kon₁ und Kon₂.

Für die Betonrezeptur BS 1 C PLUS wachsen die vorliegenden Zwangsspannungen aufgrund der größeren Bindemittelmenge soweit an, dass an der Fundamentoberseite für die Konstruktionsklassen Kon₁ sowie Kon₂ im gesamten Auswertungsbereich von 0,20 – 5,00 m Bauteildicke der Nachweis der Rissevermeidung nicht erfüllt wird.

Nachweis der Rissevermeidung an der Plattenunterseite

An der Plattenunterseite kann hingegen gezeigt werden, dass auch im allgemeinen Fall der Nachweis der Rissevermeidung ab einer Bauteildicke von 0,40 m bei der Betonrezeptur BS 1 A PLUS sowie ab 0,50 m bei der Betonrezeptur BS 1 C PLUS für alle Konstruktionsklassen erbracht werden kann.

Nachweis der Rissevermeidung / Zusammenfassung

In den Bereichen, in denen der Nachweis der Rissevermeidung erfüllt wird, reicht die Anordnung einer Bewehrung zur Sicherstellung einer robusten Oberfläche gemäß Gleichung (4.35) aus und es muss keine aktive rissbreitenbegrenzende Bewehrung angeordnet werden.

Ein Vergleich der Festigkeitskennwerte der Betone gemäß Tabelle 4.2 mit den Materialkennwerten aus der ÖNORM EN 1992-1-1:2015 legt den Schluss nahe, dass – obwohl in der *öbv-RL* „Weiße Wannan“ anders gefordert – Überfestigkeiten der verwendeten Betone die Nachweisführung der Rissevermeidung positiv beeinflussen.

Stuft man die neun beispielhaft angeführten Betone in Unterabschnitt 4.3.1 in Abhängigkeit ihrer mittleren Zugfestigkeit in die Festigkeitsklassen der ÖNORM EN 1992-1-1:2015 ein, muss festgestellt werden, dass diese allesamt eher in eine der Festigkeitsklassen C 30/37 bis C 60/75 eingestuft werden könnten. Es können somit die Materialkennwerte einer Festigkeitsklasse C 25/30 als „worst case“ fixiert werden.

Eine vollständige Auswertung für die Betonrezepturen BS 1 A PLUS und BS 1 C PLUS mit der Festigkeitsklasse C 25/30 gemäß ÖNORM EN 1992-1-1:2015 in Abhängigkeit der Bauteildicke h im Bereich von 0,20 – 5,00 m für quadratische Fundamentplatten liefert Anhang A.3.

5.2.4 Begrenzung der Rissbreite unter Beachtung der Verformungskompatibilität

Kann der zuvor genannte Nachweis der Rissevermeidung nicht erfüllt werden, ist gemäß den Gleichungen (3.3) sowie (4.36) bis (4.38) eine aktive rissbreitenbegrenzende Bewehrung anzuordnen. Diese ist abhängig von der anzuwendenden Konstruktionsklasse sowie dem gewählten Stabdurchmesser und dem verwendeten Betonstandard.

Das Verfehlen des Nachweises hat jedoch nicht automatisch zur Folge, dass diese Bewehrung auch wirklich anzuordnen ist. Nachfolgend muss zuvor geprüft werden, ob der so entstehende Primärriss die zulässige Rissbreite in Abhängigkeit der Konstruktionsklasse überschreiten würde. Nur dann wird, zur Begrenzung der Primärrissbreite, die Erzeugung von Sekundärrissen erforderlich und somit eine aktive, rissbreitenbegrenzende Bewehrung notwendig.

Abbildung 5.13 bis Abbildung 5.18 zeigen die zu erwartende Primärrissbreite sowie die erforderliche Anzahl der Sekundärrisse, um den Primärriss auf die zulässige Rissbreite gemäß der vorliegenden Konstruktionsklasse zu begrenzen.

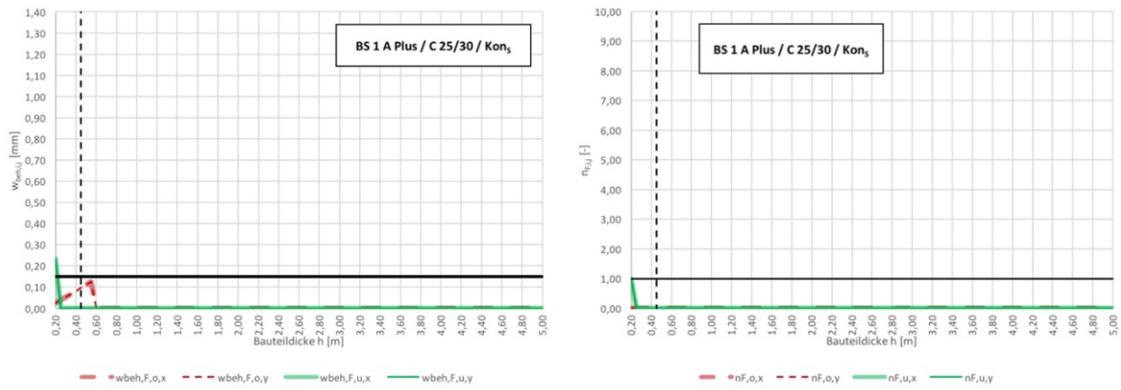


Abbildung 5.13 – Primärrissbreite (links) und erforderliche Sekundärrissanzahl (rechts) bei quadratischer Maximalabmessung der Konstruktionsklasse Kon_s / Beton gemäß ÖNORM EN 1992-1-1:2015 / BS 1 A PLUS

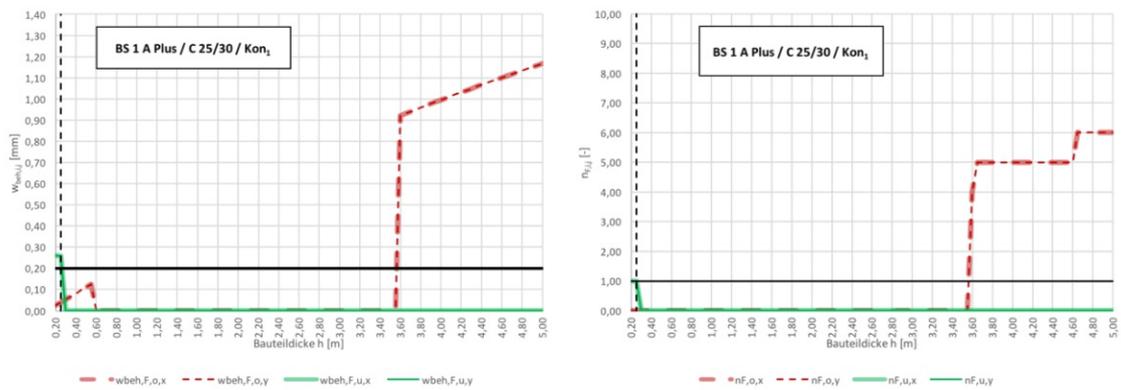


Abbildung 5.14 – Primärrissbreite (links) und erforderliche Sekundärrissanzahl (rechts) bei quadratischer Maximalabmessung der Konstruktionsklasse Kon₁ / Beton gemäß ÖNORM EN 1992-1-1:2015 / BS 1 A PLUS

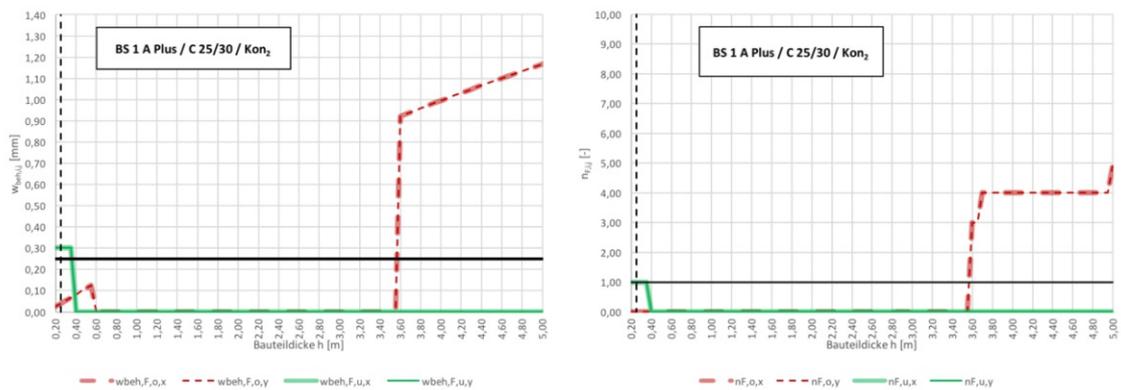


Abbildung 5.15 – Primärrissbreite (links) und erforderliche Sekundärrissanzahl (rechts) bei quadratischer Maximalabmessung der Konstruktionsklasse Kon₂ / Beton gemäß ÖNORM EN 1992-1-1:2015 / BS 1 A PLUS

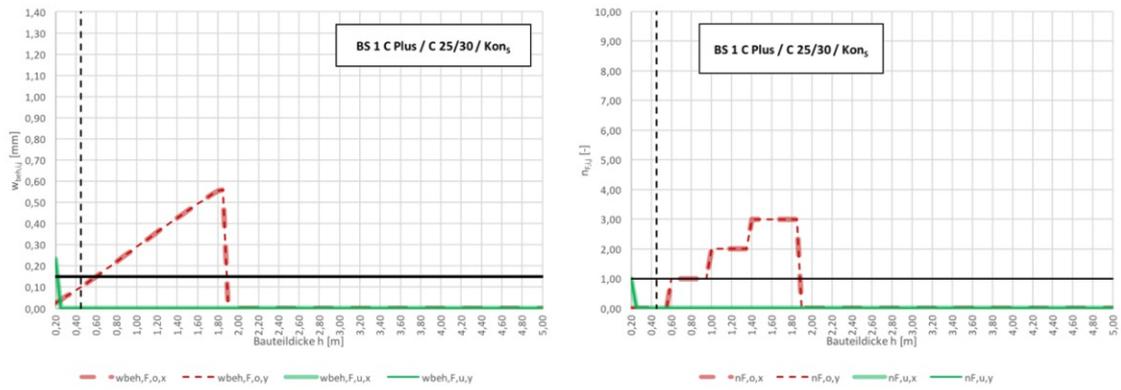


Abbildung 5.16 – Primärrissbreite (links) und erforderliche Sekundärrissanzahl (rechts) bei quadratischer Maximalabmessung der Konstruktionsklasse Kon_s / Beton gemäß ÖNORM EN 1992-1-1:2015 / BS 1 C PLUS

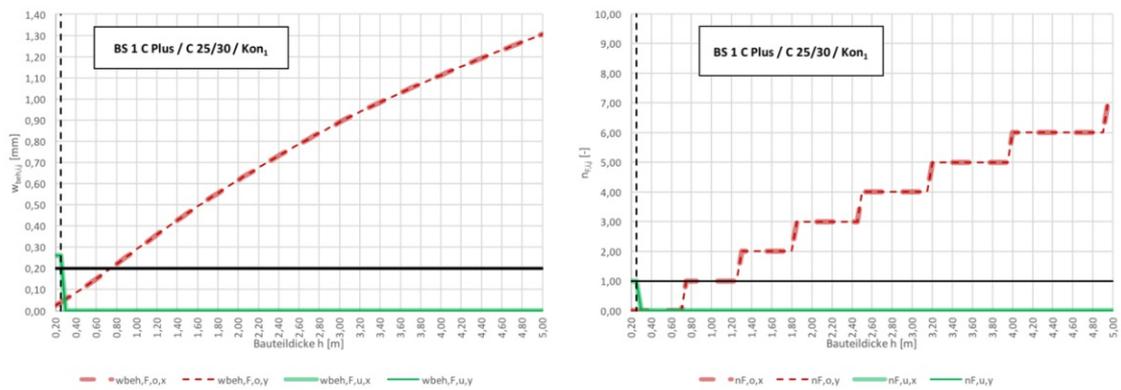


Abbildung 5.17 – Primärrissbreite (links) und erforderliche Sekundärrissanzahl (rechts) bei quadratischer Maximalabmessung der Konstruktionsklasse Kon₁ / Beton gemäß ÖNORM EN 1992-1-1:2015 / BS 1 C PLUS

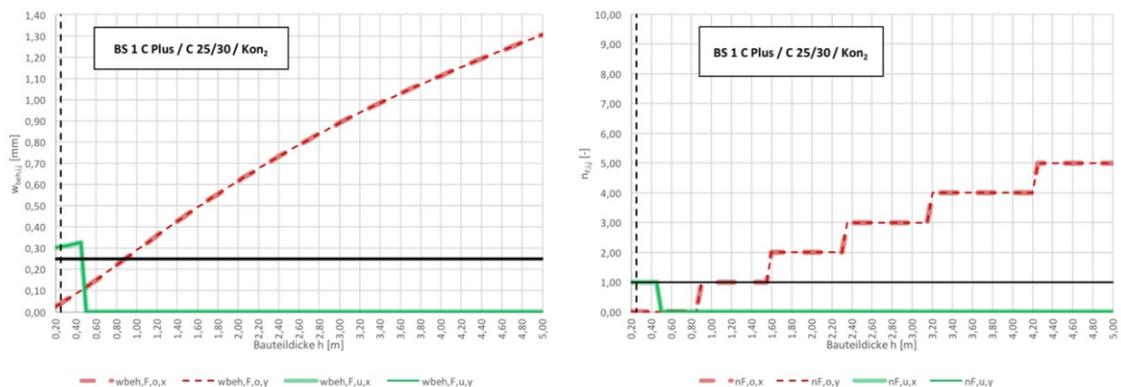


Abbildung 5.18 – Primärrissbreite (links) und erforderliche Sekundärrissanzahl (rechts) bei quadratischer Maximalabmessung der Konstruktionsklasse Kon₂ / Beton gemäß ÖNORM EN 1992-1-1:2015 / BS 1 C PLUS

Begrenzung der Rissbreite unter Beachtung der Verformungskompatibilität an der Plattenoberseite

Aus Abbildung 5.13 bis Abbildung 5.15 für die Betonrezeptur BS 1 A PLUS wird ersichtlich, dass die Primärrissbreite vor allem bei dünnen Platten an der Plattenoberseite unter dem zulässigen Wert der Rissbreite bleibt. Somit kann zwar die Rissefreiheit nicht gewährleistet werden, jedoch kann auch hier die Anordnung einer aktiven rissbreitenbegrenzenden Bewehrung an der Fundamentoberseite entfallen.

Ab einer Bauteildicke von 3,55 m bei größeren quadratischen Längsabmessungen der Bodenplatte als 15 m Seitenlänge wird der Nachweis der Rissefreiheit nicht mehr erfüllt. In dessen Folge entstehen größere Primärrisse, die wiederum durch Sekundärrisse auf die zulässige Rissbreite begrenzt werden müssen. Die Anordnung einer aktiven rissbreitenbegrenzenden Bewehrung an der Plattenoberseite gemäß Gleichung (4.38) folgt daraus.

Für die Betonrezeptur BS 1 C PLUS gelingt der Nachweis der Rissevermeidung an der Plattenoberseite, wie in Abbildung 5.16 bis Abbildung 5.18 gezeigt, aufgrund der größeren Bindemittelmenge und daraus resultierenden größeren Zwangsspannungen effektiv nur für die Konstruktionsklasse Kon_S für Bauteildicken größer 1,85 m. Für alle anderen Konstruktionsklassen entstehen durch die Zwangsschnittgrößen Primärrisse an der Plattenoberseite im gesamten Auswertungsbereich.

Jedoch unterschreitet die Primärrissbreite die zulässige Rissbreite bei der Konstruktionsklasse Kon_S für Bauteildicke $h < 60$ cm, bei der Konstruktionsklasse Kon_1 für Bauteildicken $h < 75$ cm sowie bei der Konstruktionsklasse Kon_2 für Bauteildicken $h < 90$ cm und es ist hier nur eine Bewehrung zur Sicherstellung einer robusten Betonoberfläche erforderlich.

Begrenzung der Rissbreite unter Beachtung der Verformungskompatibilität an der Plattenunterseite

An der Plattenunterseite konnte gemäß Unterabschnitt 5.2.3 gezeigt werden, dass unter Beachtung der gewählten Eingangsparameter die Bodenplatten fast im gesamten Auswertungsbereich rissfrei bleiben.

Für dünne Fundamentplatten unter einer Bauteildicke von 50 cm jedoch überschreiten die Primärrissbreiten die zulässige Rissbreite gemäß *öbv-RL „Weiße Wannen“* und die Anordnung einer rissbreitenbegrenzenden Bewehrung wird in diesen Bereichen erforderlich. [Vgl. *öbv-RL „Weiße Wannen“* (2018); S. 13]

Begrenzung der Rissbreite unter Beachtung der Verformungskompatibilität / Zusammenfassung

Für den allgemeinen Fall eines Betons der Festigkeitsklasse C 25/30 mit Materialkennwerten gemäß ÖNORM EN 1992-1-1:2015 können die vorangegangenen Auswertungen für die Konstruktionsklassen Kon_S bis Kon₂, getrennt für die Betonrezepturen BS 1 A PLUS in Abbildung 5.19 sowie BS 1 C PLUS in Abbildung 5.20 zusammengefasst werden.

In Abhängigkeit der Konstruktionsklassen können darin die Dickenbereiche der Bodenplatten eingeschränkt werden, in denen entweder eine Bewehrung zur Sicherstellung einer robusten Betonoberfläche gemäß Gleichung (4.35) ausreichend ist, oder eine aktive rissbreitenbegrenzende Bewehrung gemäß Gleichung (4.38), mindestens in eine Richtung an Ober- oder Unterseite der Bodenplatte, angeordnet werden muss.

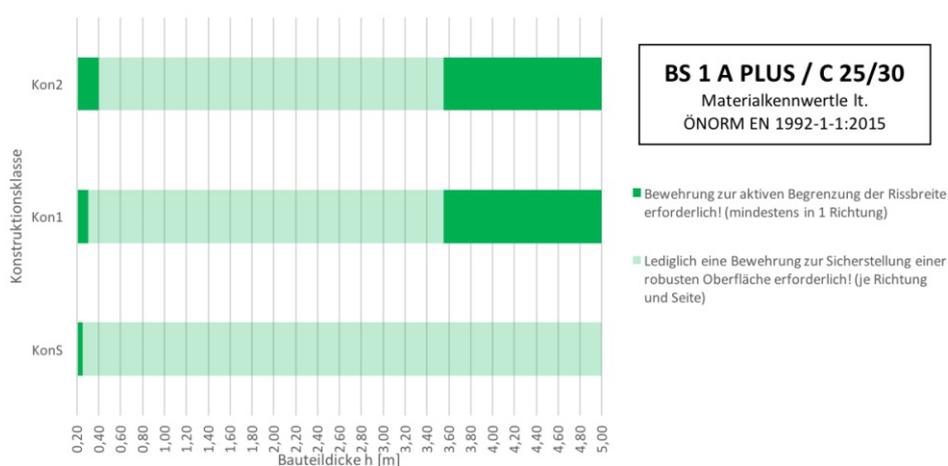


Abbildung 5.19 – Bewehrungsbereiche (aktive Rissbreitenbewehrung / Bewehrung für eine robuste Betonoberfläche) / BS 1 A PLUS mit Materialkennwerten gemäß ÖN EN 1992-1-1:2015

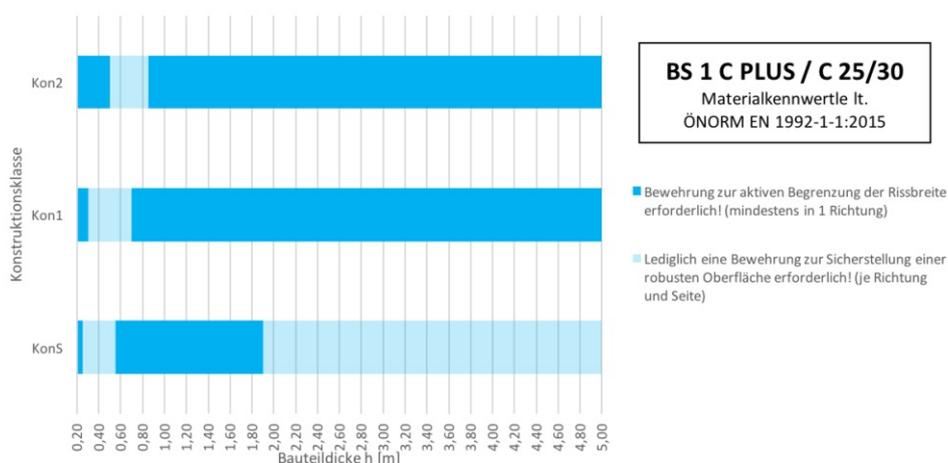


Abbildung 5.20 – Bewehrungsbereiche (aktive Rissbreitenbewehrung / Bewehrung für eine robuste Betonoberfläche) / BS 1 C PLUS mit Materialkennwerten gemäß ÖN EN 1992-1-1:2015

5.2.5 Bewehrungsvergleich *BM „WW optimiert“* versus *BM „WW klassisch“* / ÖNORM

Der Vergleich der erforderlichen Bewehrung gemäß *BM „WW optimiert“* mit der erforderlichen Bewehrung des *BM „WW klassisch“* bzw. der ÖNORM EN 1992-1-1:2015 sowie der ÖNORM B 1992-1-1:2018 erfolgt nachfolgend beispielhaft an einer quadratischen Bodenplatte mit den Maximalabmessungen der Konstruktionsklasse Kon_1 mit einer Betondeckung $c_{nom} = 4,00$ cm und der Betonrezeptur BS 1 A PLUS sowie BS 1 C PLUS. Die graphische Auswertung der Tabellenkalkulation zeigen hierzu die Abbildung 5.21 und Abbildung 5.22.

Eine vollständige Auswertung für die Betonrezepturen BS 1 A PLUS und BS 1 C PLUS mit der Festigkeitsklasse C 25/30 gemäß ÖNORM EN 1992-1-1:2015 in Abhängigkeit der Bauteildicke h im Bereich von 0,20 – 5,00 m für quadratische Fundamentplatten sowie den sechs verschiedenen Kategorien analog den Bemessungsdiagrammen in Abschnitt 4.2 liefert Anhang A.4.

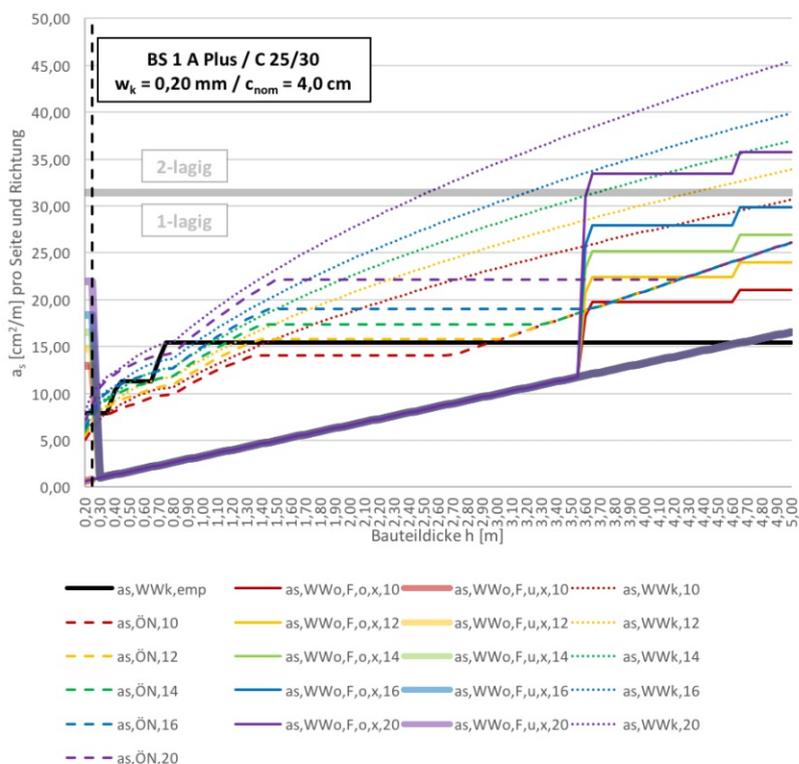


Abbildung 5.21 – Mindestbewehrungsvergleich zur Begrenzung der Rissbreite gemäß *BM „WW optimiert“* / *BM „WW klassisch“* / ÖNORM für die Konstruktionsklasse Kon_1 ($c_{nom} = 4,0$ cm; BS 1 A PLUS / C 25/30)

Betonrezeptur BS 1 A PLUS

Im Auswertungsbereich von 0,30 – 3,55 m Bauteildicke reicht aufgrund des erbrachten Nachweises der Rissevermeidung die Anordnung der Mindestbewehrung zur Sicherstellung einer robusten Betonoberfläche auf beiden Seiten und in beide Richtungen aus. Diese liegt naturgemäß deutlich unter den berechneten Werten gemäß *BM „WW klassisch“* und ÖNORM EN 1992-1-1:2015 sowie ÖNORM B 1992-1-1:2018.

Für die Begrenzung der Rissbreite an der Plattenoberseite ab einer Bauteildicke von 3,60 m wird im vorliegenden Fall eine aktive rissbreitenbegrenzende Bewehrung erforderlich. Sie unterschreitet die berechneten Werte gemäß *BM „WW klassisch“* bzw. liegt für kleinere Durchmesser im Bereich der normgemäßen Berechnung. Da die erforderliche Bewehrung, im Gegensatz zum *BM „WW klassisch“* sowie der ÖNORM, nur an der Oberseite der Fundamentplatte in beide Richtungen angeordnet werden muss, wird auch hier eine Unterschreitung der erforderlichen Gesamtbewehrungsmenge unterstellt und auch in Unterabschnitt 5.2.5 bestätigt. Lediglich die in diesen Dickenbereichen empfohlene Bewehrung gemäß den Bemessungsdiagrammen der *öbv-RL „Weiße Wannen“* wird deutlich überschritten.

An der Plattenunterseite wird hingegen lediglich bei sehr dünnen Platten bis 30 cm eine aktive rissbreitenbegrenzende Bewehrung erforderlich.

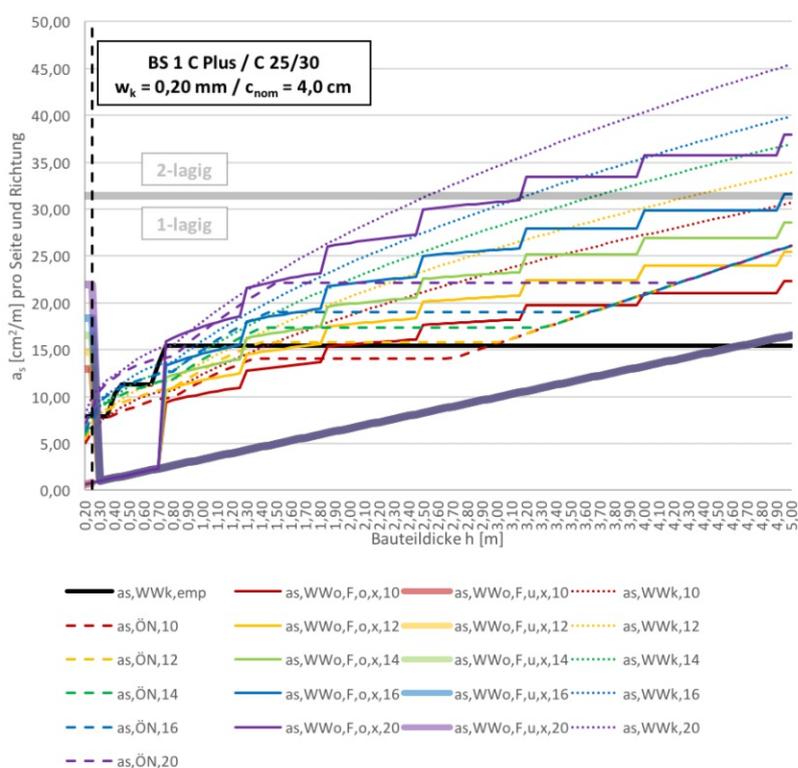


Abbildung 5.22 – Mindestbewehrungsvergleich zur Begrenzung der Rissbreite gemäß *BM „WW optimiert“* / *BM „WW klassisch“* / ÖNORM für die Konstruktionsklasse Kon_1 ($c_{nom} = 4,0$ cm; BS 1 C PLUS / C 25/30)

Betonrezeptur BS 1 C PLUS

Der hier ausgewertete Beton BS 1 C PLUS, der seinen Anwendungsbereich in Verkehrsbauwerken mit Taumittleinwirkung findet, unterscheidet sich zum vorher verwendeten Beton BS 1 A PLUS für den vorliegenden Formelapparat lediglich in der maximal verwendeten Bindemittelmenge.

Dieser Unterschied bewirkt jedoch, dass die Erfüllung des Nachweises der Rissevermeidung gemäß *öbv-MB „Weiße Wanne optimiert“* lediglich in einem sehr eingeschränkten Auswertungs-

bereich von 0,30 – 0,70 m Bauteildicke erfüllt wird. Hier kann eine aktive rissbreitenbegrenzende Bewehrung entfallen. Es ist nur eine Anordnung der Mindestbewehrung zur Sicherstellung einer robusten Betonoberfläche erforderlich.

Bei Bauteildicken unter 30 cm bzw. über 70 cm ist eine aktive rissbreitenbegrenzende Bewehrung an Plattenunter- oder Plattenoberseite anzuordnen. Sie liegen dabei in etwa gleicher Größenordnung wie die Angaben aus dem *BM „WW klassisch“* und denen der ÖNORM EN 1992-1-1:2015 sowie der ÖNORM B 1992-1-1:2018.

Die Bewehrungsangaben des *BM „WW optimiert“* beziehen sich jedoch auch hier nur auf eine Richtung und Seite. Daher kann analog zur vorangegangenen Auswertung davon ausgegangen werden, dass die erforderliche Gesamtbewehrung in Unterabschnitt 5.2.5 unter den Werten der Bemessungsdiagramme gemäß *öbv-RL „Weiße Wannen“* und der ÖNORM liegen wird.

5.2.6 Bewehrungsgehalt *BM „WW optimiert“* versus *BM „WW klassisch“* / ÖNORM

Dieser Abschnitt der Auswertung soll einen praxisnäheren Vergleich der erforderlichen Bewehrung sowie dem erforderlichen Gesamtbewehrungsgehalt pro Quadratmeter Bodenplatte ermöglichen.

Gemäß *öbv-RL „Weiße Wannen“* ist für die Erfüllung des Gebrauchstauglichkeitsnachweises die Bewehrung so zu konstruieren, dass durch die Anordnung eines quadratischen Bewehrungsnetzes mit einem Maximalabstand von 15 cm eventuell auftretende Risse möglichst fein verteilt werden. Aus baupraktischen Gründen wird zusätzlich ein Minimalabstand von 10 cm festgelegt, damit ein ordnungsgemäßer Einbau des Betons gewährleistet werden kann. [Vgl. *öbv-RL „Weiße Wannen“* (2018); S. 13]

Die im vorangegangenen Unterabschnitt ermittelte erforderliche Bewehrung wird zu diesem Zwecke einer Flächenbewehrung, analog der empfohlenen Bewehrung in den Bemessungsdiagrammen der *öbv-RL „Weiße Wannen“*, zugeordnet und im Anschluss auf den Gesamtbewehrungsgehalt ρ in kg/m^2 hochgerechnet. Eine vollständige Auswertung für die Betonrezepturen BS 1 A PLUS und BS 1 C PLUS mit den bereits bekannten Eingangswerten und Unterscheidungen liefert Anhang A.4.

Betonrezeptur BS 1 A PLUS

Für die Auswertung der Betonrezeptur BS 1 A PLUS für den allgemeinen Fall mit Materialkennwerten gemäß ÖN EN 1992-1-1:2015 für die maximalen quadratischen Abmessungen der Konstruktionsklasse Kon_1 sowie einer Betondeckung von 4,0 cm ergeben sich dadurch die farbige dargestellten Stufenlinien in Abbildung 5.23 für die erforderliche Flächenbewehrung.

Zur Erklärung wird exemplarisch die Auswertung für die Bauteildicke $h = 1,40$ m nachstehend erörtert und in Tabelle 5.3 zusammengefasst.

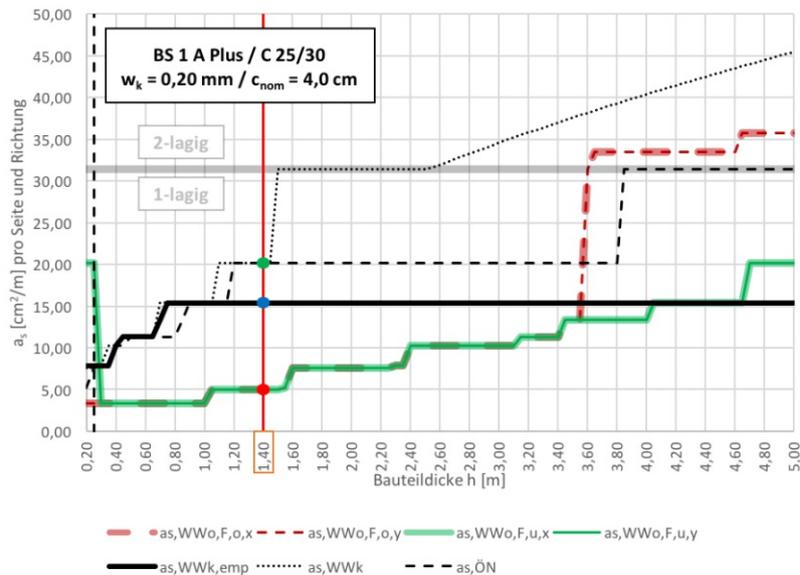


Abbildung 5.23 – Erforderliche Bewehrung der *BM „WW klassisch“* ($a_{s,WWk}$ & $a_{s,WWk,emp}$) / ÖNORM ($a_{s,ÖN}$) / *BM „WW optimiert“* ($a_{s,WWo,F,i,j}$) für die Konstruktionsklasse Kon₁ ($c_{nom} = 4,0$ cm; BS 1 A PLUS)

Nach dem *BM „WW optimiert“* gelingt hier der Nachweis der Rissevermeidung und es wird ausschließlich eine Mindestbewehrung zur Sicherstellung einer robusten Betonoberfläche in beide Richtungen an Ober- und Unterseite in der Größenordnung von $4,63$ cm^2/m erforderlich.

Unter der Voraussetzung eines quadratischen Bewehrungsnetzes im Abstand von 10 bzw. 15 cm kann eine Flächenbewehrung $\varnothing 8/10$ cm mit einer vorhandenen Bewehrung von $5,03$ cm^2/m angeordnet werden (roter Punkt in Abbildung 5.23).

Für das *BM „WW klassisch“* ergibt sich für diese Bauteildicke eine weitaus größere erforderliche Bewehrung von $19,68$ cm^2/m erst mit dem Stabdurchmesser $d_s = 16$ mm, da für die darunterliegenden Stabdurchmesser keine zugehörige Flächenbewehrung mit einem Mindestabstand von 10 cm gefunden werden kann. Gleiches gilt für die normgemäß berechnete erforderliche Bewehrung von $18,67$ cm^2/m . Für beide Fälle wird daher eine Flächenbewehrung $\varnothing 16/10$ cm mit einer vorhandenen Bewehrung von $20,11$ cm^2/m angeordnet (grüner Punkt in Abbildung 5.23). Nach den Bemessungsdiagrammen gemäß Abbildung 4.2 (links) in Abschnitt 4.2 wird für Bauteildicken größer 1,0 m im vorliegenden Fall eine Flächenbewehrung mit $\varnothing 14/10$ cm ($15,39$ cm^2/m) empfohlen (blauer Punkt in Abbildung 5.23).

Tabelle 5.3 – Erforderliche Bewehrung der *BM „WW klassisch“* ($a_{s,WWk}$ & $a_{s,WWk,emp}$ / ÖNORM ($a_{s,ÖN}$) / *BM „WW optimiert“* ($a_{s,WWo,F,i,j}$) für die Bauteildicke $h = 1,40$ m / Konstruktionsklasse Kon_1 ($c_{nom} = 4,0$ cm; BS 1 A PLUS)

Bemessungsmodell	Ø	BM „WW optimiert“				BM „WW klassisch“		ÖNORM
		$a_{s,WWo,F,o,x}$	$a_{s,WWo,F,o,x}$	$a_{s,WWo,F,o,x}$	$a_{s,WWo,F,o,x}$	$a_{s,WWk}$	$a_{s,WWk,emp}$	$a_{s,ÖN}$
erforderlich	Ø8	4,63	4,63	4,63	4,63	-	-	-
	Ø10	4,63	4,63	4,63	4,63	15,20 ¹⁾	-	14,08 ¹⁾
	Ø12	4,63	4,63	4,63	4,63	16,78 ¹⁾	-	15,76 ¹⁾
	Ø14	4,63	4,63	4,63	4,63	18,27 ¹⁾	-	17,32 ¹⁾
	Ø16	4,63	4,63	4,63	4,63	19,68	-	18,67
	Ø20	4,63	4,63	4,63	4,63	22,32	-	21,23
angeordnet	Ø8-20/10-15	4 * 5,03 (Ø8/10)				4 * 20,11 (Ø16/10)	4 * 15,39 (Ø14/10)	4 * 20,11 (Ø16/10)

¹⁾ Für die erforderliche Bewehrung existiert keine zulässige Flächenbewehrung mit dem gewählten Stabdurchmesser im Abstand von 10 cm bzw. 15 cm.

Wird der gesamte Auswertungsbereich von 0,20 – 5,00 m Bauteildicke betrachtet, zeigt Abbildung 5.23 eine Problematik auf, die bis jetzt in dieser Arbeit keine Beachtung gefunden hat. Im vorliegenden Fall überschreitet die erforderliche aktive rissbreitenbegrenzende Bewehrung an der Plattenoberseite den Grenzwert einer einlagigen Flächenbewehrung Ø20/10 cm mit 31,42 cm²/m ab einer Bauteildicke von 3,55 m.

Darüber hinaus müsste eine zweilagige Bewehrung in der betroffenen Richtung angeordnet werden oder die Berechnung und Betrachtung auf größere Stabdurchmesser als 20 mm erweitert werden. Diese Erweiterung wird in dieser Arbeit jedoch nicht weiterverfolgt und es wird lediglich auf diese Grenze in Abbildung 5.21 bis Abbildung 5.23 sowie in den Abbildungen in Anhang A.4 darauf verwiesen.

Gesamtbewehrungsgehalt ρ

Der Gesamtbewehrungsgehalt in kg/m² kann mit Hilfe der Gleichung (5.3) für die angeordnete Flächenbewehrung gemäß *BM „WW optimiert“* und für das *BM „WW klassisch“* nach Gleichung (5.4) sowie die Bewehrung laut ÖNORM EN 1992-1-1:2015 und ÖNORM B 1992-1-1:2018 nach Gleichung (5.5) ermittelt werden.

$$\rho_{WWo} = (a_{s,WWo,F,o,x} + a_{s,WWo,F,o,y} + a_{s,WWo,F,u,x} + a_{s,WWo,F,u,y}) \cdot l \cdot \gamma_s \quad (5.3)$$

$$\rho_{WWk} = 4 \cdot a_{s,WWk} \cdot l \cdot \gamma_s \quad (5.4)$$

$$\rho_{\ddot{O}N} = 4 \cdot a_{s,\ddot{O}N} \cdot l \cdot \gamma_s \quad (5.5)$$

mit

ρ_i	Gesamtbewehrungsgehalt in Abhängigkeit des Bemessungsmodelles in kg/m^2
$a_{s,WWo,F,i,j}$	angeordnete Flächenbewehrung je Seite und Richtung für das <i>BM „WW optimiert“</i> in cm^2/m
$a_{s,WWk}$	angeordnete Flächenbewehrung je Seite und Richtung für das <i>BM „WW klassisch“</i> in cm^2/m
$a_{s,\ddot{O}N}$	angeordnete Flächenbewehrung je Seite und Richtung gemäß ÖNORM EN 1992-1-1:2015 bzw. ÖNORM B 1992-1-1:2018 in cm^2/m
l	Länge; $l = 100 \text{ cm}$
γ_s	Wichte der Betonstahlbewehrung; $\gamma_s = 0,00785 \text{ kg/cm}^3$

Der so ermittelte Gesamtbewehrungsgehalt kann über den gesamten Auswertungsbereich von 0,20 – 5,00 m Bauteildicke in Abbildung 5.24 abgebildet werden. Es kann dabei gezeigt werden, dass dieser beim *BM „WW optimiert“*, bis auf die Extremfälle einer sehr dünnen Bodenplatte, bis zu einer Bauteildicke von 3,55 m weit unter den geforderten Werten der ÖNORM sowie dem *BM „WW klassisch“* zu liegen kommen.

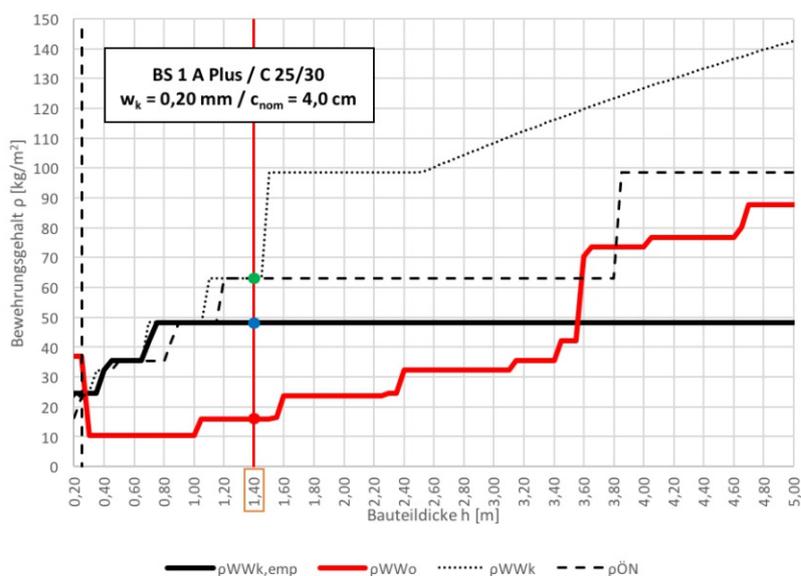


Abbildung 5.24 – Gesamtbewehrungsgehalt der *BM „WW klassisch“* ($\rho_{\text{s,WWk}}$ & $\rho_{\text{s,WWk,emp}}$) / ÖNORM ($\rho_{\text{s,ÖN}}$) / *BM „WW optimiert“* ($\rho_{\text{s,WWo}}$) für die Konstruktionsklasse Kon₁ ($c_{\text{nom}} = 4,0 \text{ cm}$; BS 1 A PLUS)

Für den zuvor näher betrachteten, exemplarischen Fall einer Bodenplatte mit einer Bauteildicke $h = 1,40 \text{ m}$ ergibt sich dadurch für das *BM „WW klassisch“* sowie für die Mindestbewehrung gemäß ÖNORM EN 1992-1-1:2015 und ÖNORM EN 1992-1-1:2018 ein Bewehrungsgehalt von 63 kg/m^2 (grüner Punkt in Abbildung 5.24). Für die empfohlene Bewehrung gemäß den Bemessungsdiagrammen der *öbv-RL „Weiße Wannен“* ergibt sich ein Bewehrungsgehalt von 48 kg/m^2 (blauer Punkt in Abbildung 5.24) sowie für das *BM „WW optimiert“* ein deutlich günstigerer Wert von 16 kg/m^2 (roter Punkt in Abbildung 5.24)

Setzt man die Bewehrungsgehalte des *BM „WW klassisch“* und die der Normberechnung mit dem Bewehrungsgehalt des *BM „WW optimiert“* schlussendlich ins Verhältnis, so kann die prozentuelle Abweichung der beiden Modelle zum *BM „WW optimiert“* in Abbildung 5.25 dargestellt werden.

Hier wird für die betrachtete Betonrezeptur BS 1 A PLUS deutlich, dass die Bewehrungsgehalte bis zu einer Bauteildicke von $3,00 \text{ m}$ mindestens um ein Drittel unter den Werten der beiden anderen Modelle zu liegen kommen. Dort, wo der Nachweis der Rissevermeidung gemäß *öbv-MB „Weiße Wanne optimiert“* nicht mehr vollständig gelingt, nähern sich die Bewehrungsgehalte den berechneten Werten gemäß *BM „WW klassisch“* sowie der ÖNORM EN 1992-1-1:2015 und ÖNORM B 1992-1-1:2018 an, bleiben aber auch hier in Summe circa 15 % unter diesen. Lediglich die empfohlenen Bewehrungsgehalte in den Bemessungsdiagrammen der *öbv-RL „Weiße Wannен“* werden um 50 % und mehr überschritten.

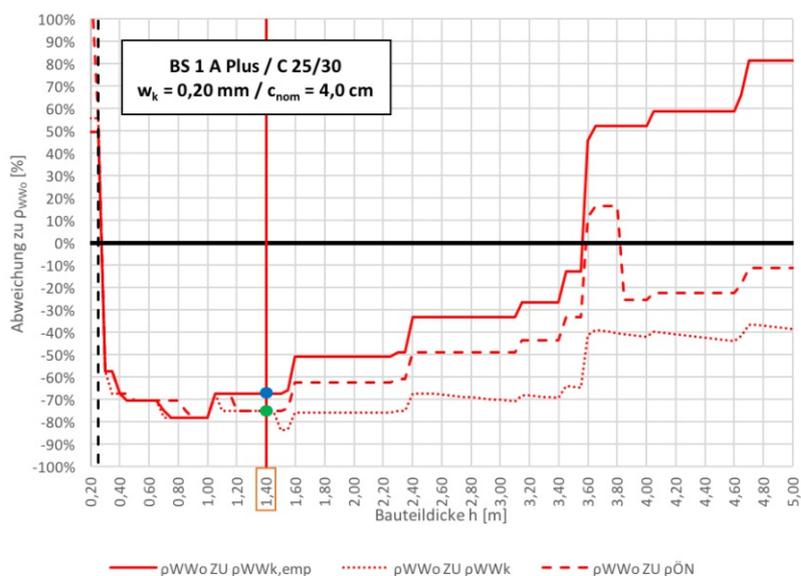


Abbildung 5.25 – Abweichung der Bewehrungsgehalte gemäß *BM „WW klassisch“* sowie laut ÖNORM EN 1992-1-1:2015 / ÖNORM B 1992-1-1:2018 zum *BM „WW optimiert“* in Prozent für die Betonrezeptur BS 1 A PLUS

Betonrezeptur BS 1 C PLUS

Für die Auswertung der Betonrezeptur BS 1 C PLUS für den allgemeinen Fall mit Materialkennwerten gemäß ÖN EN 1992-1-1:2015 für die maximalen quadratischen Abmessungen der Konstruktionsklasse Kon_1 sowie einer Betondeckung von 4,0 cm kann die gleiche Vorgehensweise wie für die Betonrezeptur BS 1 A PLUS gewählt werden. Analog zu Abbildung 5.24 ergeben sich dadurch die Gesamtbewehrungsgehalte gemäß Abbildung 5.26.

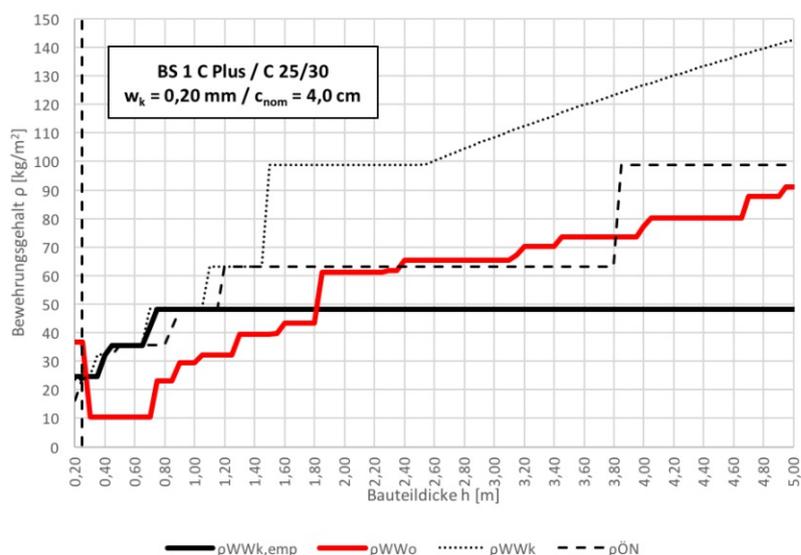


Abbildung 5.26 – Gesamtbewehrungsgehalt der *BM „WW klassisch“* ($\rho_{s,WWk}$ & $\rho_{s,WWk,emp}$) / ÖNORM ($\rho_{s,ÖN}$) / *BM „WW optimiert“* ($\rho_{s,WWo}$) für die Konstruktionsklasse Kon_1 ($c_{nom} = 4,0$ cm; BS 1 C PLUS)

Wie bereits in den vorangegangenen Unterabschnitten gezeigt, wird der Nachweis der Rissvermeidung gemäß *öbv-MB „Weiße Wanne optimiert“* nur in einem sehr eingeschränkten Dickenbereich von 0,30 m bis 0,70 m vollständig eingehalten. Primärrisse entstehen unter 0,30 m Plattendicke an der Plattenunterseite sowie über 0,70 m Plattendicke an der Plattenoberseite. Daher ist hier eine aktive rissbreitenbegrenzende Bewehrung erforderlich. Es kann jedoch in Abbildung 5.26 gezeigt werden, dass der Bewehrungsgehalt auch mit dieser bis zu einer Bauteildicke von 1,80 m unter den Bewehrungsgehalten des *BM „WW klassisch“* sowie der normgemäßen Berechnung zu liegen kommt.

Schlussendlich zeigt auch hier der prozentuelle Vergleich der Bewehrungsgehalte des *BM „WW optimiert“* mit den übrigen Modellen in Abbildung 5.27 bis zu einer Bauteildicke von 1,80 m ein erhebliches Einsparungspotenzial. Lässt man den Vergleich mit der empfohlenen Bewehrung aus den Bemessungsdiagrammen der *öbv-RL „Weiße Wannen“* außer Acht, liegen die Bewehrungsgehalte des *BM „WW optimiert“* ab einer Bauteildicke von 0,70 m circa 40 % unter den berechneten Werten des *BM „WW klassisch“* sowie ungefähr gleich auf mit den Werten der normgemäß ermittelten Bewehrungsgehalte.

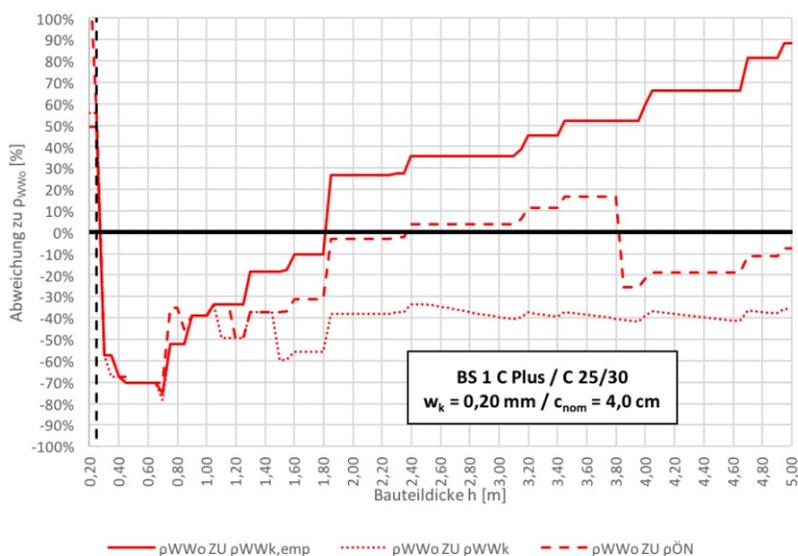


Abbildung 5.27 – Abweichung der Bewehrungsgehalte gemäß *BM „WW klassisch“* sowie laut ÖNORM EN 1992-1-1:2015 / ÖNORM B 1992-1-1:2018 zum *BM „WW optimiert“* in Prozent für die Betonrezeptur BS 1 C PLUS

In Anhang A.4 werden die Auswertungen für quadratische Bodenplatten mit den jeweiligen Maximalabmessungen für die Betone BS 1 A PLUS sowie BS 1 C PLUS mit den allgemeinen Materialparametern der Festigkeitsklasse C 25/30 gemäß ÖNORM EN 1992-1-1:2015 in Abhängigkeit der Konstruktionsklassen Kon_S , Kon_1 und Kon_2 sowie der Betondeckung von 3,0 cm bzw. 4,0 cm aufgelistet.

6 Ergebnisse

In den nachfolgenden Unterabschnitten werden die Erkenntnisse und Ergebnisse der in Kapitel 5 geführten Auswertung zusammengefasst dargestellt.

6.1 *BM „WW klassisch“ versus ÖNORM*

Der Vergleich der erforderlichen aktiven rissbreitenbegrenzenden Bewehrung in den Bemessungsdiagrammen der *öbv-RL „Weiße Wannen“* und jener Bewehrung nach den Gebrauchstauglichkeitsnachweisen der ÖNORM EN 1992-1-1:2015 sowie der ÖNORM B 1992-1-1:2018 zeigt ständig den gleichen charakteristischen Verlauf gemäß der exemplarischen Abbildung 5.1 in Unterabschnitt 5.1.2 für die Konstruktionsklasse Kon_1 mit einer Betondeckung c_{nom} von 4,0 cm für alle Konstruktionsklassen (Kon_s , Kon_1 und Kon_2), Betondeckungen ($c_{nom} = 3,0$ bzw. 4,0 cm) und Stabdurchmesser ($d_s = 10-20$ mm) in Abhängigkeit des verwendeten Betonstandards BS 1 oder BS 1 PLUS.

Für den Betonstandard BS 1 liegen die Werte der normgemäß erforderlichen Bewehrung bis zu einer Bauteildicke von circa 1,50 m über den angegebenen Werten der Bemessungsdiagramme des *BM „WW klassisch“*. Im darauffolgenden Dickenbereich bildet sich auf Grundlage des Formelapparates nach MAURER *et al.* (2005) und MAURER (2007) ein konstantes Plateau der erforderlichen Bewehrung aus und die normgemäßen Bewehrungsmengen fallen unter die geforderten Bewehrungsmengen nach *BM „WW klassisch“* ab.

Bei Anwendung des Betonstandards BS 1 PLUS hingegen werden die normgemäß berechneten Werte der erforderlichen Bewehrung in keinem Punkt des Auswertungsbereiches bis zu einer Bauteildicke von 5,0 m überschritten.

Vor allem die Annahme der effektiven Zugfestigkeit des Betons zum Risszeitpunkt mit 30 % der mittleren Zugfestigkeit und die empfohlene Bewehrungsmenge in den Bemessungsdiagrammen auch für Bauteildicken über 100 cm werden in diesem Zusammenhang als kritisch betrachtet, da diese nicht im Einklang mit den Angaben in der ÖNORM EN 1992-1-1:2015 sowie der ÖNORM B 1992-1-1:2018 stehen.

6.2 *BM „WW optimiert“ versus BM „WW klassisch“ / ÖNORM*

In Abschnitt 5.2 wurde die Auswertung für das *BM „WW optimiert“* an annähernd quadratischen Bodenplatten geführt und die somit errechneten Bewehrungsmengen mit jenen laut *BM „WW klassisch“* sowie der ÖNORM EN 1992-1-1:2015 und ÖNORM B 1992-1-1:2018 verglichen. Es wurden dabei nachfolgende Eingangsparameter verwendet:

- Elastizitätsmodul des anschließenden Erdreichs $E_B = 100 \text{ N/mm}^2$
- Wärmeausdehnungskoeffizient des Betons $\alpha_T = 10,0 \cdot 10^{-6}/\text{K}$

Für die Auswertung wurden einerseits die Materialkennwerte gemäß der neun beispielhaft angeführten Betone im *öbv-MB „Weiße Wanne optimiert“* sowie für den allgemeinen Fall eines BS 1 A PLUS und BS 1 C PLUS mit den normgemäßen Materialkennwerten der Festigkeitsklasse C 25/30 und nachstehender Parameter herangezogen.

- maximale Hydratationswärme $Q_{max} = 300,52 \text{ J/g}$
- BS 1 A PLUS / maximale Bindemittelmenge $m_{BM} = 315 \text{ kg/m}^3$
- BS 1 C PLUS / maximale Bindemittelmenge $m_{BM} = 360 \text{ kg/m}^3$

6.2.1 *Betone mit Materialkennwerten gemäß öbv-MB „Weiße Wanne optimiert“*

Für die neun beispielhaft angeführten Betone konnte in der vorangegangenen Auswertung gezeigt werden, dass diese den Nachweis der Rissevermeidung gemäß *öbv-MB „Weiße Wanne optimiert“* annähernd im gesamten Auswertungsbereich, mit Ausnahme sehr dünner Platten unter einer Bauteildicke von circa 30 cm, erfüllen und somit nur eine Mindestbewehrung zur Sicherstellung einer robusten Betonoberfläche an Ober- und Unterseite je Richtung erfordern. Diese Erkenntnisse der Rissefreiheit konnten durchgehend für alle Konstruktionsklassen und somit für alle Längsabmessungen bis zu 60 m Seitenlänge erbracht werden.

Für diese Betone kann somit das größte Einsparungspotential in Hinblick auf die erforderliche Bewehrungsmenge mobilisiert werden. Abbildung 6.1 zeigt hierzu beispielhaft die erforderliche Bewehrungsmenge pro Seite und Richtung für die Betonrezeptur BS 1 A PLUS / Typ 1 gemäß Tabelle 4.2 bei der Konstruktionsklasse Kon_2 für die Bemessungsmodelle *BM „WW klassisch“*, sowie ÖNORM EN 1992-1-1:2015 / ÖNORM B 1992-1-1:2018.

Eine allgemeine Angabe der Bewehrung bei Verwendung des Betonstandards BS 1 PLUS gemäß den Bemessungsdiagrammen nach *öbv-RL „Weiße Wannen“* kann jedoch nicht erbracht werden, da die Bewehrung zur Sicherstellung einer robusten Betonoberfläche gemäß Gleichung (4.35) abhängig von den versuchstechnisch ermittelten Materialkennwerten des verwendeten Betons ist.

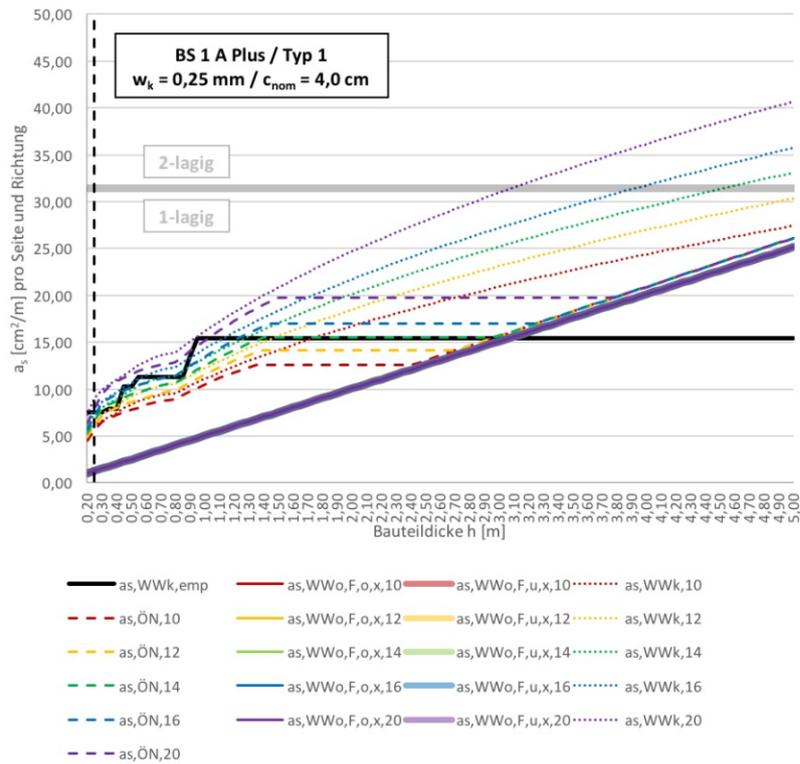


Abbildung 6.1 – Mindestbewehrungsvergleich zur Begrenzung der Rissbreite gemäß *BM „WW optimiert“* / *BM „WW klassisch“* / ÖNORM für die Konstruktionsklasse Kon_2 ($c_{nom} = 4,0$ cm; BS 1 A PLUS / Typ 1)

6.2.2 Betone mit Materialkennwerten gemäß ÖNORM EN 1992-1-1:2015

Da mit den beispielhaft angeführten Betonrezepturen gute Ergebnisse beim Nachweis der Rissevermeidung gezeigt werden konnten, wurde im Anschluss daran versucht, diese Ergebnisse auf den allgemein gültigen Fall einer Betonrezeptur mit normgemäßen Materialkennwerten umzulegen. Die untersuchten Betonrezepturen BS 1 A PLUS und BS 1 C PLUS unterschieden sich dabei lediglich in der maximal verwendeten Bindemittelmenge.

Betonrezeptur BS 1 A PLUS

Für die Betonrezeptur BS 1 A PLUS mit einer maximalen empfohlenen Bindemittelmenge von 315 kg/m^3 kann gezeigt werden, dass auch für dieses „worst case“-Szenario ausgedehnte Dickenbereiche gefunden werden können, die den Nachweis der Rissevermeidung erfüllen.

Wie bereits in Abbildung 5.19 gezeigt werden konnte, reicht die Anordnung einer Mindestbewehrung zur Sicherstellung einer robusten Betonoberfläche bei Bauteildicken von 0,40 m bis 3,55 m unabhängig von der angewandten Konstruktionsklasse hierfür aus. Für die Konstruktionsklasse Kon_5 kann dieser Bereich sogar auf den gesamten Auswertungsbereich unter Berücksichtigung der Mindestbauteildicke von 40 cm ausgeweitet werden. Für alle weiteren Bereiche muss zur Begrenzung der Primärrissbreite eine aktive rissbreitenbegrenzende Bewehrung an mindestens einer Seite der Bodenplatte angeordnet werden. Hier konnte in den vorangegangenen Auswertungen gezeigt werden, dass durch die Anwendung des *BM „WW optimiert“* im

direkten Vergleich des Gesamtbewehrungsgebietes zu den anderen Bemessungsmodellen und Nachweisformaten ein erhebliches Einsparungspotential vorhanden ist. Zusammengefasst können diese Ergebnisse in den Abbildung 6.2, Abbildung 6.3 sowie Abbildung 6.4 für die unterschiedlichen Konstruktionsklassen und Betondeckungen dargestellt werden.

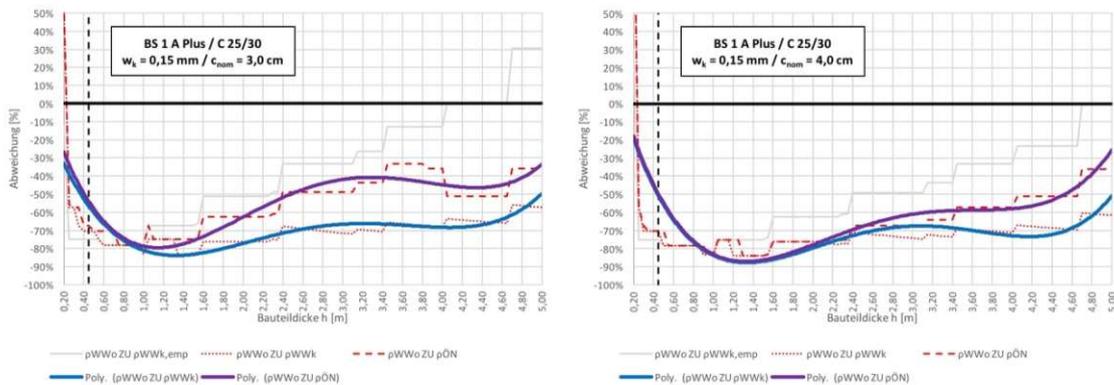


Abbildung 6.2 – Abweichung der Bewehrungsgehalte gemäß *BM „WW klassisch“* sowie laut ÖNORM EN 1992-1-1:2015 / ÖNORM B 1992-1-1:2018 zum *BM „WW optimiert“* in Prozent für die Betonrezeptur BS 1 A PLUS für die Konstruktionsklasse $Kon_s / c_{nom} = 3,0$ cm (links) und 4,0 cm (rechts)

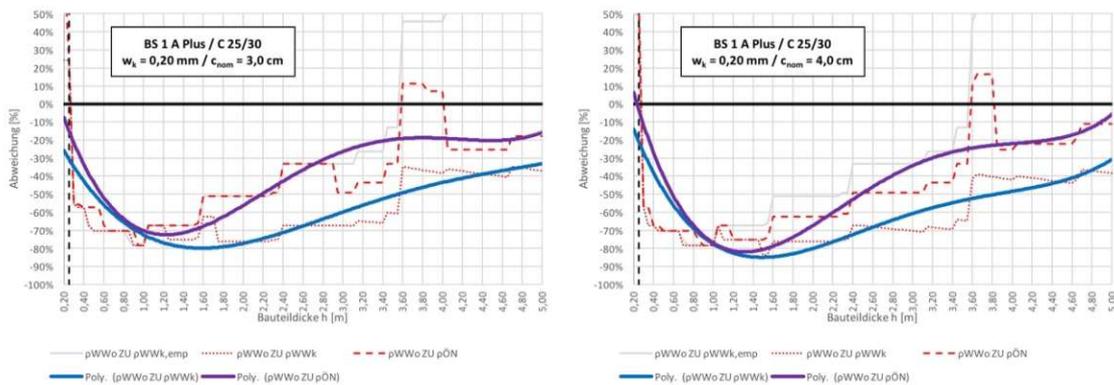


Abbildung 6.3 – Abweichung der Bewehrungsgehalte gemäß *BM „WW klassisch“* sowie laut ÖNORM EN 1992-1-1:2015 / ÖNORM B 1992-1-1:2018 zum *BM „WW optimiert“* in Prozent für die Betonrezeptur BS 1 A PLUS für die Konstruktionsklasse $Kon_1 / c_{nom} = 3,0$ cm (links) und 4,0 cm (rechts)

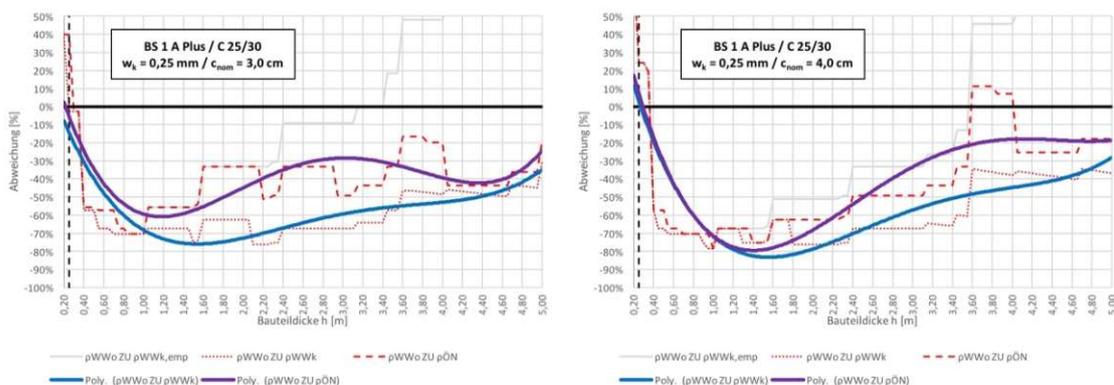


Abbildung 6.4 – Abweichung der Bewehrungsgehalte gemäß *BM „WW klassisch“* sowie laut ÖNORM EN 1992-1-1:2015 / ÖNORM B 1992-1-1:2018 zum *BM „WW optimiert“* in Prozent für die Betonrezeptur BS 1 A PLUS für die Konstruktionsklasse $Kon_2 / c_{nom} = 3,0$ cm (links) und 4,0 cm (rechts)

Lässt man den Vergleich des Gesamtbewehrungsgehaltes mit dem Bewehrungsgehalt für die gemäß *öbv-RL „Weiße Wannen“* empfohlene Bewehrung außer Acht (hellgraue Volllinie), kann gezeigt werden, dass für die Betonrezeptur BS 1 A PLUS im Durchschnitt bis auf wenige Teilbereiche eine Einsparung von mindestens 30 % im Bereich des Möglichen liegen.

Betonrezeptur BS 1 C PLUS

Wie in Abbildung 6.5 ersichtlich, reduzieren sich bei der Betonrezeptur BS 1 C PLUS aufgrund der hier höheren zulässigen Bindemittelmenge von 360 kg/m³ diejenigen Dickenbereiche, in denen der Nachweis der Rissevermeidung gesamt erfolgreich geführt werden kann, auf nur wenige kleine Bereiche.

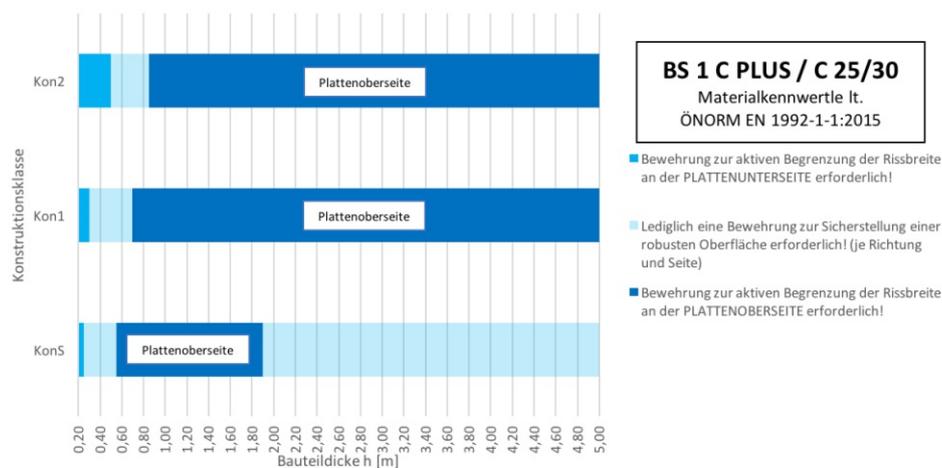


Abbildung 6.5 – Bewehrungsbereiche (aktive Rissbreitenbewehrung an Plattenunterseite bzw. Plattenoberseite / Bewehrung für eine robuste Betonoberfläche) / BS 1 C PLUS mit Materialkennwerten gemäß ÖN EN 1992-1-1:2015

Hier zeigen die Ergebnisse der Auswertung jedoch, dass eine aktive rissbreitenbegrenzende Bewehrung im Allgemeinen an der Plattenoberseite erforderlich wird. An der Plattenunterseite kann der Nachweis der Rissevermeidung, mit Ausnahme dünner Platten unter 50 cm Bauteildicke, im gesamten Auswertungsbereich unabhängig von der angewandten Konstruktionsklasse erbracht werden. Auch für die Betonrezeptur BS 1 C PLUS konnte in den vorangegangenen Auswertungen gezeigt werden, dass durch die Anwendung des *BM „WW optimiert“* im direkten Vergleich des Gesamtbewehrungsgehaltes zu den anderen Bemessungsmodellen und Nachweisformaten ein erhebliches Einsparungspotential gegeben ist.

Zusammengefasst können diese Ergebnisse in Abbildung 6.6, Abbildung 6.7 sowie Abbildung 6.8 für die unterschiedlichen Konstruktionsklassen und Betondeckungen dargestellt werden. Lässt man den Vergleich des Gesamtbewehrungsgehaltes mit dem Bewehrungsgehalt für die gemäß *öbv-RL „Weiße Wannen“* empfohlene Bewehrung außer Acht (hellgraue Volllinie), kann

gezeigt werden, dass auch für die Betonrezeptur BS 1 C PLUS im Durchschnitt bis auf wenige Teilbereiche eine Einsparung von mindestens 20 % im Bereich des Möglichen liegt.

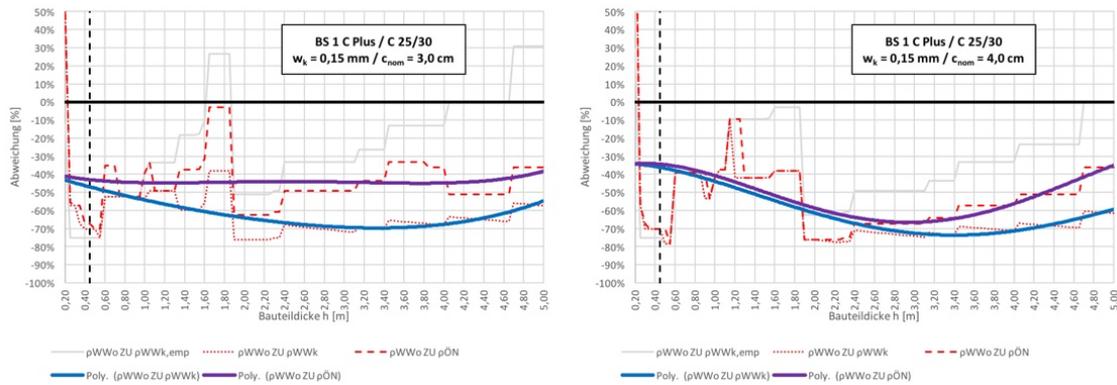


Abbildung 6.6 – Abweichung der Bewehrungsgehalte gemäß *BM „WW klassisch“* sowie laut ÖNORM EN 1992-1-1:2015 / ÖNORM B 1992-1-1:2018 zum *BM „WW optimiert“* in Prozent für die Betonrezeptur BS 1 C PLUS für die Konstruktionsklasse $Kon_s / c_{nom} = 3,0$ cm (links) und 4,0 cm (rechts)

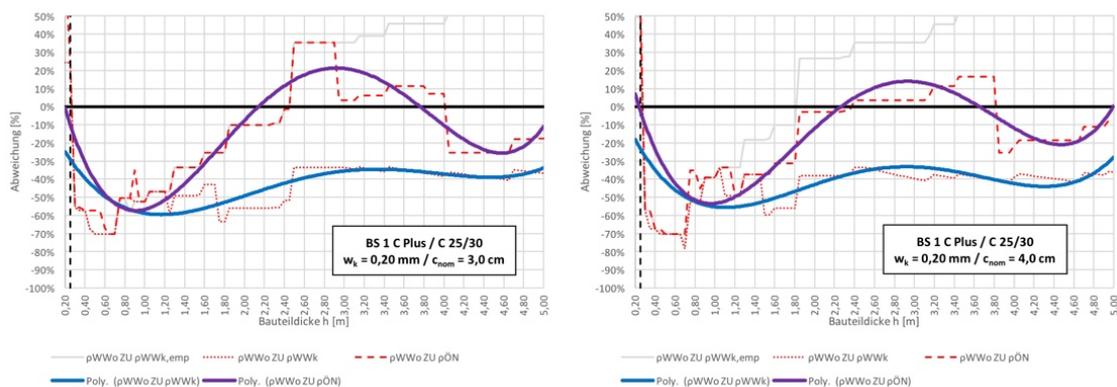


Abbildung 6.7 – Abweichung der Bewehrungsgehalte gemäß *BM „WW klassisch“* sowie laut ÖNORM EN 1992-1-1:2015 / ÖNORM B 1992-1-1:2018 zum *BM „WW optimiert“* in Prozent für die Betonrezeptur BS 1 C PLUS für die Konstruktionsklasse $Kon_1 / c_{nom} = 3,0$ cm (links) und 4,0 cm (rechts)

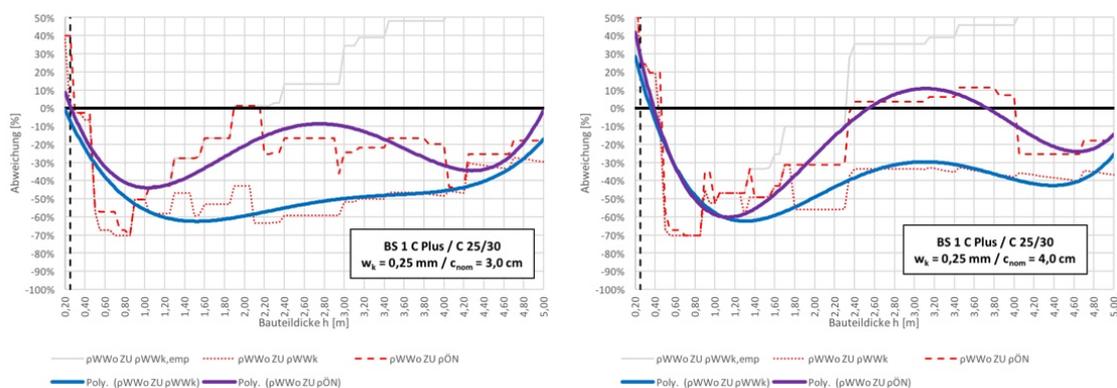


Abbildung 6.8 – Abweichung der Bewehrungsgehalte gemäß *BM „WW klassisch“* sowie laut ÖNORM EN 1992-1-1:2015 / ÖNORM B 1992-1-1:2018 zum *BM „WW optimiert“* in Prozent für die Betonrezeptur BS 1 C PLUS für die Konstruktionsklasse $Kon_2 / c_{nom} = 3,0$ cm (links) und 4,0 cm (rechts)

7 Zusammenfassung und Fazit

Das letzte Kapitel 7 / Zusammenfassung und Fazit schließt diese Masterarbeit ab. Die wesentlichen Inhalte der Arbeit werden zusammengefasst und um das Fazit des Autors ergänzt.

7.1 Zusammenfassung

Bauwerke im Einflussbereich von Bodenfeuchte, nichtdrückendem oder drückendem Wasser müssen wie alle Bauwerke neben der Tragfähigkeit im Speziellen auch die Gebrauchstauglichkeit und Dauerhaftigkeit in Hinblick auf einen angemessenen Feuchteschutz gerecht werden. So wie die Größe und Häufigkeit der Feuchtigkeitsbeanspruchung beeinflusst auch die geplante Art und Nutzung des Bauwerks den Umfang der erforderlichen Maßnahmen. Müssen erdberührte Bauteile vor Feuchtezutritt geschützt werden, kommt neben schwarzen und braunen Wannens sowie Wannens mit Folienabdichtungen im modernen Stahlbetonbau die Bauweise der Weißen Wannens zum Einsatz. Hier übernimmt die Stahlbetonkonstruktion neben der tragenden auch die abdichtende Funktion.

Die vierte Auflage der öbv-Richtlinie „Wasserundurchlässige Betonbauwerke – Weiße Wannens“ stellt hierzu den aktuellen Stand der Technik dar. Neben dem bekannten Bemessungsmodell „Weiße Wanne klassisch“, dessen Ziel die Begrenzung der Rissbreiten ist, wurde in der Neuauflage der Richtlinie auch das Bemessungsmodell „Weiße Wanne optimiert“ eingeführt. Dieses neue Bemessungsmodell verfolgt das Prinzip der Rissevermeidung mithilfe der Bontontechnologie durch Einführung des zusätzlichen Betonstandards BS 1 PLUS und weiterer konstruktiver wie ausführungstechnischer Einschränkungen. Ergänzend hierzu wurde das öbv-Merkblatt „Analytisches Bemessungsverfahren für die Weiße Wanne optimiert“ aufgelegt.

In Hinblick auf die Rissebegrenzung sowie Rissevermeidung ist die Kenntnis der grundlegenden chemischen und mechanischen Eigenschaften des Zements und Betons, vor allem während der Hydratation, von essentieller Bedeutung. Sie sind maßgebend für die entstehenden Zwangsspannungen in einem Bauteil verantwortlich.

In Kapitel 2 / Grundlagen werden diese theoretischen Hintergründe ausführlich behandelt. Neben den chemischen Abläufen während der Hydratation ist hier vor allem die Entwicklung der Hydratationswärme, der Hydratationswärmereate und der damit verbundene Temperaturverlauf im Bauteil von größtem Interesse. Weiters werden die maßgebenden Einflussfaktoren auf die Temperaturentwicklung im erhärtenden Beton erörtert.

Da Zwangsspannungen nicht nur rein durch thermische Verformungseinwirkungen, sondern auch durch das Schwinden und Kriechen des Betons sowie durch seine viskoelastischen Eigenschaften beeinflusst werden, sind auch diese Bereiche am Ende des Kapitels betrachtet worden.

Das Rissverhalten von Betonbauteilen wird in Kapitel 3 behandelt. Neben grundlegenden Rissarten und ihre Auswirkungen auf die Wasserundurchlässigkeit von Betonbauteilen wird hier vor allem das bauteilspezifische Verhalten infolge Zwangsspannungen bei Bodenplatten erörtert. Im Allgemeinen setzen sich diese aus einer Kombination von Eigenspannungen, Zwangsnormalspannungen und Biegespannungen zusammen.

Je nach Orientierung des sich während der Hydratation einstellenden Temperaturgradienten hat dieser eine Verkrümmungsbestrebung der Platte zur Folge, die in beiden Fällen ein Abheben der Bodenplatte aus ihrer Lage heraus anstrebt. Durch das dadurch aktivierte Eigengewicht der Bodenplatte entstehen beim Erreichen der maximalen Temperatur an der Plattenunterseite oberseitige Biegespannungen sowie umgekehrt beim Erreichen der Ausgleichstemperatur Biegespannungen an der Plattenunterseite.

Die gleichmäßig im Querschnitt verteilten Verformungseinwirkungen führen hingegen zu einer Wechselwirkung mit dem angrenzenden Baugrund, der den zentrischen Zwang bzw. Zwangsnormalspannungen hervorruft. Wasserführende Makrorisse folgen bei Bodenplatten daher immer aus einer kombinierten Wirkung von Biegezwang und zentrischem Zwang.

Kapitel 4 / Bemessungsmodelle beinhaltet die Formelapparate der verschiedenen Normen sowie der angeführten öbv-Richtlinien und öbv-Merkblätter. Neben den Gebrauchstauglichkeitsnachweisen gemäß ÖNORM EN 1992-1-1:2015 und ÖNORM B 1992-1-1:2018, auf denen auch die Bemessungsdiagramme des Bemessungsmodells „Weiße Wanne klassisch“ der *öbv-RL* „Weiße Wannen“ im Allgemeinen basieren, werden hier auch die zur Norm abweichenden Eingangsparameter erörtert. Weiters werden in diesem Kapitel die Grundlagen, Anwendungsgrenzen und Anwendungsvoraussetzungen sowie gewählte Eingangsparameter des *öbv-MB* „Weiße Wanne optimiert“ erläutert. Der Formelapparat zur Begrenzung der Rissbreite unter Beachtung der Verformungskompatibilität nach SCHLICKE (2014) bildet das Ende dieses Kapitels.

Im darauffolgenden Kapitel 5 konnten die zuvor theoretisch behandelten Grundlagen an vergleichenden Berechnungen für Bodenplatten ausgewertet werden. Diese Auswertungen basieren allesamt auf den quadratischen, maximalen Längsabmessungen von Fundamentplatten für die jeweiligen Konstruktionsklassen Kon_s , Kon_1 und Kon_2 , den zulässigen maximalen Rissbreiten und Betondeckungen sowie den zur Anwendung gebrachten Betonstandard im Bauteildickenbereich der Bodenplatten von 0,20 m bis 5,0 m. Verglichen wurden hierzu die errechneten Bewehrungsmengen bzw. Bewehrungsgehalte gemäß ÖNORM EN 1992-1-1:2015 und ÖNORM B 1992-1-1:2018 sowie nach dem Bemessungsmodell „Weiße Wanne klassisch“ und dem Bemessungsmodell „Weiße Wanne optimiert“.

Die aus der Auswertung gewonnenen Ergebnisse wurden in Kapitel 6 aufbereitet sowie illustriert. Der erste Abschnitt des Kapitels vergleicht hierbei die Ergebnisse des *BM „WW klassisch“* mit den erforderlichen Bewehrungsmengen gemäß ÖNORM EN 1992-1-1:2015 sowie ÖNORM B 1992-1-1:2018. Abschließend wurden diese Erkenntnisse mit den Ergebnissen der Auswertung für das Bemessungsmodell „Weiße Wanne optimiert“ verglichen. Dabei wurden einerseits die im *öbv-MB „Weiße Wanne optimiert“* beispielhaft angeführten Betone sowie allgemein ein normgemäßer Beton der Festigkeitsklasse C 25/30 für die Betonrezepturen BS 1 A PLUS und BS 1 C PLUS betrachtet.

7.2 Fazit

Die „Weiße Wanne“ stellt zum heutigen Stand der Technik eine gute Variante des Feuchteschutzes erdberührter Bauteile dar. Vor allem dort, wo die Baugrubenverhältnisse beengt sind und eine nachträgliche Abdichtung im Sinne einer beispielhaft angeführten „Schwarzen Wanne“ nicht möglich ist. Es muss jedoch bedacht werden, dass die erfolgreiche Ausführung eines wasserundurchlässigen Betonbauwerks eine gewissenhafte und umfangreiche Planung sowie Ausführung und Nachbehandlung erfordern. Deshalb wird auf diesen Umstand in den ersten Abschnitten der öbv-Richtlinie hingewiesen und von einem Gesamtkonzept „Weiße Wanne“ gesprochen.

Der erste Vergleich der Bewehrungsmengen gemäß Bemessungsmodell „Weiße Wanne klassisch“ mit den Nachweisformaten der ÖNORM EN 1992-1-1:2015 sowie der ÖNORM B 1992-1-1:2018 zeigt, dass vor allem die empfohlene Bewehrung zur Begrenzung der Rissbreite, die auch für dickere Bodenplatten als 1,00 m in den Bemessungsdiagrammen als gültig angegeben wird, hinterfragt werden sollte. Durch Betrachtung der Vergleichsberechnungen scheint es hier als sinnvoll, diese auf das Niveau des sich ausbildenden Plateaus gemäß dem Nachweisformat nach MAURER *et al.* (2005) und MAURER (2007) in der ÖNORM B 1992-1-1:2018 für Bodenplatten über 1,00 m Bauteildicke anzuheben.

In Hinblick auf die erforderliche Bewehrungsmenge des neuen Bemessungsmodells „Weiße Wanne optimiert“ konnte in der vorliegenden Diplomarbeit gezeigt werden, dass mit dem neuen Betonstandard BS 1 PLUS die Konstruktion rissfreier Bauwerke bei gleichzeitiger Reduktion der erforderlichen Bewehrungsmengen möglich ist.

Vor allem bei den im öbv-Merkblatt angeführten Betonrezepturen kann der Gebrauchstauglichkeitsnachweis der Rissevermeidung bei Fundamentplatten im Dickenbereich von 0,20 m bis 5,00 m erfolgreich geführt werden. Die rissbreitenbegrenzende Bewehrung kann auf die deutlich kleinere Bewehrung zur Sicherstellung einer robusten Betonoberfläche reduziert werden. Für den allgemeinen Fall einer Betonrezeptur mit Materialkennwerten gemäß ÖNORM EN 1992-1-1:2015 gelingt der Nachweis der Rissevermeidung nur mehr eingeschränkt.

Betrachtet man jedoch für diesen allgemeinen Fall die Plattenoberseite und Plattenunterseite getrennt, ist festzuhalten, dass stets nur der Nachweis der Rissevermeidung an der Plattenoberseite nicht erbracht werden kann und somit auch nur hier eine aktive rissbreitenbegrenzende Bewehrung angeordnet werden muss. An der Plattenunterseite hingegen reicht auch hier in den meisten Fällen, ausgenommen dünne Platten unter 0,45 m Plattendicke, die Anordnung der mengenmäßig kleineren Bewehrung zur Sicherstellung einer robusten Betonoberfläche aus.

Bei Einhaltung einer Mindestdicke der Bodenplatte von 0,45 m und den getroffenen Einschränkungen betreffend des Elastizitätsmoduls des angrenzenden Erdreichs unter 100 N/mm² kann bei Anwendung des Betonstandards BS 1 PLUS auf der „sicheren Seite“ liegend angenommen werden, dass bei Anordnung der Bewehrung gemäß den Bemessungsdiagrammen des Bemessungsmodells „Weiße Wanne klassisch“ an der Plattenoberseite und die Anordnung einer Bewehrung zur Sicherstellung einer robusten Betonoberfläche für alle Konstruktionsklassen als ausreichend angesehen werden kann.

Die Entwicklung von einfachen Bemessungsdiagrammen für das Bemessungsmodell „Weiße Wanne optimiert“ analog jenen der „Weißen Wanne klassisch“ konnte jedoch in dieser Diplomarbeit nicht realisiert werden. Hierfür ist vor allem der Umstand ausschlaggebend, dass die Bewehrung zur Sicherstellung einer robusten Betonoberfläche von den versuchstechnisch ermittelten Materialkennwerten der zur Anwendung kommenden Betonrezeptur abhängig ist und somit von Anwendungsfall zu Anwendungsfall variiert.

Literaturverzeichnis

- [1] AUSTRIAN STANDARDS INSTITUT, 2005. *ÖNORM EN 1992-1-1:2005 11 01: Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken – Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau*. Wien: Austrian Standards plus GmbH, 01-11-2005
- [2] AUSTRIAN STANDARDS INSTITUT, 2007. *ÖNORM EN 15167-1:2007 01 01: Hüttensandmehl zur Verwendung im Beton, Mörtel und Einpressmörtel – Teil 1: Definition, Anforderungen und Konformitätskriterien*. Wien: Austrian Standards plus GmbH, 01-01-2007
- [3] AUSTRIAN STANDARDS INSTITUT, 2007. *ÖNORM B 1992-1-1:2007 02 01: Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken – Teil 1-1: Grundlagen und Anwendungsregeln für den Hochbau – Nationale Festlegungen zu ÖNORM EN 1992-1-1, nationale Erläuterungen und nationale Ergänzungen*. Wien: Austrian Standards plus GmbH, 01-02-2007
- [4] AUSTRIAN STANDARDS INSTITUT, 2007. *ÖNORM EN 12390-2:2017 10 01: Prüfung von Festbeton – Teil 2: Herstellung und Lagerung von Probekörpern für Festigkeitsprüfung*. Wien: Austrian Standards plus GmbH, 01-10-2017
- [5] AUSTRIAN STANDARDS INSTITUT, 2009. *ÖNORM EN 13263-1:2009 06 15: Silikastaub für Beton – Teil 1: Definition, Anforderungen und Konformitätskriterien*. Wien: Austrian Standards plus GmbH, 15-06-2009
- [6] AUSTRIAN STANDARDS INSTITUT, 2010. *ÖNORM EN 196-9:2010 05 01: Prüfverfahren für Zement – Teil 9: Hydratationswärme – Teiladiabatisches Verfahren*. Wien: Austrian Standards plus GmbH, 01-05-2010
- [7] AUSTRIAN STANDARDS INSTITUT, 2010. *ÖNORM EN 196-8:2010 06 01: Prüfverfahren für Zement – Teil 8: Hydratationswärme – Lösungsverfahren*. Wien: Austrian Standards plus GmbH, 01-06-2010
- [8] AUSTRIAN STANDARDS INSTITUT, 2010. *ONR 23303:2010 09 01: Prüfverfahren Beton (PVB) – Nationale Anwendung der Prüfnormen für Beton und seiner Ausgangsstoffe*. Wien: Austrian Standards plus GmbH, 01-09-2010
- [9] AUSTRIAN STANDARDS INSTITUT, 2010. *ÖNORM B 3309-1:2010 12 01: Aufbereitete, hydraulisch wirksame Zusatzstoffe für die Betonherstellung (AHWZ) – Teil 1: Kombinationsprodukte (GC/GC-HS)*. Wien: Austrian Standards plus GmbH, 01-12-2010
- [10] AUSTRIAN STANDARDS INSTITUT, 2010. *ÖNORM B 3309-2:2010 12 01: Aufbereitete, hydraulisch wirksame Zusatzstoffe für die Betonherstellung (AHWZ) – Teil 2: Hüttensandmehl zur Verwendung in Beton, Mörtel und Einpressmörtel (GS bzw. GS-HS): Nationale Anwendung der ÖNORM EN 15167-1*. Wien: Austrian Standards plus GmbH, 01-12-2010
- [11] AUSTRIAN STANDARDS INSTITUT, 2010. *ÖNORM B 3309-3:2010 12 01: Aufbereitete, hydraulisch wirksame Zusatzstoffe für die Betonherstellung (AHWZ) – Teil 3: Flugasche für Beton (GF bzw. GF-HS): Nationale Anwendung der ÖNORM EN 450-1*. Wien: Austrian Standards plus GmbH, 01-12-2010
- [12] AUSTRIAN STANDARDS INSTITUT, 2011. *ÖNORM EN 197-1:2011 10 15: Zement – Teil 1: Zusammensetzung, Anforderung und Konformitätskriterien von Normalzement*. Wien: Austrian Standards plus GmbH, 15-10-2011
- [13] AUSTRIAN STANDARDS INSTITUT, 2012. *ÖNORM EN 450-1:2012 09 15: Flugasche für Beton – Teil 1: Definition, Anforderungen und Konformitätskriterien*. Wien: Austrian Standards plus GmbH, 15-09-2012

- [14] AUSTRIAN STANDARDS INSTITUT, 2014. *ÖNORM B 3692:2014 11 15: Planung und Ausführung von Bauwerksabdichtungen*. Wien: Austrian Standards plus GmbH, 15-11-2014
- [15] AUSTRIAN STANDARDS INSTITUT, 2015. *ÖNORM EN 1992-1-1:2015 02 15: Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken – Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau (konsolidierte Fassung)*. Wien: Austrian Standards plus GmbH, 15-02-2015
- [16] AUSTRIAN STANDARDS INSTITUT, 2016. *ÖNORM EN 196-1:2016 10 15: Prüfverfahren für Zement – Teil 1: Bestimmung der Festigkeit*. Wien: Austrian Standards plus GmbH, 15-10-2016
- [17] AUSTRIAN STANDARDS INSTITUT, 2017. *ÖNORM EN 206:2017 05 01: Beton – Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität*. Wien: Austrian Standards plus GmbH, 01-05-2017
- [18] AUSTRIAN STANDARDS INSTITUT, 2018. *ÖNORM B 1992-1-1:2018 01 01: 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*. Wien: Austrian Standards plus GmbH, 01-01-2018
- [19] AUSTRIAN STANDARDS INSTITUT, 2018. *ÖNORM B 4710-1:2018 01 01: Beton – Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität – Teil 1: Regeln zur Umsetzung der ÖNORM EN 206 für Normal- und Schwerbeton*. Wien: Austrian Standards plus GmbH, 01-01-2018
- [20] BAAR, Stefan und Karsten EBELING, 2017. *Lohmeyer Stahlbetonbau: Bemessung – Konstruktion – Ausführung*. 10. Auflage. Wiesbaden: Springer Vieweg. ISBN 978-3-658-13523-2
- [21] BÖDEFELD, Jörg, 2010. *Rissmechanik in dicken Stahlbetonbauteilen bei abfließender Hydratationswärme*. Karlsruhe: Bundesanstalt für Wasserbau. Mitteilungsblatt der Bundesanstalt für Wasserbau, Nr. 92. ISSN 0572-5801
- [22] BUNDESANSTALT FÜR WASSERBAU, Hrsg., 2011. *BAWMerkblatt Rissbreitenbegrenzung für frühen Zwang in massiven Wasserbauwerken (MFZ)* [online]. Karlsruhe: Bundesanstalt für Wasserbau. [Zugriff am: 11.05.2021]. BAW-Merkblätter. ISSN 2192-5380. Verfügbar unter: <https://hdl.handle.net/20.500.11970/102475>
- [23] FORSCHUNGSGESELLSCHAFT STRASSE-SCHIENE-VERKEHR, 2013. *RVS 09.01.41: Tunnel/Tunnelbau/Konstruktive Ausführung/Offene Bauweise (Ausgabe April 2013)*. Wien: Forschungsgesellschaft Straße-Schiene-Verkehr, 00-04-2013
- [24] GORIS, Alfons und Michél BENDER, 2017. *Band 1: Grundlagen, Schnittgrößen, Grenzzustände der Tragfähigkeit, Grenzzustände der Gebrauchstauglichkeit, Beispiele*. 6., überarbeitete und erweiterte Auflage. Berlin: Beuth Verlag GmbH. Stahlbetonbau-Praxis nach Eurocode 2. Band 1. ISBN 978-3-410-27117-8
- [25] HINTZEN, Wilhelm, 1998. *Zum Verhalten des jungen Betons unter zentrischem Zwang beim Abfließen der Hydratationswärme*. Düsseldorf: Verlag Bau+Technik GmbH. Schriftenreihe der Zementindustrie. Heft 59/1998. ISBN 978-3-7640-0382-0
- [26] KLOPFER, Heinz und Hans-Peter SOMMER, 2010. *Werkstoffe zur Bauwerksabdichtung*. In: Michael Bonk, Hrsg. *Lufsky Bauwerksabdichtung*. 7., vollständig aktualisierte und erweiterte Auflage. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag, S. 85-136. ISBN 978-3-8351-0226-2
- [27] KÖNIG, Gert und Nguyen Viet TUE, 1996. *Grundlagen und Bemessungshilfen für die Rissbreitenbeschränkung im Stahlbeton und Spannbeton sowie Kommentare, Hintergrundinformationen und Anwendungsbeispiele zu den Regelungen nach DIN 1045, EC2 und Model Code 90*. Berlin: Beuth Verlag GmbH. Deutscher Ausschuss für Stahlbeton. Heft 466. ISBN 978-3-410-65666-9

- [28] KÖNIG, Gert, Nguyen Viet TUE und Gunter SCHENCK, 2008. *Grundlage des Stahlbetonbaus: Einführung in die Bemessung nach DIN 1045-1*. 3., aktualisierte Auflage. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag. ISBN 978-3-519-20216-5
- [29] LÖBER, Philipp und Klaus HOLSCHMACHER, 2019. Einfluss der Reibung zwischen Bodenplatte und Untergrund auf die Mindestbewehrung von WU-Bodenplatten. In: Klaus Holschmacher, Hrsg. *Neue Entwicklungen im Betonbau: Hintergründe, Auslegungen, Neue Tendenzen Beiträge aus Praxis und Wissenschaft*. HTWK-Tagungsband der 13. Tagung „Betonbauteile“. Berlin: Beuth Verlag GmbH, S. 193-210. ISBN 978-3-410-29067-4
- [30] LOCHER, Friedrich W., 2015. *Zement* [online]. *Grundlagen der Herstellung und Verwendung*. Düsseldorf: Verlag Bau+Technik GmbH [Zugriff am: 2021-05-11]. PDF e-Book. ISBN 978-3-7640-0700-3. Verfügbar unter: <https://ebookcentral.proquest.com/lib/viennaut/detail.action?docID=2029875>
- [31] LOHMEYER, Gottfried und Karsten EBELING, 2018. *Weißer Wannen einfach und sicher: Planung und Konstruktion wasserundurchlässiger Bauwerke aus Beton*. 11., überarbeitete Auflage. Düsseldorf: Verlag Bau+Technik GmbH. ISBN 978-3-7640-0623-5
- [32] MAURER, Reinhard und andere, 2005. *Mindestbewehrung zur Begrenzung der Rissbreiten bei dicken Wänden*. In: *Bauingenieur*. **80**(10), S. 479-485.
- [33] MAURER, Reinhard, 2007. Neuausgabe *DIN 1045-1: Mindestbewehrung zur Begrenzung der Rissbreite bei dicken Bauteilen infolge Zwang*. In: Deutscher Beton- und Bautechnikverein e. V., Hrsg. *DBV-Heft 14: Weiterbildung Tragwerksplaner Massivbau – Brennpunkt aktuelle Normung*. Berlin: Deutscher Beton- und Bautechnikverein e. V., S. 86-100.
- [34] MOSER, Alfred, 2019a. *Interview durch Stefan Hagmann*. Wien, 13.08.2019
- [35] MOSER, Alfred, 2019b. *Interview durch Stefan Hagmann*. Wien, 27.08.2019
- [36] ÖSTERREICHISCHE BAUTECHNIK VEREINIGUNG, 2013. *öbv-Richtlinie „Dichte Schlitzwände“ (Ausgabe November 2013)*. Wien: Österreichische Bautechnik Vereinigung, 00-11-2013
- [37] ÖSTERREICHISCHE BAUTECHNIK VEREINIGUNG, 2016. *öbv-Richtlinie „Qualitätssicherung für Beton von Ingenieurbauwerken“ (Ausgabe November 2016)*. Wien: Österreichische Bautechnik Vereinigung, 00-11-2016
- [38] ÖSTERREICHISCHE BAUTECHNIK VEREINIGUNG, 2018. *öbv-Merkblatt „analytisches Bemessungsverfahren für die Weiße Wanne optimiert“ (Ausgabe Februar 2018)*. Wien: Österreichische Bautechnik Vereinigung, 00-02-2018
- [39] ÖSTERREICHISCHE BAUTECHNIK VEREINIGUNG, 2018. *öbv-Richtlinie „Wasserundurchlässige Betonbauwerke – Weiße Wannen“ (Ausgabe Februar 2018)*. Wien: Österreichische Bautechnik Vereinigung, 00-02-2018
- [40] ÖSTERREICHISCHE BAUTECHNIK VEREINIGUNG, 2019. *öbv-Richtlinie „Bentonitgeschützte Betonbauwerke – Braune Wannen“ (Ausgabe Juli 2019)*. Wien: Österreichische Bautechnik Vereinigung, 00-07-2019
- [41] ÖSTERREICHISCHE BAUTECHNIK VEREINIGUNG, 2021. *Die ÖBV* [online]. *Über uns*. Wien: Österreichische Bautechnik Vereinigung [Zugriff am: 11.05.2021]. Verfügbar unter: <https://www.bautechnik.pro/Vereinigung/obv>
- [42] PECH, Anton und Andreas KOLBITSCH, 2006. *Keller*. Wien: Springer-Verlag. Baukonstruktionen. Band 6. ISBN 978-3-211-23745-8
- [43] RÖHLING, Stefan, 2009. *Zwangsspannungen infolge Hydratationswärme*. 2., durchgesehene und erweiterte Auflage. Düsseldorf: Verlag Bau+Technik. ISBN 978-3-7640-0500-9
- [44] RÖHLING, Stefan, 2012. *Hydratation – junger Beton – Festbeton*. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag. Betonbau. Band 2. ISBN 978-3-8167-8762-4

- [45] RÖHLING, Stefan und Heinz MEICHSNER, 2018. Rissbildungen im Stahlbetonbau [online]. Ursache – Auswirkung – Maßnahmen. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag [Zugriff am: 06.06.2019]. PDF e-Book. ISBN 978-3-8167-9646-6.
- [46] SCHLICKE, Dirk, 2014. Mindestbewehrung für zwangsbeanspruchten Beton [Dissertation]. Festlegung unter Berücksichtigung der erhärtungsbedingten Spannungsgeschichte und der Bauteilgeometrie. Technische Universität Graz. 2., überarbeitete Auflage. Graz: Verlag der Technischen Universität Graz. ISBN 978-3-85125-363-4
- [47] SCHICKE, Dirk und Nguyen Viet TUE, 2016. *Mindestbewehrung zur Begrenzung der Rissbreite unter Berücksichtigung des tatsächlichen Bauteilverhaltens: Teil 1 – Verformungsbasiertes Bemessungsmodell und Anwendung für Bodenplatten*. In: Beton- und Stahlbetonbau [online]. **111**(3), S. 120-131. [Zugriff am: 05.07.2018]. Wiley Online Library. ISSN 1437-1006. Verfügbar unter: DOI: 10.1002/best.201500019
- [48] SCHLICKE, Dirk, 2019. *Re: Richtlinie „Weiße Wanne 2018“, Diplomarbeit – kurze Frage* [E-Mail]. 09.09.2019, 15:00
- [49] SPRINGENSCHMID, Rupert, 2018. *Betontechnologie für die Praxis*. 2., aktualisierte und erweiterte Auflage. Berlin, Wien und Zürich: Beuth Verlag GmbH. ISBN 978-3-410-24466-0
- [50] STUMMVOLL, Markus und Anton TRENKWALDER, 2000. *Kühlung von Beton: Grundlagen und Möglichkeiten*. In: Beton- und Stahlbeton [online]. **95**(6), S. 346-351 [Zugriff am: 17.10.2019]. Wiley Online Library. ISSN 1437-1006. Verfügbar unter: DOI: 10.1002/best.200000640
- [51] TACKE, Rainer, 2002. *Feuchte- und Festigkeitsentwicklung hydratisierenden Betons* [Dissertation]. *Modellierung und numerische Analyse*. Technische Universität Braunschweig. Braunschweig: Verlag der Technischen Universität Braunschweig. ISBN 978-3-926031-97-2
- [52] VEREIN DEUTSCHER ZEMENTWERKE e. V., Hrsg., 2002. *Zement-Taschenbuch 2002*. 50. Auflage. Düsseldorf: Verlag Bau+Technik. ISBN 978-3-7640-427-4
- [53] VEREIN DEUTSCHER ZEMENTWERKE e. V., Hrsg., 2013. *Zement-Merkblatt Betontechnik/B4* [online]. Düsseldorf: Verein Deutscher Zementwerke e. V. [Zugriff am: 11.05.2021]. Zement-Merkblätter. Verfügbar unter: <https://www.vdz-online.de/fileadmin/wissensportal/publikationen/basiswissen/zement-merkblaetter/B4.pdf>
- [54] WESCHE, Karlhans, 1993. *Beton, Mauerwerk (Nichtmetallisch-anorganische Stoffe): Herstellung, Eigenschaften, Verwendung, Dauerhaftigkeit*. 3., völlig neubearbeitete und erweiterte Auflage. Wiesbaden: Bauverlag GmbH. Baustoffe für tragende Bauteile. Band 2. ISBN 978-3-7625-2681-8

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1.1 – Anforderungsklassen für die Wasserundurchlässigkeit von Außenwänden, Bodenplatten und Decken [Vgl. <i>öbv-RL „Weiße Wannen“</i> (2018); S. 6 – Tabelle 3.1].....	8
Tabelle 1.2 – Mindestbauteilabmessung in Abhängigkeit von Wasserdruck und Konstruktionsklasse [Vgl. <i>öbv-RL „Weiße Wannen“</i> (2018); S. 8 – Tabelle 3-2].....	9
Tabelle 1.3 – maximal zulässige Frischbetontemperatur in Abhängigkeit von Bemessungsmodell und Konstruktionsklasse [Vgl. <i>öbv-RL „Weiße Wannen“</i> (2018); S. 8 – Tabelle 3-2]	10
Tabelle 1.4 – Rissbreite w_k in Abhängigkeit der Konstruktionsklasse bei Last- und/oder Zwangsbeanspruchung [Vgl. <i>öbv-RL „Weiße Wannen“</i> (2018); S. 13].....	14
Tabelle 1.5 – Übersicht über die Verfahren zum Nachweis der Gebrauchstauglichkeit bei überwiegender Zwangsbeanspruchung [Vgl. <i>öbv-RL „Weiße Wannen“</i> (2018); S. 13 – Tabelle 4-1].....	15
Tabelle 2.1 – Klasseneinteilung der Normalzemente [Vgl. ÖNORM EN 197-1 (2011); S. 18 – Tabelle 3].....	19
Tabelle 2.2 – Hydratationswärme nach der vollständigen Umsetzung der Klinkermineralien und der Zusatzstoffe [Vgl. RÖHLING (2012); S. 131 – Tabelle 1.7].....	29
Tabelle 2.3 – Vergleich der Prüfverfahren zur Bestimmung der Hydratationswärme, unter Verwendung von Angaben in HINTZEN (1998) [Vgl. RÖHLING (2009); S. 56 – Tafel 3.6]	32
Tabelle 2.4 – Wärmeleitfähigkeit λ [kJ/(m h K)] verschiedener Gesteinskörnungen und daraus hergestellter Betone nach Angaben von CLAUSER (1995) und Berechnungen von BAMFORTH (2007) [Vgl. RÖHLING (2009); S. 434].....	40
Tabelle 2.5 – Wärmeleitfähigkeit λ für verschiedene Schalhautmaterialien [Vgl. RÖHLING (2012); S. 350 – Tabelle 3.2].....	44
Tabelle 2.6 – Wärmeleitfähigkeit λ für verschiedene Dämmstoffe [Vgl. RÖHLING (2012); S. 350 – Tabelle 3.2].....	44
Tabelle 2.7 – Vorhaltemaße bei der Betonherstellung [Vgl. STUMMVOLL und TRENKWALDER (2000); S. 349].....	49
Tabelle 2.8 – Richtwerte für die Druckfestigkeitsentwicklung von Beton aus verschiedenen Zementen bei einer ständigen Lagerung bei 20 °C nach WISCHERS <i>et al.</i> (1984) [Vgl. RÖHLING (2012); S. 255 – Tabelle 2.8].....	53
Tabelle 3.1 – Schalenrisse, ihre Entstehungsursache und deren Vermeidung [Vgl. LOHMEYER und EBELING (2018); S. 133 – Tafel 4.8]	67
Tabelle 3.2 – Biegerisse, ihre Entstehungsursache und deren Vermeidung [Vgl. LOHMEYER und EBELING (2018); S. 136 – Tafel 4.8].....	68
Tabelle 3.3 – Trennrisse, ihre Entstehungsursache und deren Vermeidung [Vgl. LOHMEYER und EBELING (2018); S. 133 – Tafel 4.8].....	69
Tabelle 4.1 – Festigkeitsentwicklung des Betons [Vgl. ÖNORM B 1992-1-1:2018 (2018); S. 12 – Tabelle 2].....	83
Tabelle 4.2 – Anhaltswerte für relevante Materialeigenschaften des Betonstandards BS 1 PLUS nach FFG (2011) und VÖZ (2012) [Vgl. <i>öbv-MB „Weiße Wanne optimiert“</i> (2018); S. 7 – Tabelle 3-1]	90
Tabelle 5.1 – Eingangswerte für den Rissbreitennachweis nach <i>öbv-RL „Weiße Wannen“</i> und ÖNORM EN 1992-1-1:2015 sowie ÖNORM B 1992-1-1:2018	98
Tabelle 5.2 – Anwendungsbereich und empfohlene Bindemittelmenge für den Betonstandard BS 1 PLUS [Vgl. <i>öbv-RL „Weiße Wannen“</i> (2018); S. 40 – Tabelle 5-2 und S. 42 – Tabelle 5-3].	109
Tabelle 5.3 – Erforderliche Bewehrung der <i>BM „WW klassisch“</i> ($a_{s,WWk}$ & $a_{s,WWk,emp}$ / ÖNORM ($a_{s,ÖN}$) / <i>BM „WW optimiert“</i> ($a_{s,WWo,F,i,j}$) für die Bauteildicke $h = 1,40$ m / Konstruktionsklasse Kon_1 ($c_{nom} = 4,0$ cm; BS 1 A PLUS)	121

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1.1 – Wasser im Boden – Beanspruchungen, Maßnahmen; Darstellung nach [PECH und KOLBITSCH (2006); S. 55 – Abbildung 060.3-02].....	2
Abbildung 1.2 – Zusammenhang zwischen Anforderungsklasse, Wassersäule WS [m] (Bemessungswasserstand) und Konstruktionsklasse; Darstellung nach [öbv-RL „Weiße Wannen“ (2018); S. 7 – Abbildung 3-1].....	9
Abbildung 1.3 – Zwangsspannungen (Äußerer Zwang – Setzungen); Darstellung nach [SPRINGENSCHMID (2018); S. 115 – Abb. 3.5-1].....	12
Abbildung 1.4 – Zwangsspannungen (Temperaturänderung oder Schwinden); Darstellung nach [SPRINGENSCHMID (2018); S. 115 – Abb. 3.5-1].....	12
Abbildung 2.1 – Schematische Darstellung der Bildung der Hydratationsphasen; Darstellung nach [LOCHER <i>et al.</i> (1976) & RICHARTZ (1969) zit. nach LOCHER (2015); S. 237 – Bild 7.37].....	21
Abbildung 2.2 – Zeitliche Hydratationswärmeabfuhr eines CEM I 42,5 R unter isothermen und adiabatischen Bedingungen (rechts) und möglicher Temperaturverlauf in einem Beton (links); Darstellung nach [HINTZEN (1998); S. 29 – Bild 3.1].....	22
Abbildung 2.3 – maximaler Hydratationsgrad in Abhängigkeit vom Wasserzementwert nach verschiedenen experimentellen Daten; Darstellung nach [RÖHLING (2009); S. 25 – Bild 2.10 zit. nach RÖHLING (2012); S. 58 – Bild 1.34].....	26
Abbildung 2.4 – Wärmeentwicklung der Hydratphasen und Hochofenschlacke (HOS); Darstellung nach [LEA (1970) zit. nach TACKE (2002); S. 8 – Bild 2.2].....	28
Abbildung 2.5 – Ermittlung der Hydratationswärme aus der chemisch-mineralogischen Zusammensetzung, Zemente der Versuche aus HINTZEN (1998); Darstellung nach [RÖHLING (2009); S. 54 – Bild 3.16].....	30
Abbildung 2.6 – Wärmeentwicklung in Abhängigkeit vom Wasserzementwert nach VERBECK und HASS; Darstellung nach [RAKEL (1965) zit. nach RÖHLING (2009); S. 44 – Bild 3.8]....	30
Abbildung 2.7 – Wärmerate in Abhängigkeit von der freigesetzten Wärmemenge für verschiedene Zementfestigkeitsklassen. (Isotherme Wärmeflussmessung, DCA, bei 25 °C) Die Messwerte wurden durch eine mathematische Funktion approximiert; Darstellung nach [RÖHLING (2012); S. 38 – Bild 1.15].....	33
Abbildung 2.8 – Hydratationsstufen und Reaktionskinetik, dargestellt an der Klinkerphase C ₃ S (schematisch, nach MINDESS und YOUNG); Darstellung nach [RÖHLING (2012); S. 37 – Bild 1.14].....	34
Abbildung 2.9 – Verlauf der mittleren Bauteiltemperatur in Abhängigkeit der Betonzusammensetzung; Darstellung nach [RÖHLING (2009); S. 102 – Bild 4.23a].....	35
Abbildung 2.10 – Verlauf der mittleren Bauteiltemperatur in Abhängigkeit der Bauteildicke; Darstellung nach [RÖHLING (2009); S. 103 – Bild 4.23e].....	37
Abbildung 2.11 – Verlauf der mittleren Bauteiltemperatur in Abhängigkeit des Zementgehaltes; Darstellung nach [RÖHLING (2009); S. 102 – Bild 4.23b].....	37
Abbildung 2.12 – Auswirkung einer unterschiedlichen Wärmekapazität des Betons auf den Temperaturverlauf; Darstellung nach [RÖHLING (2009); S. 72 – Bild 4.3].....	39
Abbildung 2.13 – Zusammenhang Wärmeübergangswiderstand – Windgeschwindigkeit; Darstellung nach [öbv-RL „Weiße Wannen“ (2018); S. 79 – Abbildung A.1-1].....	42
Abbildung 2.14 – Wärmedurchgangskoeffizienten in Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit; Darstellung nach [RÖHLING (2012); S. 351 – Bild 3.3].....	45
Abbildung 2.15 – Verlauf der mittleren Bauteiltemperatur in Abhängigkeit der Frischbetontemperatur; Darstellung nach [RÖHLING (2009); S. 103 – Bild 4.23f].....	47
Abbildung 2.16 – Wärmeentwicklungsrate eines CEM I 32,5 R bei verschiedenen isothermen Erhärtungstemperaturen (DCA-Analyse); Darstellung nach [RÖHLING (2012); S. 49 – Bild 1.26].....	47
Abbildung 2.17 – Verlauf der mittleren Bauteiltemperatur in Abhängigkeit der Lufttemperatur; Darstellung nach [RÖHLING (2009); S. 103 – Bild 4.23g].....	49

Abbildung 2.18 – Mittelwerte der Tagesschwankungen der Lufttemperatur; Darstellung nach [PIEHL <i>et al.</i> (1980) zit. nach RÖHLING (2009); S. 77 – Bild 4.6].....	50
Abbildung 2.19 – Gemessener Verlauf der Luft- und Bauteiltemperatur in einem massigen Betonbauteil von 2,0 m Dicke; Darstellung nach [RÖHLING (2009); S. 79 – Bild 4.7].....	51
Abbildung 2.20 – Zeitliche Entwicklung von Druck- und Zugfestigkeit sowie Elastizitätsmodul bei Normalbeton nach WEIGLER und KARL (1974); Darstellung nach [RÖHLING (2009); S. 132 – Bild 5.1].....	52
Abbildung 2.21 – Zusammenhang zwischen Druckfestigkeit und zentrischer Zugfestigkeit nach BYFORS; Darstellung nach [BYFORS (1980) zit. nach RÖHLING (2009); S. 138 – Bild 5.5]..	56
Abbildung 2.22 – Entwicklung der Betonzugbruchdehnung in Abhängigkeit von der Erhärungszeit; Darstellung nach [RÖHLING und MEICHSNER (2018); S. 109 – Bild 5.25].	60
Abbildung 2.23 – Beziehung zwischen der Zugbruchdehnung und dem Verhältnis Zugfestigkeit/Elastizitätsmodul nach TASDEMIR <i>et al.</i> (1996); Darstellung nach [RÖHLING und MEICHSNER (2018); S. 111 – Bild 5.29].....	61
Abbildung 2.24 – Schematische Darstellung einer möglichen Unterschätzung der Zug-Zwangsspannungen im Erhärungszeitraum infolge Vernachlässigung des autogenen Schwindens; Darstellung nach [SCHLICKE (2014); S. 23 – Abb. 2.6].....	63
Abbildung 2.25 – Schematische Darstellung des Einflusses des Behinderungsgrads auf die Systemantwort infolge viskoelastischer Eigenschaften des Betons; Darstellung nach [SCHLICKE (2014); S. 24 – Abb. 2.7].....	64
Abbildung 2.26 – Schematische Darstellung einer möglichen Unterschätzung der Zugbeanspruchung im Erhärungszeitraum bei Vernachlässigung der Viskoelastizität; Darstellung nach [SCHLICKE (2014); S. 25 – Abb. 2.8].....	64
Abbildung 3.1 – Temperaturverlauf und Zwangsspannungen im jungen Beton bei behinderter Temperaturverformung (schematisch); Darstellung nach [SPRUNG (1992) & WEIGLER und KARL (1974) zit. nach VEREIN DEUTSCHER ZEMENTINDUSTRIE e. V., Hrsg. (2002); S. 361 – Bild II.6.4-1].....	71
Abbildung 3.2 – Aufteilung der Spannungskomponenten; Darstellung nach [BUNDESANSTALT FÜR WASSERBAU, Hrsg. (2011); S. 4 – Bild 4].....	72
Abbildung 3.3 – Einfluss der Eigenspannungen auf die Gefahr von bemessungsrelevanter Rissbildung bei Erreichen der Ausgleichstemperatur; Darstellung nach [SCHLICKE und TUE (2016); S. 121 – Bild 1].....	73
Abbildung 3.4 – Behinderungssituation von Bodenplatten – Biegezwang infolge Eigengewichtsaktivierung; Darstellung nach [öbv-MB „Weiße Wanne optimiert“ (2018); S. 9 – Abbildung 4-2].....	74
Abbildung 3.5 – Modelle zur äußeren Behinderung von Bodenplatten; Darstellung nach [KÖNIG <i>et al.</i> (2008); S. 282 f. – Abb. 8.20 & Abb. 8.21].....	75
Abbildung 3.6 – System zur Erfassung des Verformungsverlaufs im Randbereich; Darstellung nach [SCHLICKE und TUE (2016); S. 128 – Bild 15].....	77
Abbildung 4.1 – Mindestbewehrung für überwiegende Zwangsbeanspruchung (Frührissbildung), Rissbreite $w_k = 0,15$ mm, für Betondeckungen $c = 4,0$ cm (links) und $c = 3,0$ cm (rechts) Darstellung nach [öbv-RL „Weiße Wannen“ (2018); S. 14 f. – Abbildung 4-5 und Abbildung 4-6].....	85
Abbildung 4.2 – Mindestbewehrung für überwiegende Zwangsbeanspruchung (Frührissbildung), Rissbreite $w_k = 0,20$ mm, für Betondeckungen $c = 4,0$ cm (links) und $c = 3,0$ cm (rechts) Darstellung nach [öbv-RL „Weiße Wannen“ (2018); S. 15 f. – Abbildung 4-7 und Abbildung 4-8].....	85
Abbildung 4.3 – Mindestbewehrung für überwiegende Zwangsbeanspruchung (Frührissbildung), Rissbreite $w_k = 0,25$ mm, für Betondeckungen $c = 4,0$ cm (links) und $c = 3,0$ cm (rechts) Darstellung nach [öbv-RL „Weiße Wannen“ (2018); S. 16 f. – Abbildung 4-9 und Abbildung 4-10].....	85
Abbildung 4.4 – Anwendungsvoraussetzung hinsichtlich Wärmeentwicklung des Betons; Darstellung nach [öbv-MB „Weiße Wanne optimiert“ (2018); S. 3 – Abbildung 2-1].....	87
Abbildung 4.5 – Anwendungsvoraussetzung hinsichtlich Entwicklung von Elastizitätsmodul und Zugfestigkeit; Darstellung nach [öbv-MB „Weiße Wanne optimiert“ (2018); S. 4 – Abbildung 2-2].....	88

Abbildung 4.6 – Behinderungssituation von Bodenplatten – horizontale Behinderung durch den Baugrund; Darstellung nach [öbv-MB „Weiße Wanne optimiert“ (2018); S. 9 – Abbildung 4-3]	93
Abbildung 4.7 – Rissysteme je nach Zwangsbeanspruchung, bestehend aus geometrisch vorgegebenem Primärriss und Sekundärrissen infolge der Bewehrung; Darstellung nach [SCHLICKE und TUE (2016); S. 122 – Bild 3]	95
Abbildung 5.1 – Mindestbewehrungsvergleich zur Begrenzung der Rissbreite gemäß öbv-RL „Weiße Wannen“ / ÖNORM EN 1992-1-1:2015 und ÖNORM B 1992-1-1:2018 für die Konstruktionsklasse Kon ₁ (c _{nom} = 4,0 cm / d _s = 14 mm)	99
Abbildung 5.2 – Mindestbewehrungsvergleich zur Begrenzung der Rissbreite gemäß öbv-RL „Weiße Wannen“ / ÖNORM EN 1992-1-1:2015 und ÖNORM B 1992-1-1:2018 für die Konstruktionsklasse Kon ₁ (c _{nom} = 4,0 cm; Betonstandard BS 1)	100
Abbildung 5.3 – Mindestbewehrungsvergleich zur Begrenzung der Rissbreite gemäß öbv-RL „Weiße Wannen“ / ÖNORM EN 1992-1-1:2015 und ÖNORM B 1992-1-1:2018 für die Konstruktionsklasse Kon ₁ (c _{nom} = 4,0 cm; Betonstandard BS 1 PLUS)	101
Abbildung 5.4 – Abweichung der Mindestbewehrung gemäß Norm zu den Werten in der öbv-RL „Weiße Wannen“ für die Konstruktionsklasse Kon ₁ / c _{nom} = 4,0 cm / Betonstandard BS 1	101
Abbildung 5.5 – Abweichung der Mindestbewehrung gemäß Norm zu den Werten in der öbv-RL „Weiße Wannen“ für die Konstruktionsklasse Kon ₁ / c _{nom} = 4,0 cm / Betonstandard BS 1 PLUS	102
Abbildung 5.6 – Vergleich der Spannungen infolge Zwangsschnittgrößen mit der zugehörigen mittleren Zugfestigkeit für die quadratischen Maximalabmessungen der Konstruktionsklassen Kon _S , Kon ₁ und Kon ₂ für die Betonrezeptur BS 1 A PLUS / Typ 1 gemäß Tabelle 4.2	105
Abbildung 5.7 – Vergleich der Zwangsspannung $\sigma_{F,u,y}$ mit der mittleren zugehörigen Zugfestigkeit für einen Beton BS 1 A PLUS / Typ 1 gemäß Tabelle 4.2 für unterschiedliche Seitenverhältnisse	106
Abbildung 5.8 – Rissindex für die quadratischen Maximalabmessungen der Konstruktionsklassen Kon _S , Kon ₁ und Kon ₂ für die Betonrezeptur BS 1 A PLUS / Typ 1 gemäß Tabelle 4.2	107
Abbildung 5.9 – Vergleich der Spannungen infolge Zwangsschnittgrößen mit der zugehörigen mittleren Zugfestigkeit für die quadratischen Maximalabmessungen der Konstruktionsklassen Kon _S , Kon ₁ und Kon ₂ für Betone BS 1 A PLUS mit Materialkennwerten gemäß ÖNORM EN 1992-1-1:2015	109
Abbildung 5.10 – Vergleich der Spannungen infolge Zwangsschnittgrößen mit der zugehörigen mittleren Zugfestigkeit für die quadratischen Maximalabmessungen der Konstruktionsklassen Kon _S , Kon ₁ und Kon ₂ für Betone BS 1 C PLUS mit Materialkennwerten gemäß ÖNORM EN 1992-1-1:2015	110
Abbildung 5.11 – Rissindex für die quadratischen Maximalabmessungen der Konstruktionsklassen Kon _S , Kon ₁ und Kon ₂ für die Betonrezeptur BS 1 A PLUS mit Materialkennwerten gemäß ÖNORM EN 1992-1-1:2015	110
Abbildung 5.12 – Rissindex für die quadratischen Maximalabmessungen der Konstruktionsklassen Kon _S , Kon ₁ und Kon ₂ für die Betonrezeptur BS 1 C PLUS mit Materialkennwerten gemäß ÖNORM EN 1992-1-1:2015	111
Abbildung 5.13 – Primärrissbreite (links) und erforderliche Sekundärrissanzahl (rechts) bei quadratischer Maximalabmessung der Konstruktionsklasse Kon _S / Beton gemäß ÖNORM EN 1992-1-1:2015 / BS 1 A PLUS	113
Abbildung 5.14 – Primärrissbreite (links) und erforderliche Sekundärrissanzahl (rechts) bei quadratischer Maximalabmessung der Konstruktionsklasse Kon ₁ / Beton gemäß ÖNORM EN 1992-1-1:2015 / BS 1 A PLUS	113
Abbildung 5.15 – Primärrissbreite (links) und erforderliche Sekundärrissanzahl (rechts) bei quadratischer Maximalabmessung der Konstruktionsklasse Kon ₂ / Beton gemäß ÖNORM EN 1992-1-1:2015 / BS 1 A PLUS	113
Abbildung 5.16 – Primärrissbreite (links) und erforderliche Sekundärrissanzahl (rechts) bei quadratischer Maximalabmessung der Konstruktionsklasse Kon _S / Beton gemäß ÖNORM EN 1992-1-1:2015 / BS 1 C PLUS	114

Abbildung 5.17 – Primärrissbreite (links) und erforderliche Sekundärrissanzahl (rechts) bei quadratischer Maximalabmessung der Konstruktionsklasse Kon ₁ / Beton gemäß ÖNORM EN 1992-1-1:2015 / BS 1 C PLUS.....	114
Abbildung 5.18 – Primärrissbreite (links) und erforderliche Sekundärrissanzahl (rechts) bei quadratischer Maximalabmessung der Konstruktionsklasse Kon ₂ / Beton gemäß ÖNORM EN 1992-1-1:2015 / BS 1 C PLUS.....	114
Abbildung 5.19 – Bewehrungsbereiche (aktive Rissbreitenbewehrung / Bewehrung für eine robuste Betonoberfläche) / BS 1 A PLUS mit Materialkennwerten gemäß ÖN EN 1992-1-1:2015.....	116
Abbildung 5.20 – Bewehrungsbereiche (aktive Rissbreitenbewehrung / Bewehrung für eine robuste Betonoberfläche) / BS 1 C PLUS mit Materialkennwerten gemäß ÖN EN 1992-1-1:2015.....	116
Abbildung 5.21 – Mindestbewehrungsvergleich zur Begrenzung der Rissbreite gemäß <i>BM „WW optimiert“</i> / <i>BM „WW klassisch“</i> / ÖNORM für die Konstruktionsklasse Kon ₁ ($c_{nom} = 4,0$ cm; BS 1 A PLUS / C 25/30).....	117
Abbildung 5.22 – Mindestbewehrungsvergleich zur Begrenzung der Rissbreite gemäß <i>BM „WW optimiert“</i> / <i>BM „WW klassisch“</i> / ÖNORM für die Konstruktionsklasse Kon ₁ ($c_{nom} = 4,0$ cm; BS 1 C PLUS / C 25/30).....	118
Abbildung 5.23 – Erforderliche Bewehrung der <i>BM „WW klassisch“</i> ($a_{s,WWk}$ & $a_{s,WWk,emp}$) / ÖNORM ($a_{s,ÖN}$) / <i>BM „WW optimiert“</i> ($a_{s,WWo,F,i,j}$) für die Konstruktionsklasse Kon ₁ ($c_{nom} = 4,0$ cm; BS 1 A PLUS).....	120
Abbildung 5.24 – Gesamtbewehrungsgehalt der <i>BM „WW klassisch“</i> ($\rho_{s,WWk}$ & $\rho_{s,WWk,emp}$) / ÖNORM ($\rho_{s,ÖN}$) / <i>BM „WW optimiert“</i> ($\rho_{s,WWo}$) für die Konstruktionsklasse Kon ₁ ($c_{nom} = 4,0$ cm; BS 1 A PLUS).....	123
Abbildung 5.25 – Abweichung der Bewehrungsgehalte gemäß <i>BM „WW klassisch“</i> sowie laut ÖNORM EN 1992-1-1:2015 / ÖNORM B 1992-1-1:2018 zum <i>BM „WW optimiert“</i> in Prozent für die Betonrezeptur BS 1 A PLUS.....	124
Abbildung 5.26 – Gesamtbewehrungsgehalt der <i>BM „WW klassisch“</i> ($\rho_{s,WWk}$ & $\rho_{s,WWk,emp}$) / ÖNORM ($\rho_{s,ÖN}$) / <i>BM „WW optimiert“</i> ($\rho_{s,WWo}$) für die Konstruktionsklasse Kon ₁ ($c_{nom} = 4,0$ cm; BS 1 C PLUS).....	124
Abbildung 5.27 – Abweichung der Bewehrungsgehalte gemäß <i>BM „WW klassisch“</i> sowie laut ÖNORM EN 1992-1-1:2015 / ÖNORM B 1992-1-1:2018 zum <i>BM „WW optimiert“</i> in Prozent für die Betonrezeptur BS 1 C PLUS.....	125
Abbildung 6.1 – Mindestbewehrungsvergleich zur Begrenzung der Rissbreite gemäß <i>BM „WW optimiert“</i> / <i>BM „WW klassisch“</i> / ÖNORM für die Konstruktionsklasse Kon ₂ ($c_{nom} = 4,0$ cm; BS 1 A PLUS / Typ 1).....	128
Abbildung 6.2 – Abweichung der Bewehrungsgehalte gemäß <i>BM „WW klassisch“</i> sowie laut ÖNORM EN 1992-1-1:2015 / ÖNORM B 1992-1-1:2018 zum <i>BM „WW optimiert“</i> in Prozent für die Betonrezeptur BS 1 A PLUS für die Konstruktionsklasse Kon _S / $c_{nom} = 3,0$ cm (links) und 4,0 cm (rechts).....	129
Abbildung 6.3 – Abweichung der Bewehrungsgehalte gemäß <i>BM „WW klassisch“</i> sowie laut ÖNORM EN 1992-1-1:2015 / ÖNORM B 1992-1-1:2018 zum <i>BM „WW optimiert“</i> in Prozent für die Betonrezeptur BS 1 A PLUS für die Konstruktionsklasse Kon ₁ / $c_{nom} = 3,0$ cm (links) und 4,0 cm (rechts).....	129
Abbildung 6.4 – Abweichung der Bewehrungsgehalte gemäß <i>BM „WW klassisch“</i> sowie laut ÖNORM EN 1992-1-1:2015 / ÖNORM B 1992-1-1:2018 zum <i>BM „WW optimiert“</i> in Prozent für die Betonrezeptur BS 1 A PLUS für die Konstruktionsklasse Kon ₂ / $c_{nom} = 3,0$ cm (links) und 4,0 cm (rechts).....	129
Abbildung 6.5 – Bewehrungsbereiche (aktive Rissbreitenbewehrung an Plattenunterseite bzw. Platten-oberseite / Bewehrung für eine robuste Betonoberfläche) / BS 1 C PLUS mit Materialkennwerten gemäß ÖN EN 1992-1-1:2015.....	130
Abbildung 6.6 – Abweichung der Bewehrungsgehalte gemäß <i>BM „WW klassisch“</i> sowie laut ÖNORM EN 1992-1-1:2015 / ÖNORM B 1992-1-1:2018 zum <i>BM „WW optimiert“</i> in Prozent für die Betonrezeptur BS 1 C PLUS für die Konstruktionsklasse Kon _S / $c_{nom} = 3,0$ cm (links) und 4,0 cm (rechts).....	131

Abbildung 6.7 – Abweichung der Bewehrungsgehalte gemäß <i>BM „WW klassisch“</i> sowie laut ÖNORM EN 1992-1-1:2015 / ÖNORM B 1992-1-1:2018 zum <i>BM „WW optimiert“</i> in Prozent für die Betonrezeptur BS 1 C PLUS für die Konstruktionsklasse $Kon_1 / c_{nom} = 3,0$ cm (links) und 4,0 cm (rechts).....	131
Abbildung 6.8 – Abweichung der Bewehrungsgehalte gemäß <i>BM „WW klassisch“</i> sowie laut ÖNORM EN 1992-1-1:2015 / ÖNORM B 1992-1-1:2018 zum <i>BM „WW optimiert“</i> in Prozent für die Betonrezeptur BS 1 C PLUS für die Konstruktionsklasse $Kon_2 / c_{nom} = 3,0$ cm (links) und 4,0 cm (rechts).....	131

Anhang A.1

Vergleich der Mindestbewehrung für zentrischen Zwang (Frührissbildung) nach *öbv-RL „Weiße Wannen“* (Bemessungsmodell „Weiße Wanne klassisch“) mit dem Rissbreitennachweis gemäß ÖNORM EN 1992-1-1:2015 und ÖNORM B 1992-1-1:2018

Vergleich der Mindestbewehrung für zentrischen Zwang (Frührissbildung) nach öbv-RL "Weiße Wannen" (Bemessungsmodell "Weiße Wanne klassisch") mit dem Rissbreitennachweis gemäß ÖNORM EN 1992-1-1:2015 und ÖNORM B 1992-1-1:2018

w_{zul} [mm]	c_{nom} [cm]	f_{ck} [N/mm ²]	f_{ctm} [N/mm ²]	E_{cm} [N/mm ²]	f_{yk} [N/mm ²]	E_s [N/mm ²]
0,15	3,00	25,00	2,60	31.476	550,00	200.000

RBNW / öbv-RL "Weiße Wannen" (Bemessungsmodell "Weiße Wanne klassisch") gemäß Angaben DI Alfred Moser

o_1 für $f_{ct,eff}$ [-]	o_2 für $E_{cm,eff}$ [-]	k_c [-]	o_3 für k [-]	k_t [-]	o_4 für a_s (BS1) [-]
0,30	0,30	1,00	1,00	0,60	1,00

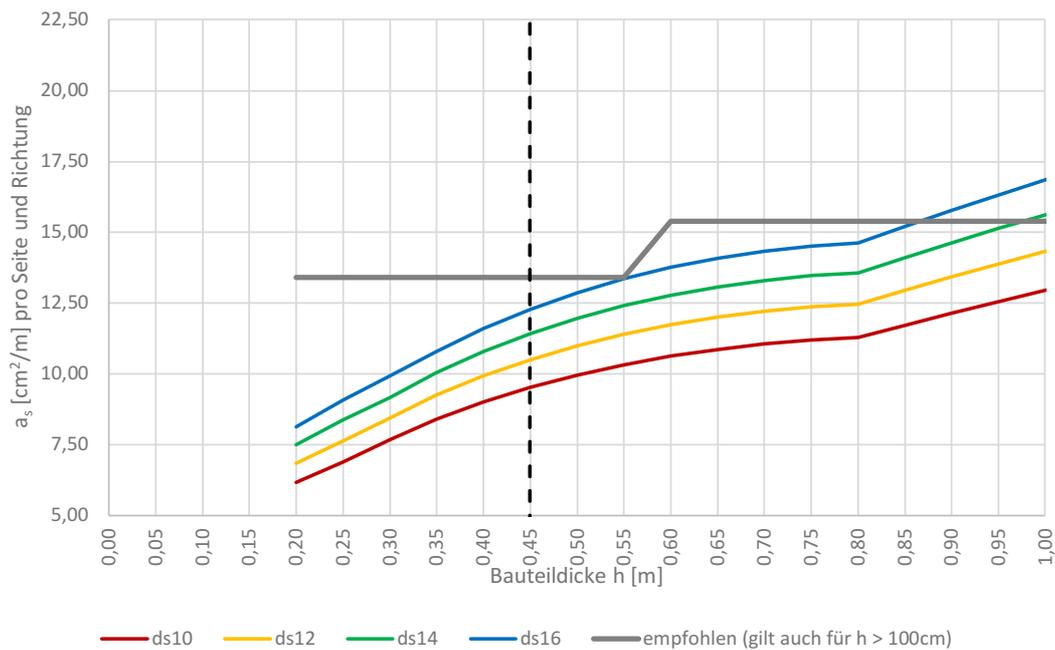
RBNW / ÖNORM EN 1992-1-1:2015 (Abs. 7.3.4) + ÖNORM 1992-1-1:2018 (Abs. 10.2.2)

o_1 für $f_{ct,eff}$ [-]	o_2 für $E_{cm,eff}$ [-]	k_c [-]	o_3 für k [-]	k_t [-]	o_4 für a_s (BS1+) [-]
0,50	0,50	1,00	0,80	0,60	0,85

RBNW / ÖNORM B 1992-1-1 (Abs. 10.2; Gl. (16))

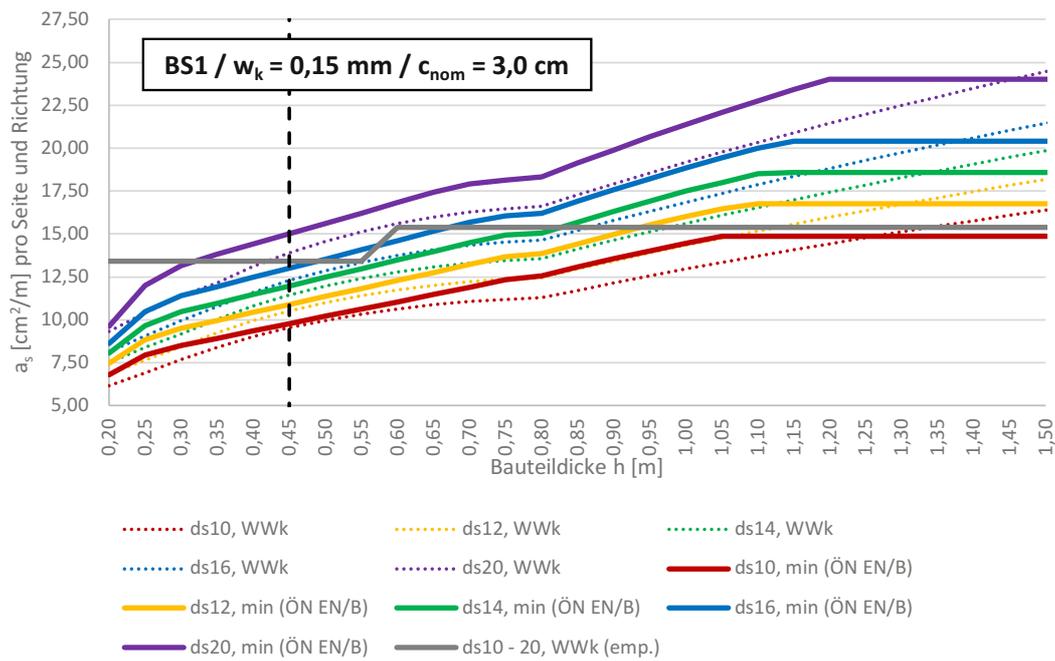
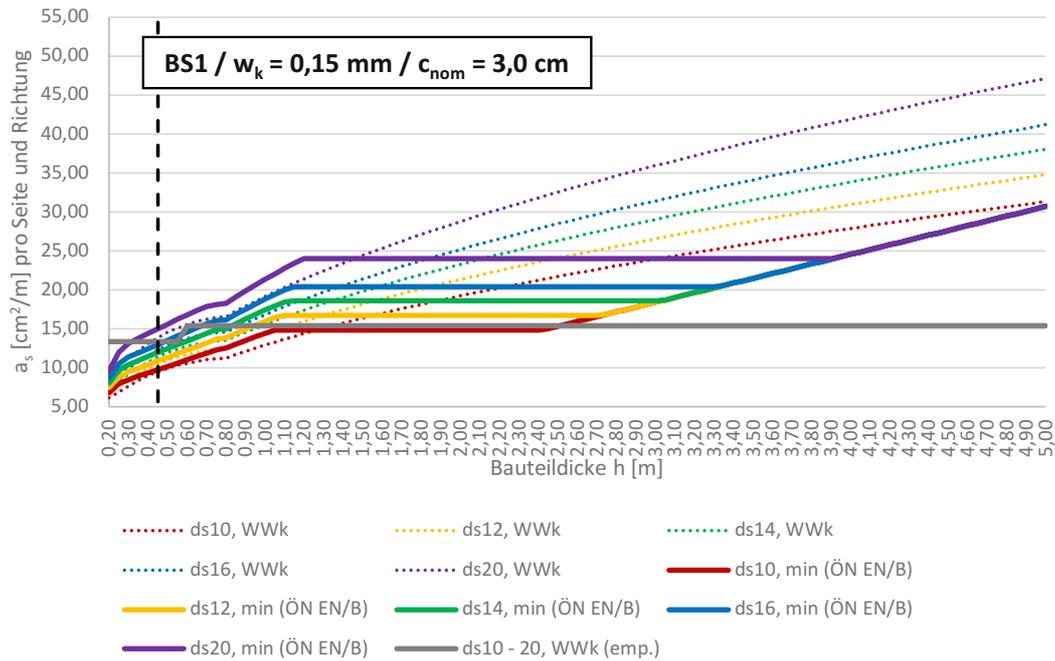
o_1 für $f_{ct,eff}$ [-]	o_3 für k [-]	o_4 für a_s (BS1+) [-]
0,50	0,80	0,85

Mindestbewehrung für überwiegende Zwangsbeanspruchung (Frührissbildung)
Rissbreite $w_k = 0,15$ mm, für Betondeckung $c = 3,0$ cm

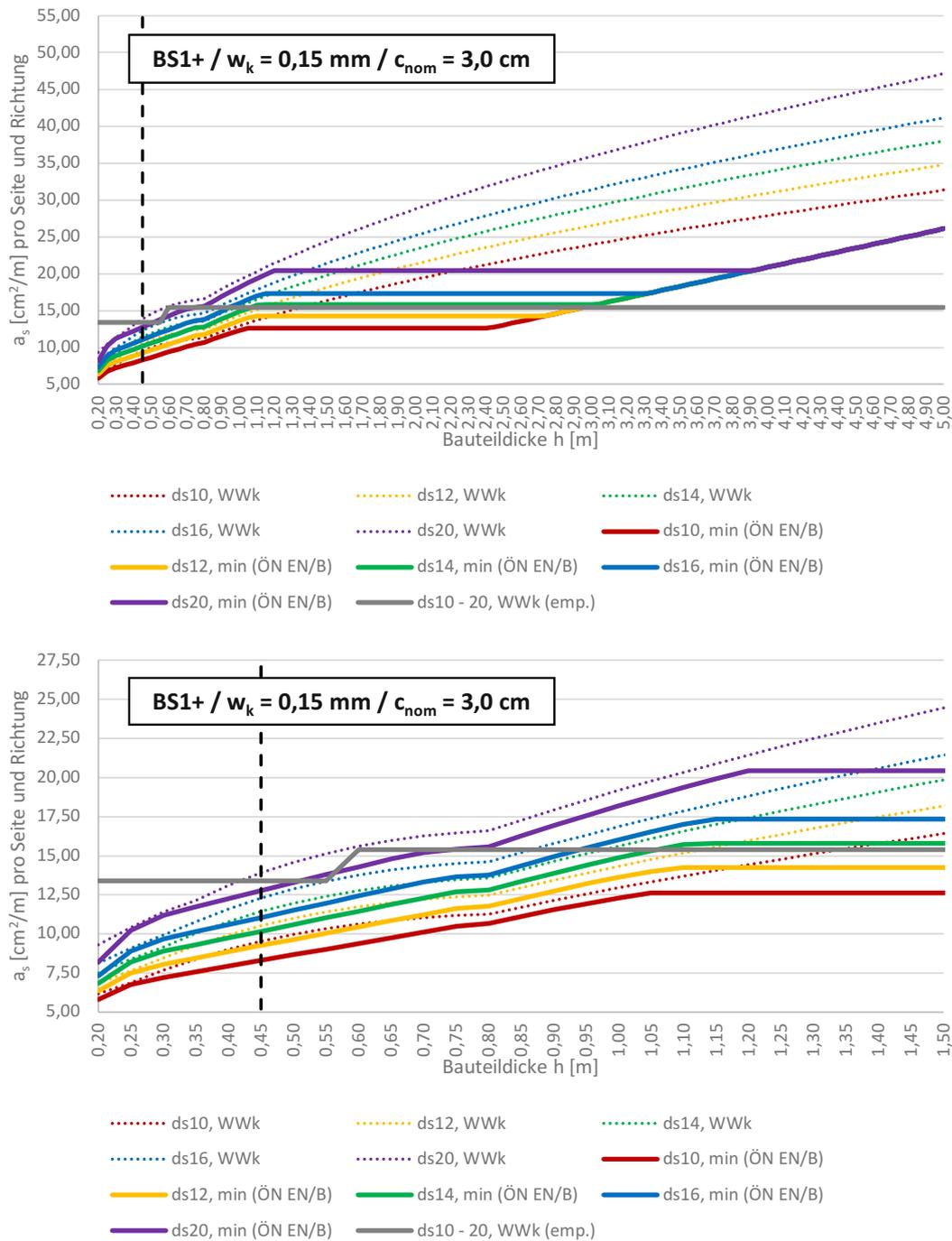


Darstellung nach [öbv-RL "Weiße Wannen" (2018), S. 15 - Abbildung 4-6]

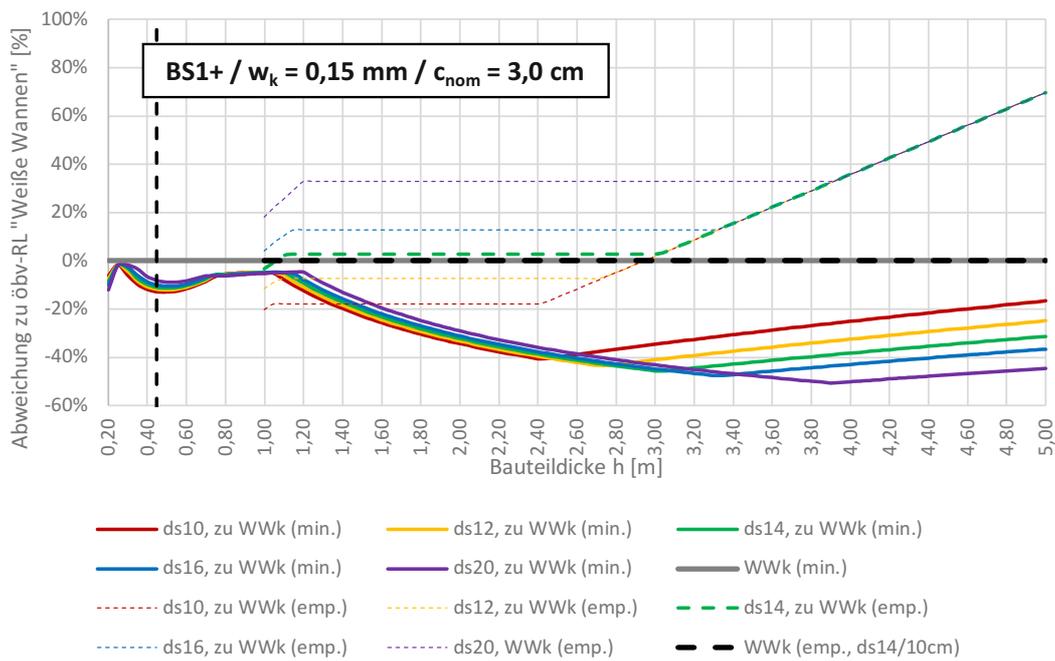
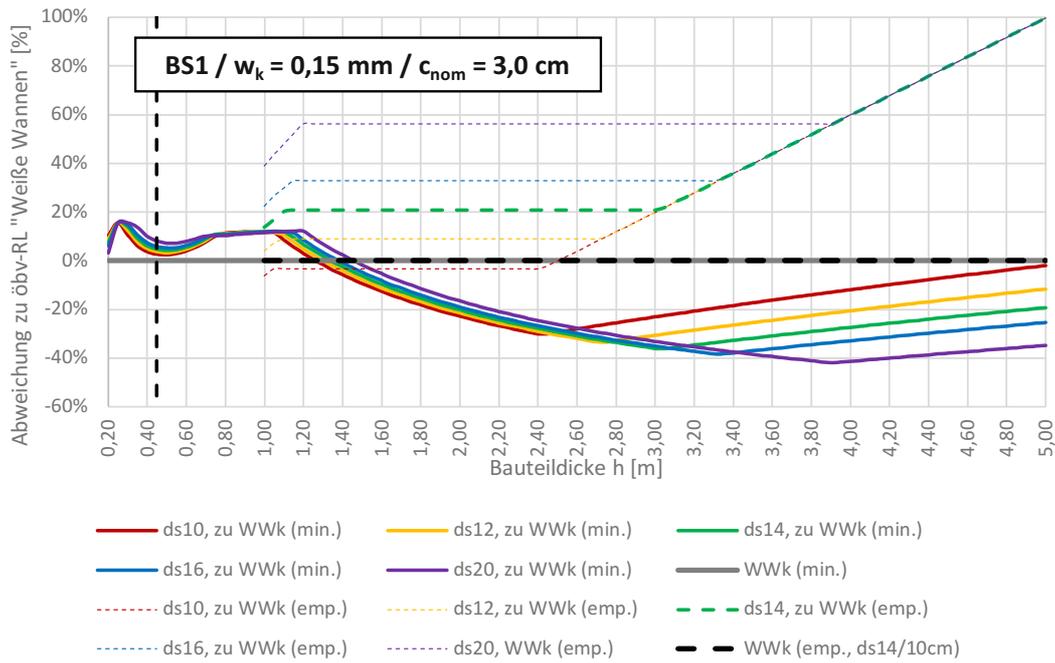
Vergleich der Mindestbewehrung für zentrischen Zwang (Frührisbildung) nach öbv-RL "Weiße Wannen" (Bemessungsmodell "Weiße Wanne klassisch") mit dem Rissbreitennachweis gemäß ÖNORM EN 1992-1-1:2015 und ÖNORM B 1992-1-1:2018



Vergleich der Mindestbewehrung für zentrischen Zwang (Frührisbildung) nach öbv-RL "Weiße Wannen" (Bemessungsmodell "Weiße Wanne klassisch") mit dem Rissbreitennachweis gemäß ÖNORM EN 1992-1-1:2015 und ÖNORM B 1992-1-1:2018



Vergleich der Mindestbewehrung für zentrischen Zwang (Frührisbildung) nach öbv-RL "Weiße Wannen" (Bemessungsmodell "Weiße Wanne klassisch") mit dem Rissbreitennachweis gemäß ÖNORM EN 1992-1-1:2015 und ÖNORM B 1992-1-1:2018



Vergleich der Mindestbewehrung für zentrischen Zwang (Frührissbildung) nach öbv-RL "Weiße Wannen" (Bemessungsmodell "Weiße Wanne klassisch") mit dem Rissbreitennachweis gemäß ÖNORM EN 1992-1-1:2015 und ÖNORM B 1992-1-1:2018

w_{zul}	c_{nom}	f_{ck}	f_{ctm}	E_{cm}	f_{yk}	E_s
[mm]	[cm]	[N/mm ²]				
0,15	4,00	25,00	2,60	31.476	550,00	200.000

RBNW / öbv-RL "Weiße Wannen" (Bemessungsmodell "Weiße Wanne klassisch") gemäß Angaben DI Alfred Moser

o_1 für	o_2 für	o_3 für	o_4 für
$f_{ct,eff}$	$E_{cm,eff}$	k_c	k
[-]	[-]	[-]	[-]
0,30	0,30	1,00	1,00

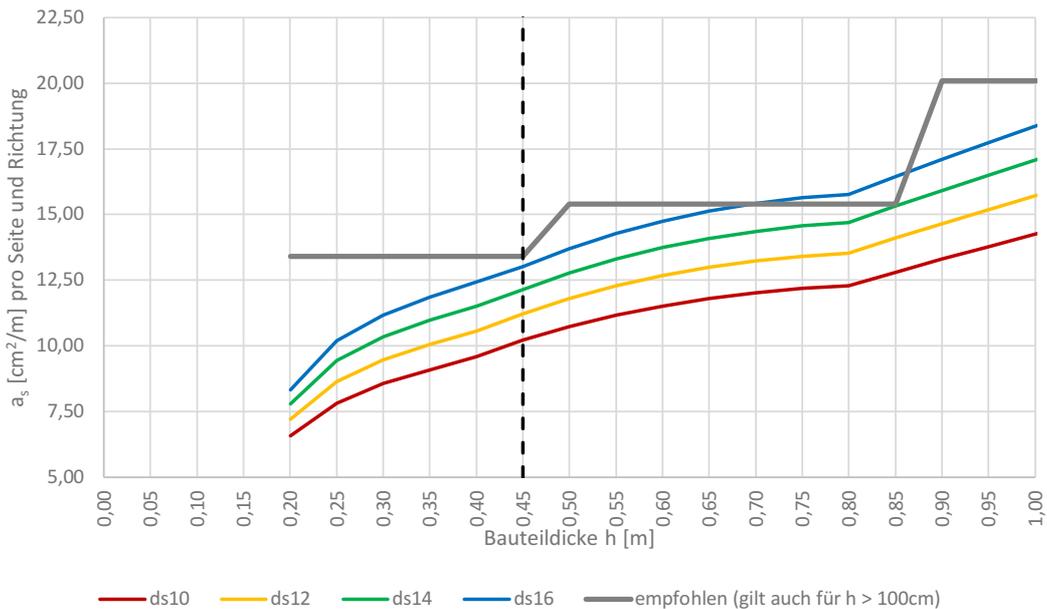
RBNW / ÖNORM EN 1992-1-1:2015 (Abs. 7.3.4) + ÖNORM 1992-1-1:2018 (Abs. 10.2.2)

o_1 für	o_2 für	o_3 für	o_4 für
$f_{ct,eff}$	$E_{cm,eff}$	k_c	k
[-]	[-]	[-]	[-]
0,50	0,50	1,00	0,80

RBNW / ÖNORM B 1992-1-1 (Abs. 10.2; Gl. (16))

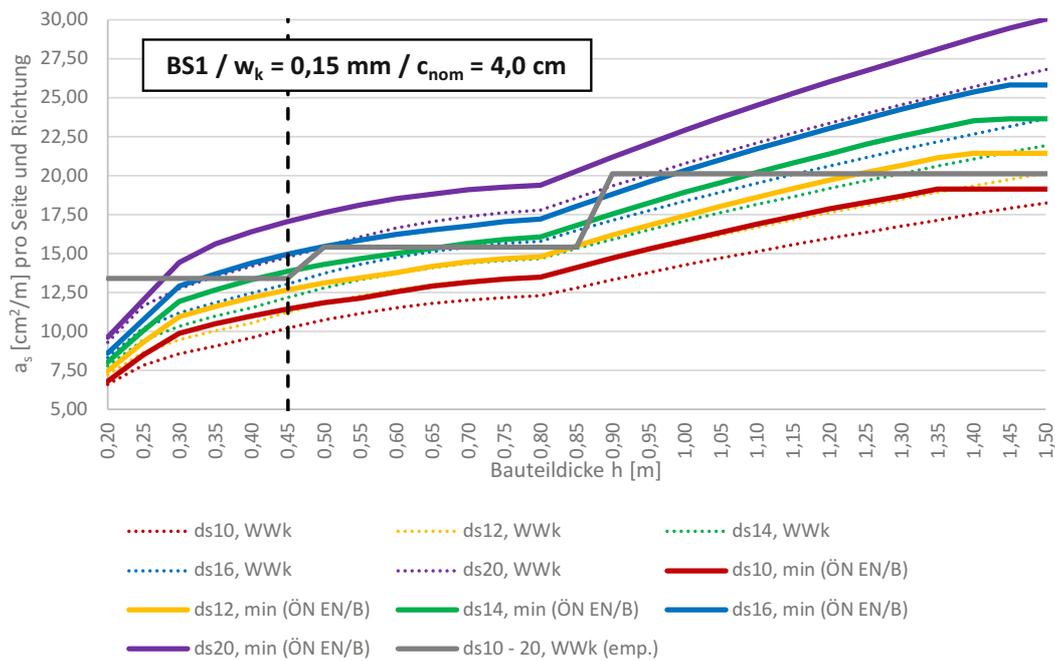
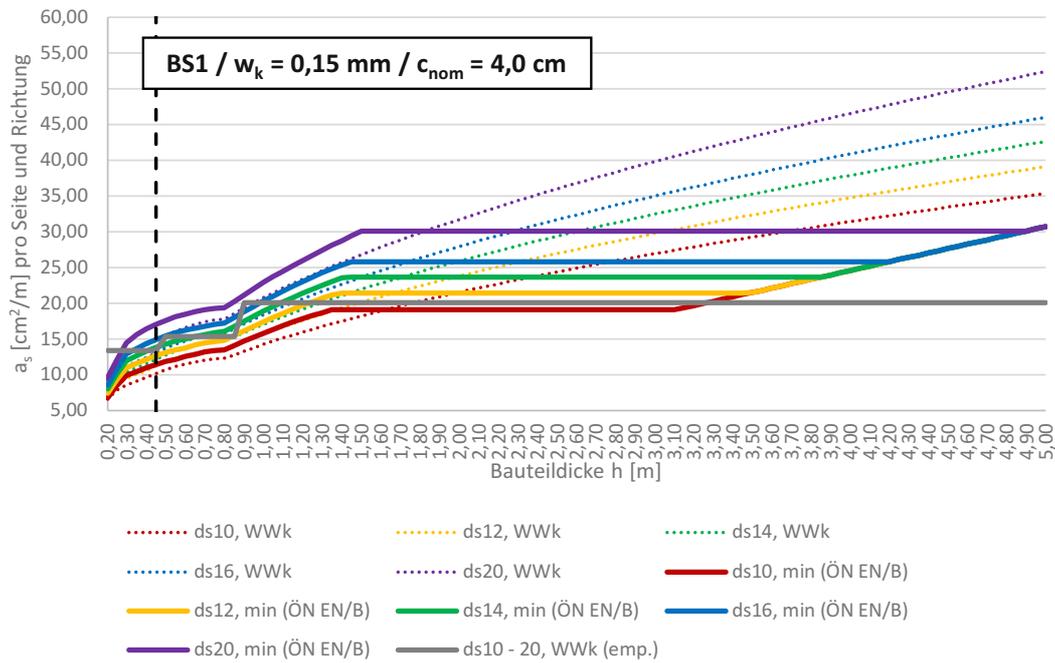
o_1 für	o_3 für	o_4 für
$f_{ct,eff}$	k	a_s (BS1+)
[-]	[-]	[-]
0,50	0,80	0,85

Mindestbewehrung für überwiegende Zwangsbeanspruchung (Frührissbildung)
Rissbreite $w_k = 0,15$ mm, für Betondeckung $c = 4,0$ cm

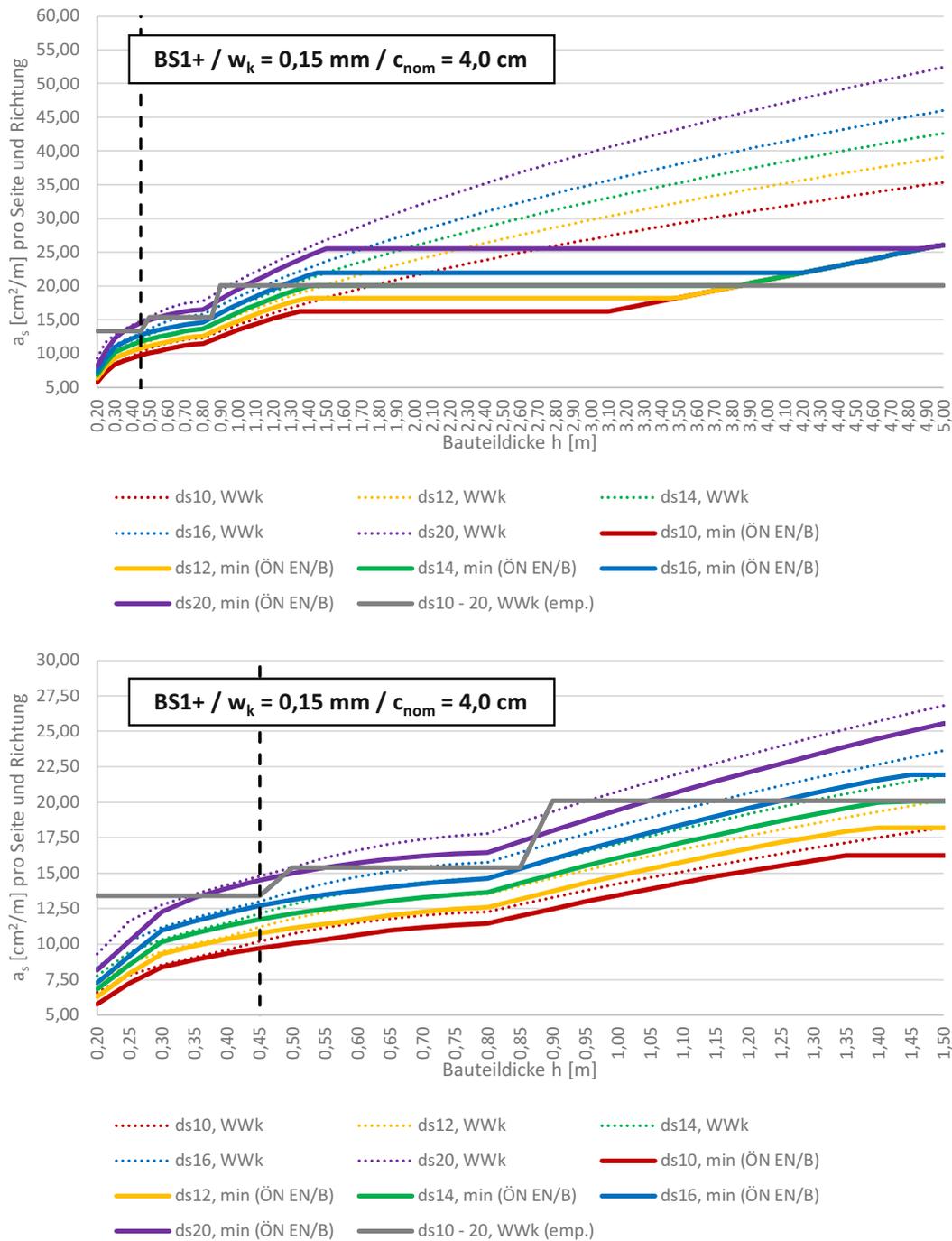


Darstellung nach [öbv-RL "Weiße Wannen" (2018); S. 14 - Abbildung 4-5]

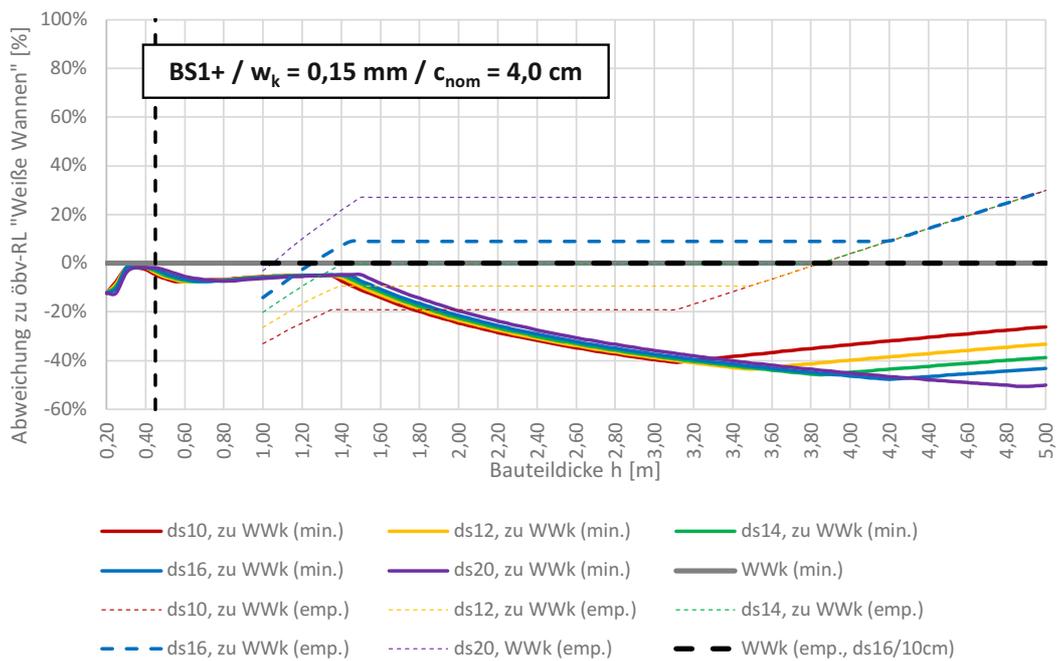
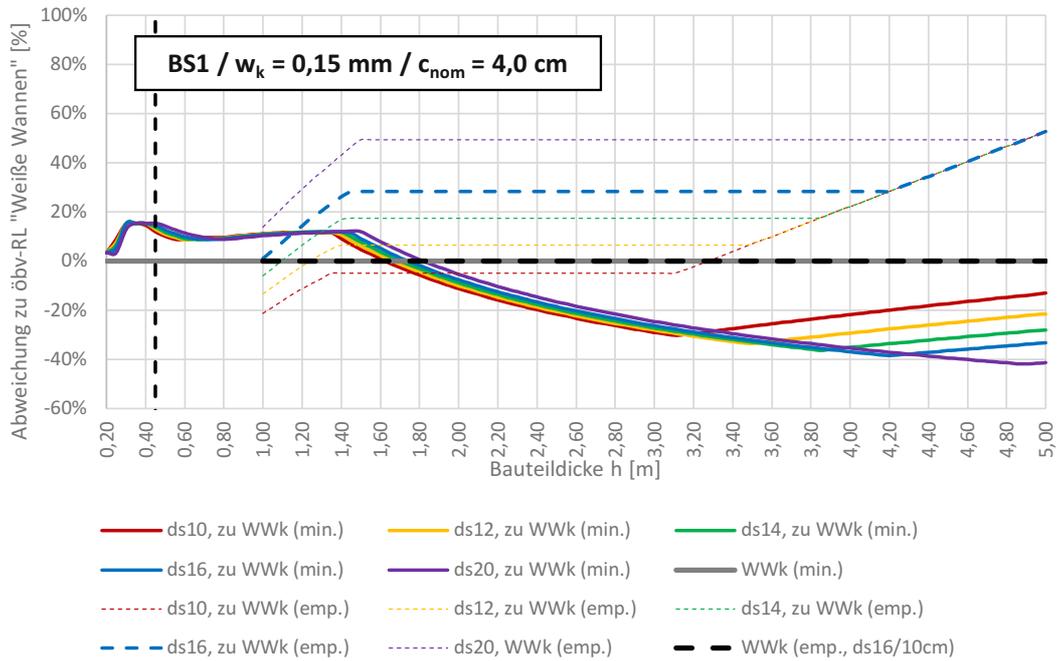
Vergleich der Mindestbewehrung für zentrischen Zwang (Frührißbildung) nach öbv-RL "Weiße Wannen" (Bemessungsmodell "Weiße Wanne klassisch") mit dem Rissbreitennachweis gemäß ÖNORM EN 1992-1-1:2015 und ÖNORM B 1992-1-1:2018



Vergleich der Mindestbewehrung für zentrischen Zwang (Frührisssbildung) nach öbv-RL "Weiße Wannen" (Bemessungsmodell "Weiße Wanne klassisch") mit dem Rissbreitennachweis gemäß ÖNORM EN 1992-1-1:2015 und ÖNORM B 1992-1-1:2018



Vergleich der Mindestbewehrung für zentrischen Zwang (Frührißbildung) nach öbv-RL "Weiße Wannen" (Bemessungsmodell "Weiße Wanne klassisch") mit dem Rissbreitennachweis gemäß ÖNORM EN 1992-1-1:2015 und ÖNORM B 1992-1-1:2018



Vergleich der Mindestbewehrung für zentrischen Zwang (Frührissbildung) nach öbv-RL "Weiße Wannen" (Bemessungsmodell "Weiße Wanne klassisch") mit dem Rissbreitennachweis gemäß ÖNORM EN 1992-1-1:2015 und ÖNORM B 1992-1-1:2018

w_{zul} [mm]	c_{nom} [cm]	f_{ck} [N/mm ²]	f_{ctm} [N/mm ²]	E_{cm} [N/mm ²]	f_{yk} [N/mm ²]	E_s [N/mm ²]
0,20	3,00	25,00	2,60	31.476	550,00	200.000

RBNW / öbv-RL "Weiße Wannen" (Bemessungsmodell "Weiße Wanne klassisch") gemäß Angaben DI Alfred Moser

o_1 für $f_{ct,eff}$ [-]	o_2 für $E_{cm,eff}$ [-]	k_c [-]	o_3 für k [-]	k_t [-]	o_4 für a_s (BS1) [-]
0,30	0,30	1,00	1,00	0,60	1,00

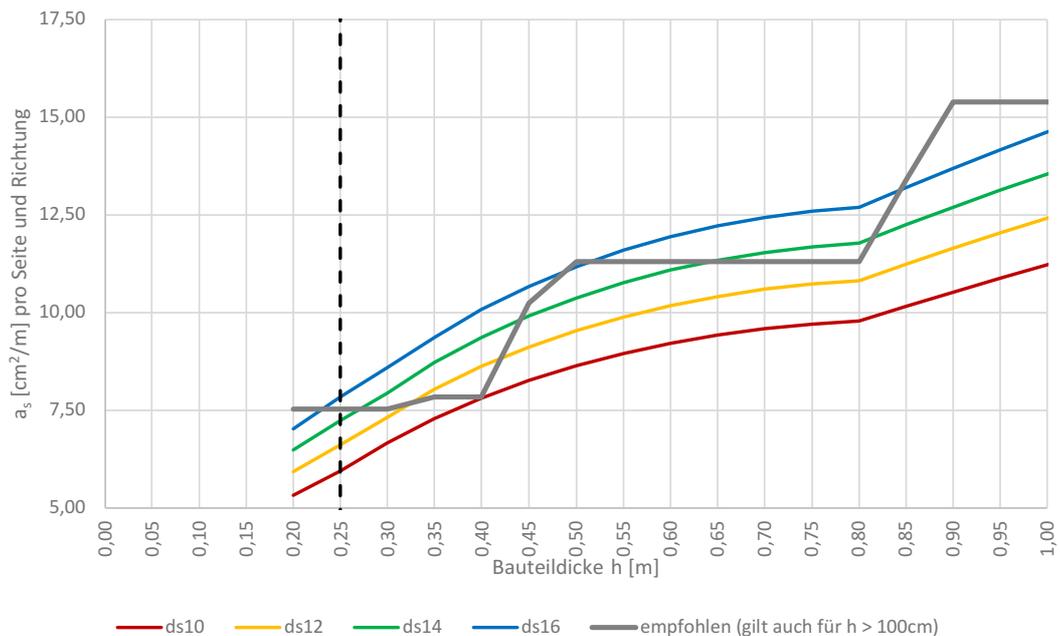
**RBNW / ÖNORM EN 1992-1-1:2015 (Abs. 7.3.4) +
ÖNORM 1992-1-1:2018 (Abs. 10.2.2)**

o_1 für $f_{ct,eff}$ [-]	o_2 für $E_{cm,eff}$ [-]	k_c [-]	o_3 für k [-]	k_t [-]	o_4 für a_s (BS1+) [-]
0,50	0,50	1,00	0,80	0,60	0,85

**RBNW / ÖNORM B 1992-1-1
(Abs. 10.2; Gl. (16))**

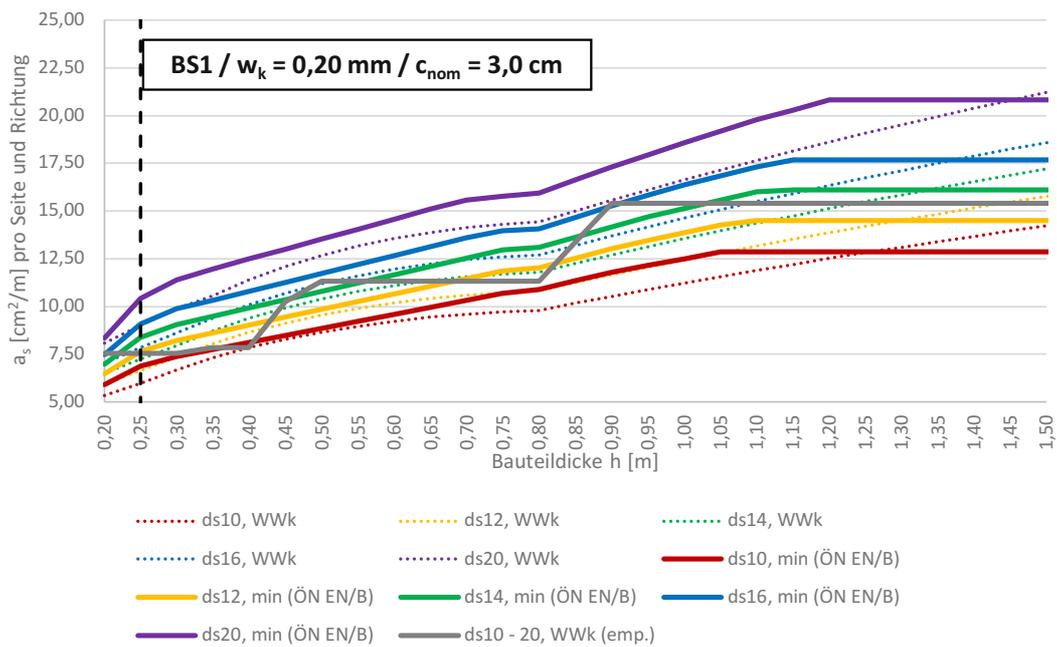
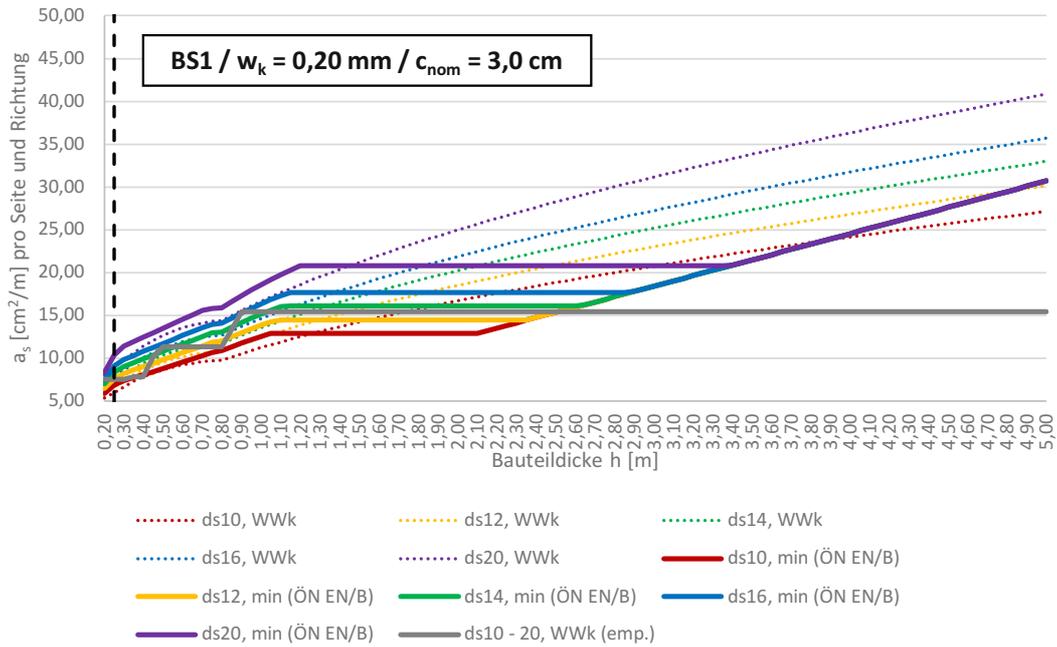
o_1 für $f_{ct,eff}$ [-]	o_3 für k [-]	o_4 für a_s (BS1+) [-]
0,50	0,80	0,85

Mindestbewehrung für überwiegende Zwangsbeanspruchung (Frührissbildung)
Rissbreite $w_k = 0,20$ mm, für Betondeckung $c = 3,0$ cm

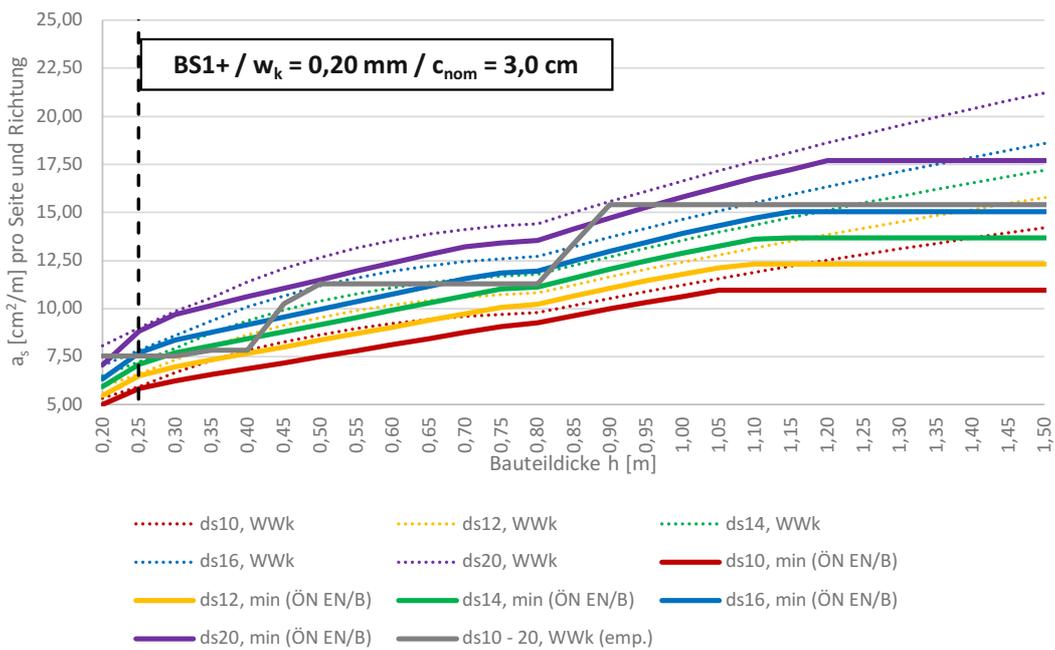
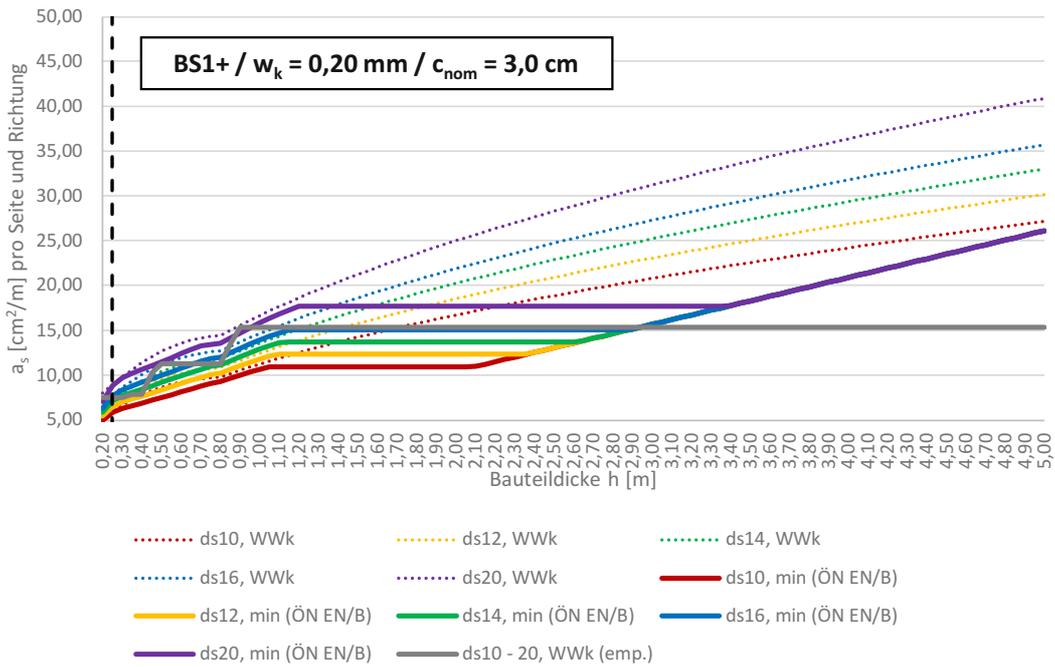


Darstellung nach [öbv-RL "Weiße Wannen" (2018); S. 16 - Abbildung 4-8]

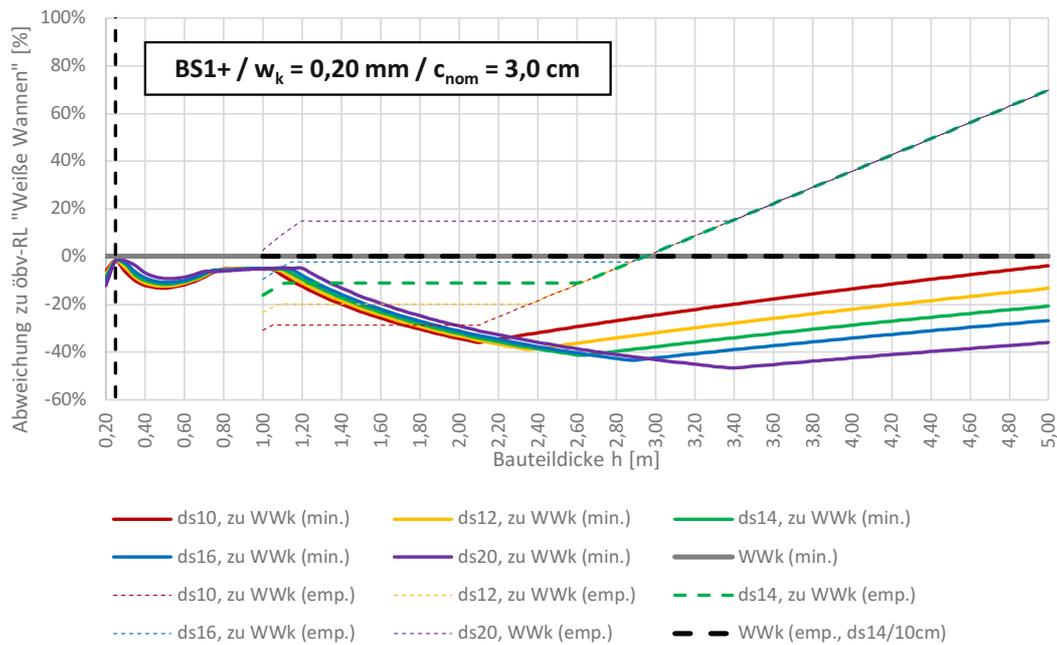
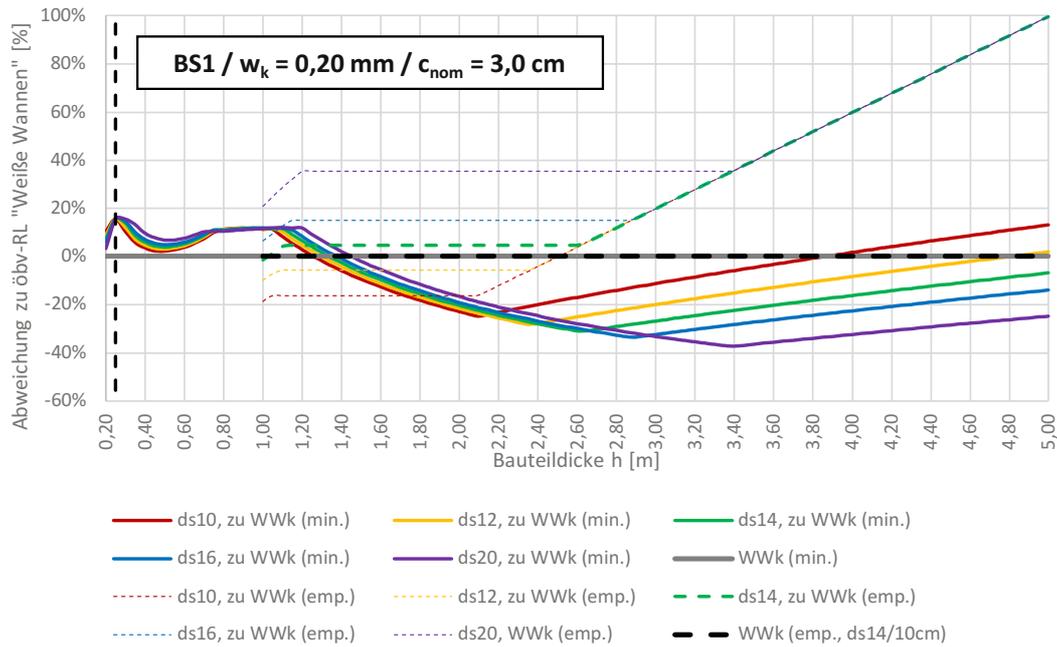
Vergleich der Mindestbewehrung für zentrischen Zwang (Frührisbildung) nach öbv-RL "Weiße Wannen" (Bemessungsmodell "Weiße Wanne klassisch") mit dem Rissbreitennachweis gemäß ÖNORM EN 1992-1-1:2015 und ÖNORM B 1992-1-1:2018



Vergleich der Mindestbewehrung für zentrischen Zwang (Frührissbildung) nach öbv-RL "Weiße Wannen" (Bemessungsmodell "Weiße Wanne klassisch") mit dem Rissbreitennachweis gemäß ÖNORM EN 1992-1-1:2015 und ÖNORM B 1992-1-1:2018



Vergleich der Mindestbewehrung für zentrischen Zwang (Frührissbildung) nach öbv-RL "Weiße Wannen" (Bemessungsmodell "Weiße Wanne klassisch") mit dem Rissbreitennachweis gemäß ÖNORM EN 1992-1-1:2015 und ÖNORM B 1992-1-1:2018



Vergleich der Mindestbewehrung für zentrischen Zwang (Frührissbildung) nach öbv-RL "Weiße Wannen" (Bemessungsmodell "Weiße Wanne klassisch") mit dem Rissbreitennachweis gemäß ÖNORM EN 1992-1-1:2015 und ÖNORM B 1992-1-1:2018

w_{zul} [mm]	c_{nom} [cm]	f_{ck} [N/mm ²]	f_{ctm} [N/mm ²]	E_{cm} [N/mm ²]	f_{yk} [N/mm ²]	E_s [N/mm ²]
0,20	4,00	25,00	2,60	31.476	550,00	200.000

RBNW / öbv-RL "Weiße Wannen" (Bemessungsmodell "Weiße Wanne klassisch") gemäß Angaben DI Alfred Moser

o_1 für $f_{ct,eff}$ [-]	o_2 für $E_{cm,eff}$ [-]	k_c [-]	o_3 für k [-]	k_t [-]	o_4 für a_s (BS1) [-]
0,30	0,30	1,00	1,00	0,60	1,00

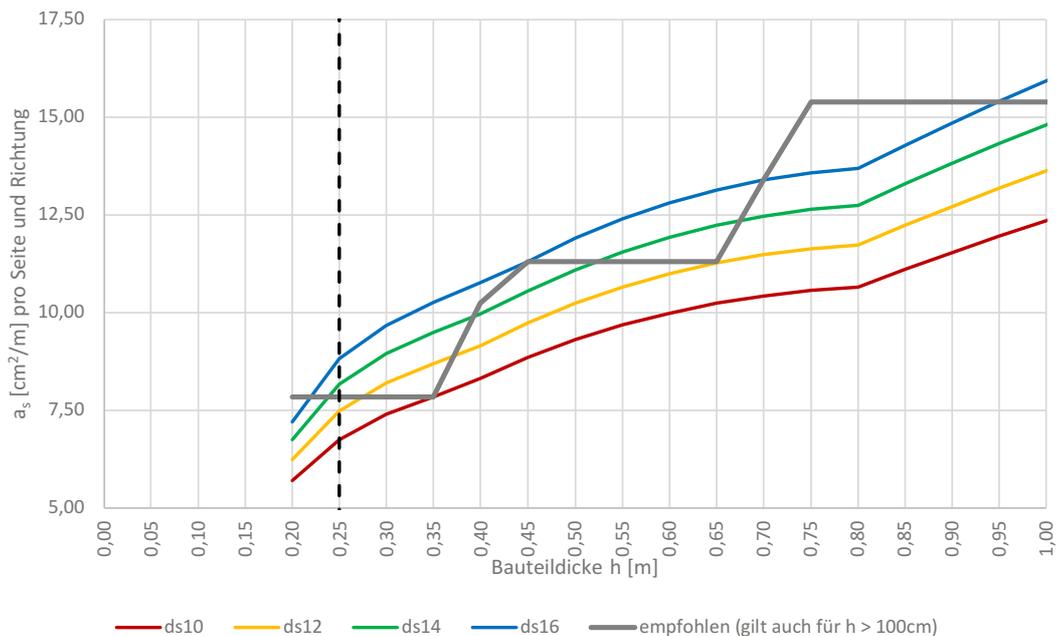
RBNW / ÖNORM EN 1992-1-1:2015 (Abs. 7.3.4) + ÖNORM 1992-1-1:2018 (Abs. 10.2.2)

o_1 für $f_{ct,eff}$ [-]	o_2 für $E_{cm,eff}$ [-]	k_c [-]	o_3 für k [-]	k_t [-]	o_4 für a_s (BS1+) [-]
0,50	0,50	1,00	0,80	0,60	0,85

RBNW / ÖNORM B 1992-1-1 (Abs. 10.2; Gl. (16))

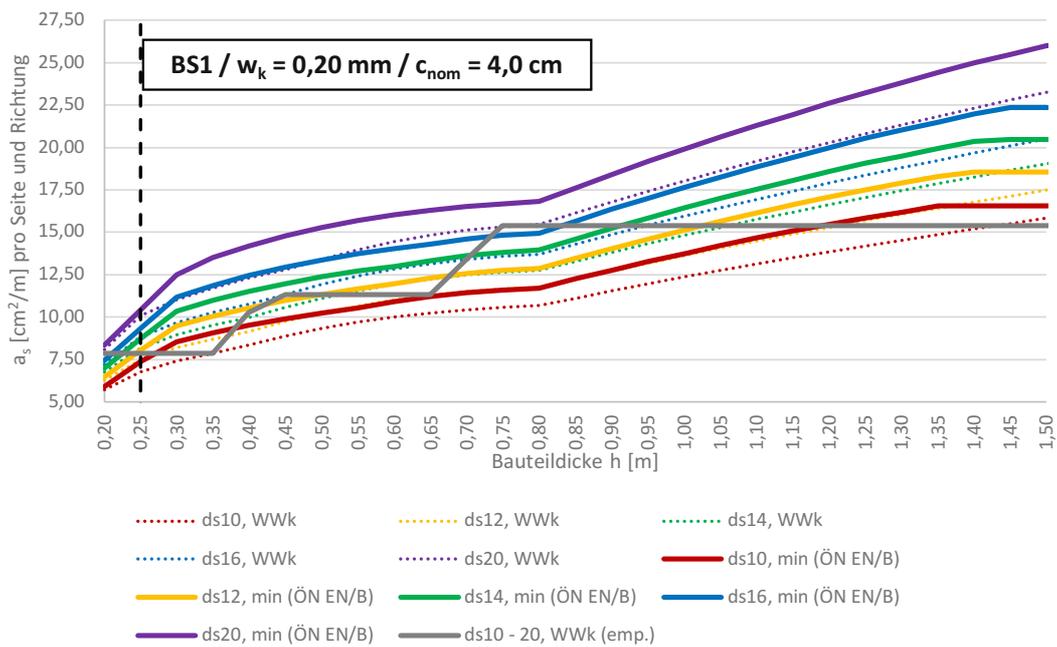
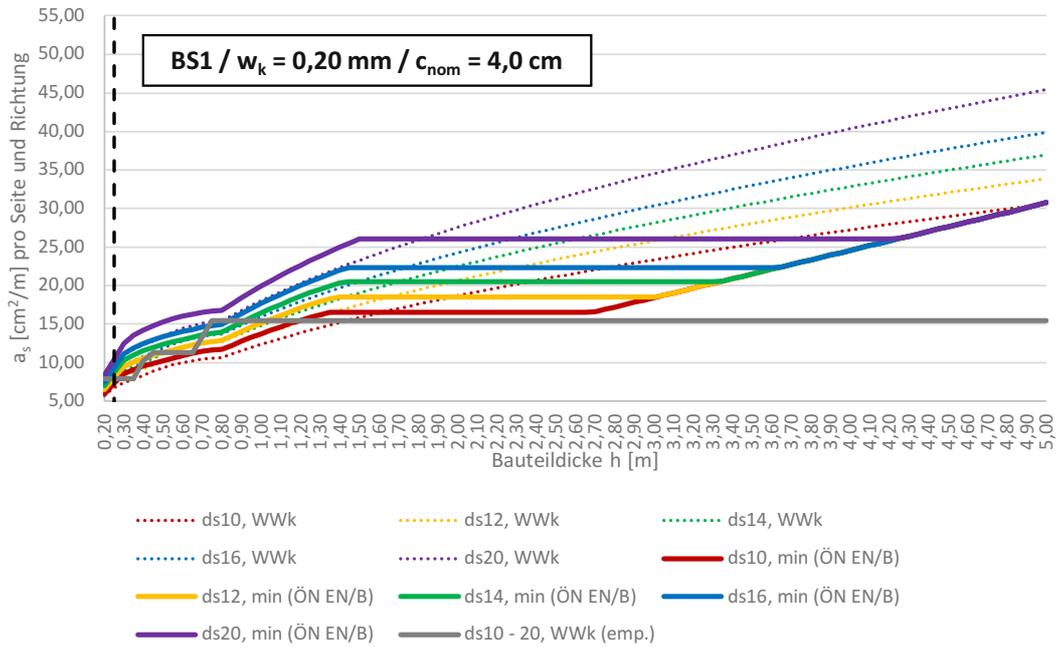
o_1 für $f_{ct,eff}$ [-]	o_3 für k [-]	o_4 für a_s (BS1+) [-]
0,50	0,80	0,85

Mindestbewehrung für überwiegende Zwangsbeanspruchung (Frührissbildung)
Rissbreite $w_k = 0,20$ mm, für Betondeckung $c = 4,0$ cm

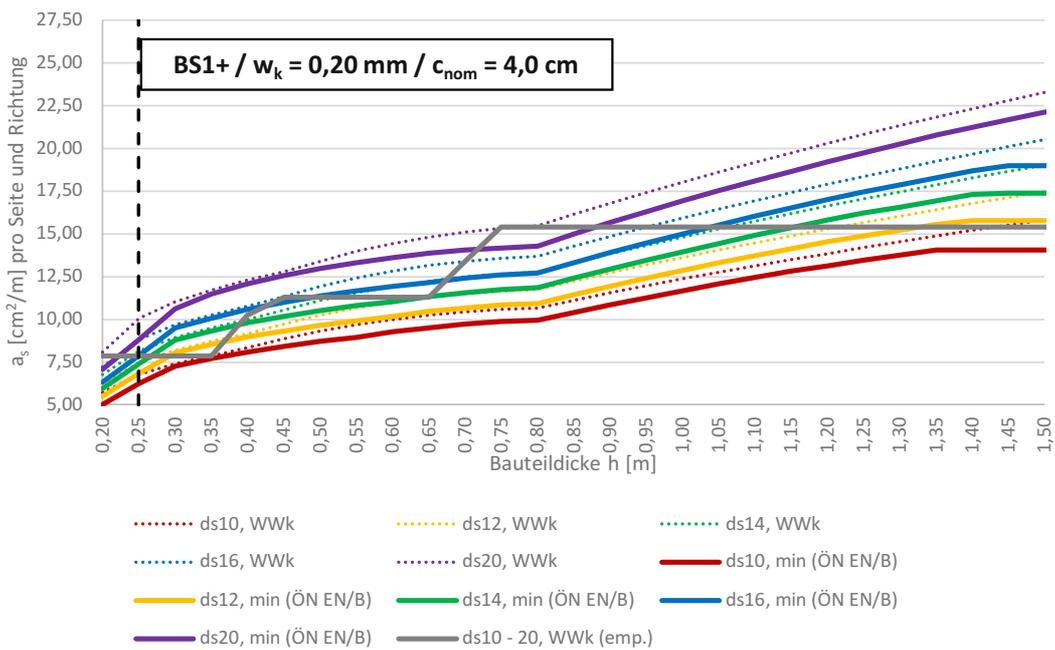
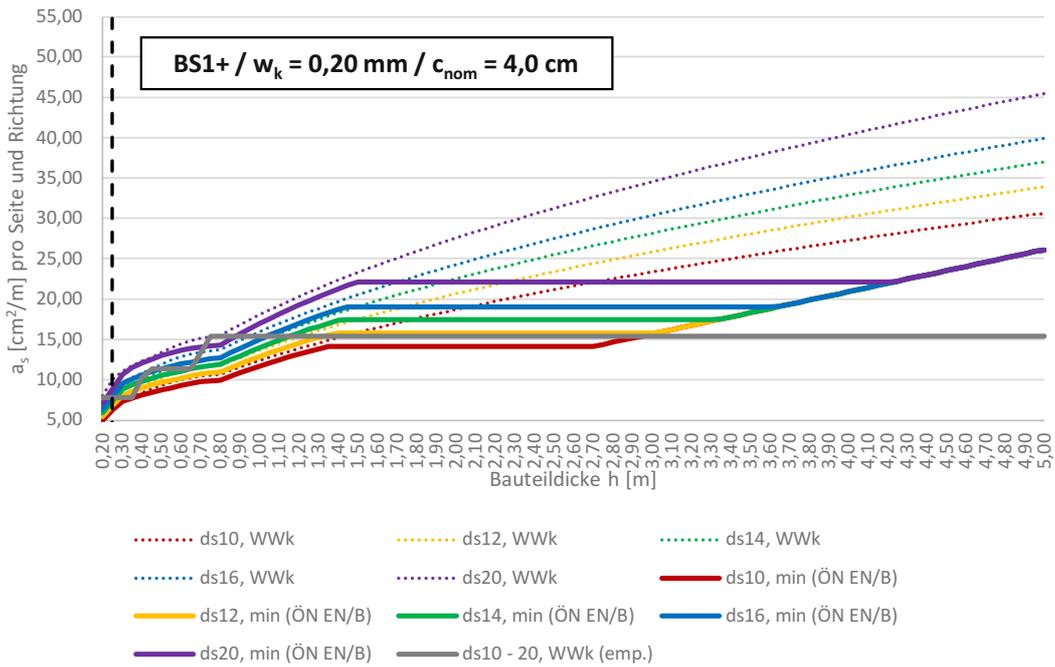


Darstellung nach [öbv-RL "Weiße Wannen" (2018); S. 15 - Abbildung 4-7]

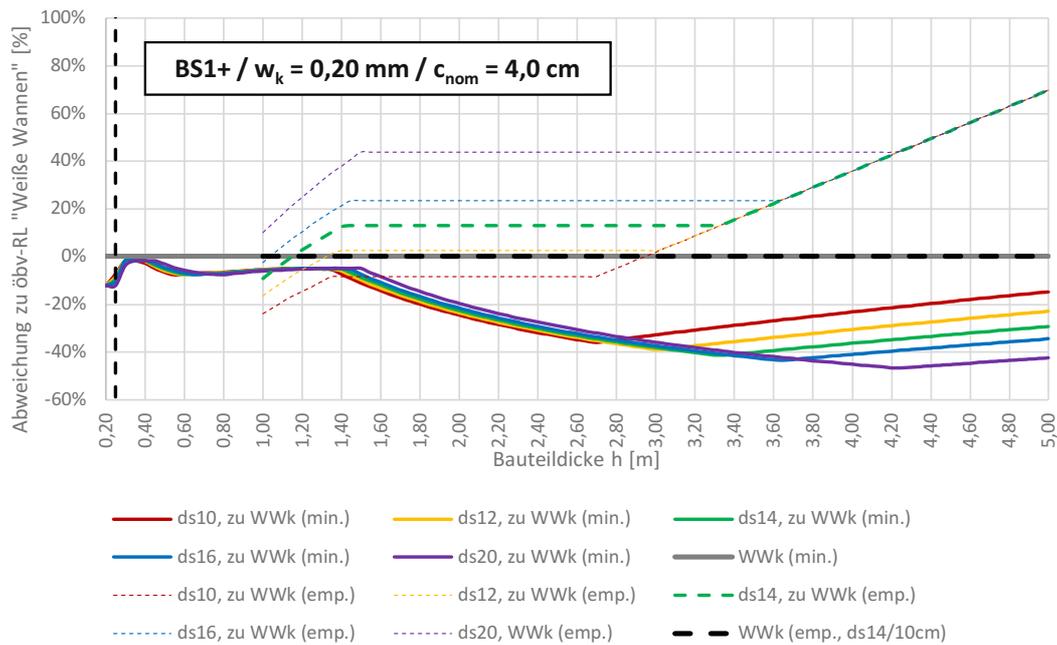
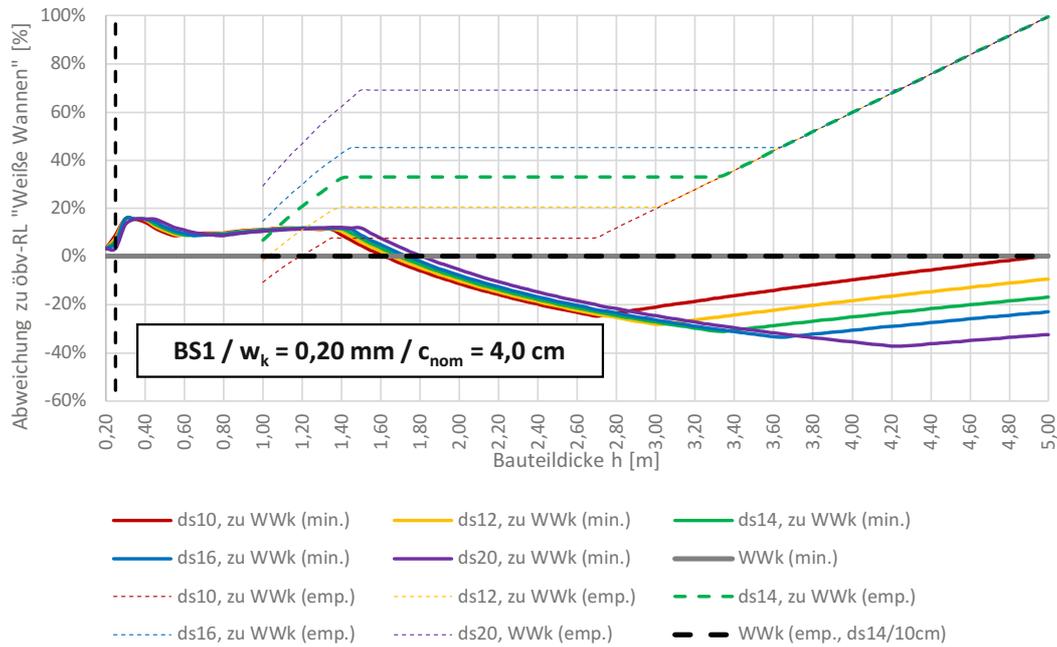
Vergleich der Mindestbewehrung für zentrischen Zwang (Frührissbildung) nach öbv-RL "Weiße Wannen" (Bemessungsmodell "Weiße Wanne klassisch") mit dem Rissbreitennachweis gemäß ÖNORM EN 1992-1-1:2015 und ÖNORM B 1992-1-1:2018



Vergleich der Mindestbewehrung für zentrischen Zwang (Frührissbildung) nach öbv-RL "Weiße Wannen" (Bemessungsmodell "Weiße Wanne klassisch") mit dem Rissbreitennachweis gemäß ÖNORM EN 1992-1-1:2015 und ÖNORM B 1992-1-1:2018



Vergleich der Mindestbewehrung für zentrischen Zwang (Frührissbildung) nach öbv-RL "Weiße Wannen" (Bemessungsmodell "Weiße Wanne klassisch") mit dem Rissbreitennachweis gemäß ÖNORM EN 1992-1-1:2015 und ÖNORM B 1992-1-1:2018



Vergleich der Mindestbewehrung für zentrischen Zwang (Frührissbildung) nach öbv-RL "Weiße Wannen" (Bemessungsmodell "Weiße Wanne klassisch") mit dem Rissbreitennachweis gemäß ÖNORM EN 1992-1-1:2015 und ÖNORM B 1992-1-1:2018

w_{zul} [mm]	c_{nom} [cm]	f_{ck} [N/mm ²]	f_{ctm} [N/mm ²]	E_{cm} [N/mm ²]	f_{yk} [N/mm ²]	E_s [N/mm ²]
0,25	3,00	25,00	2,60	31.476	550,00	200.000

RBNW / öbv-RL "Weiße Wannen" (Bemessungsmodell "Weiße Wanne klassisch") gemäß Angaben DI Alfred Moser

o_1 für $f_{ct,eff}$ [-]	o_2 für $E_{cm,eff}$ [-]	k_c [-]	o_3 für k [-]	k_t [-]	o_4 für a_s (BS1) [-]
0,30	0,30	1,00	1,00	0,60	1,00

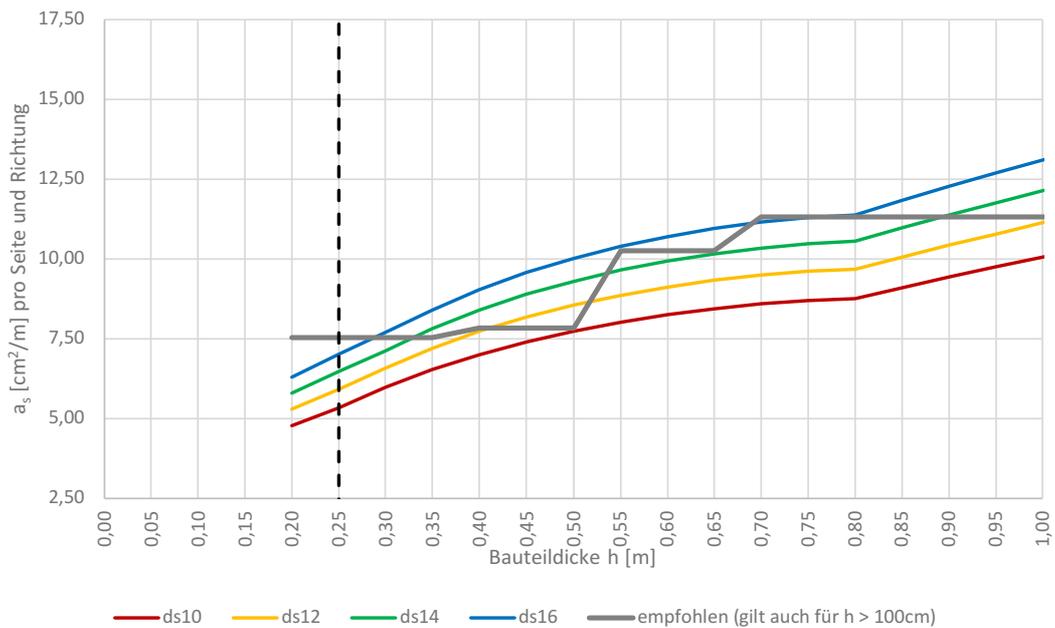
RBNW / ÖNORM EN 1992-1-1:2015 (Abs. 7.3.4) + ÖNORM 1992-1-1:2018 (Abs. 10.2.2)

o_1 für $f_{ct,eff}$ [-]	o_2 für $E_{cm,eff}$ [-]	k_c [-]	o_3 für k [-]	k_t [-]	o_4 für a_s (BS1+) [-]
0,50	0,50	1,00	0,80	0,60	0,85

RBNW / ÖNORM B 1992-1-1 (Abs. 10.2; Gl. (16))

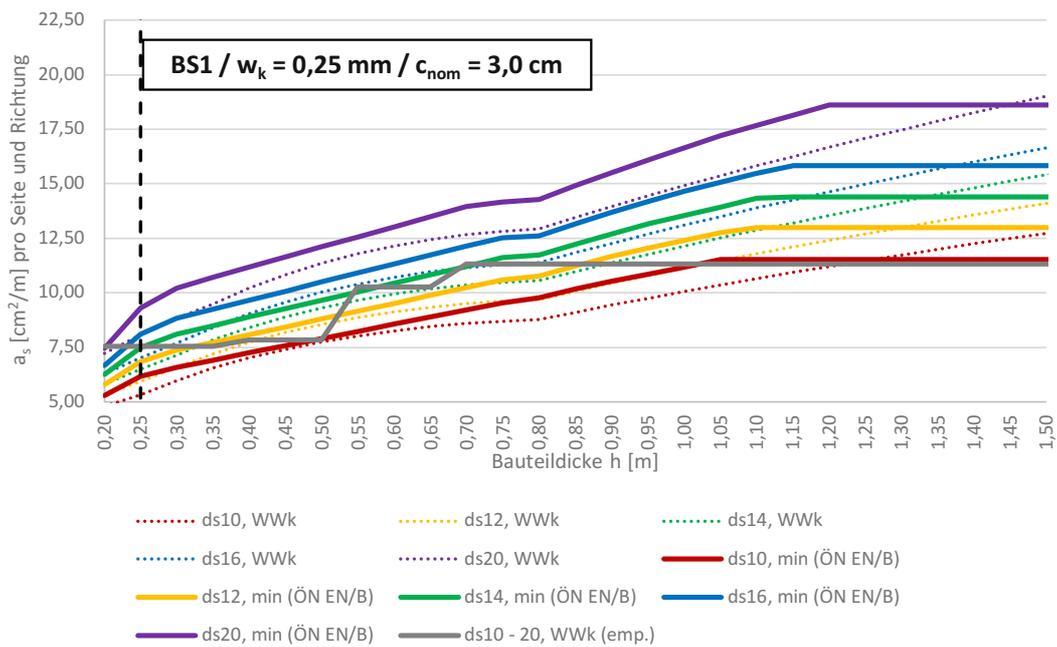
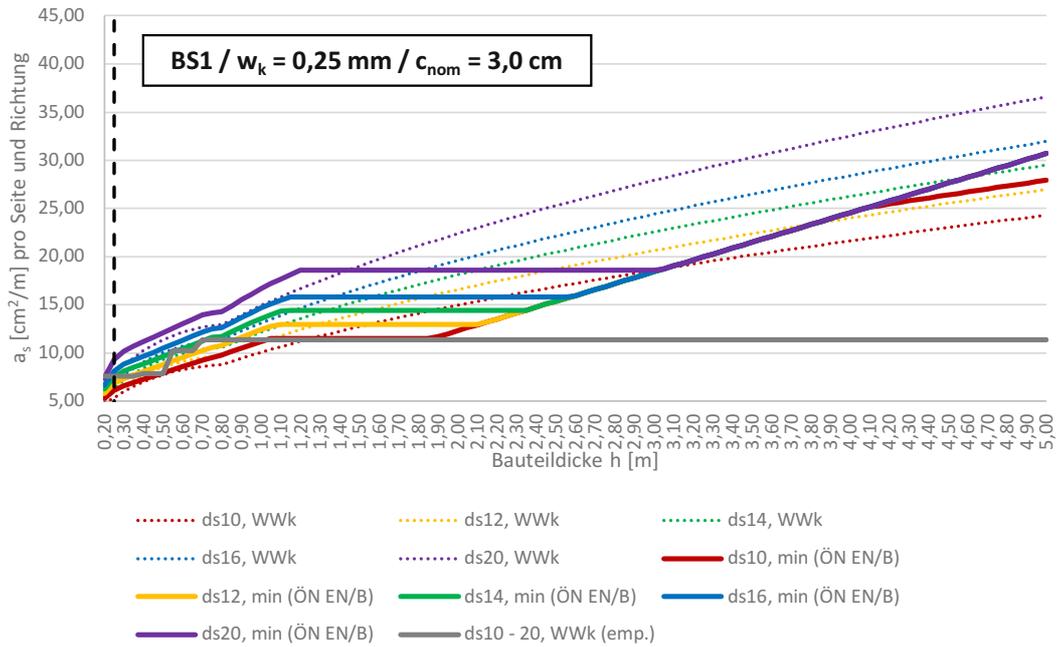
o_1 für $f_{ct,eff}$ [-]	o_3 für k [-]	o_4 für a_s (BS1+) [-]
0,50	0,80	0,85

Mindestbewehrung für überwiegende Zwangsbeanspruchung (Frührissbildung)
Rissbreite $w_k = 0,25$ mm, für Betondeckung $c = 3,0$ cm

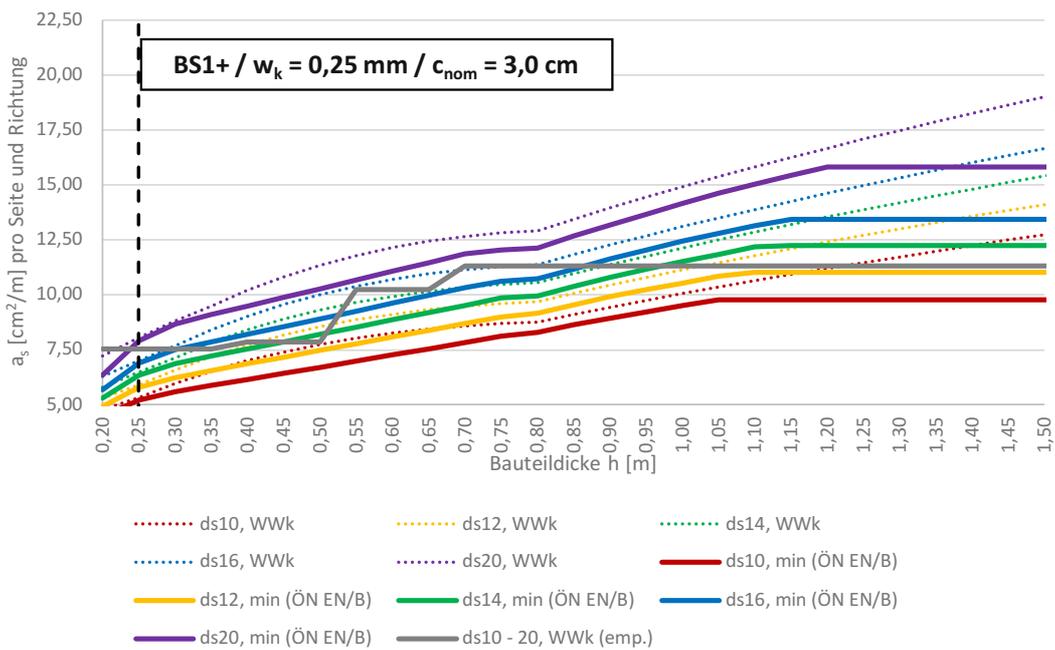
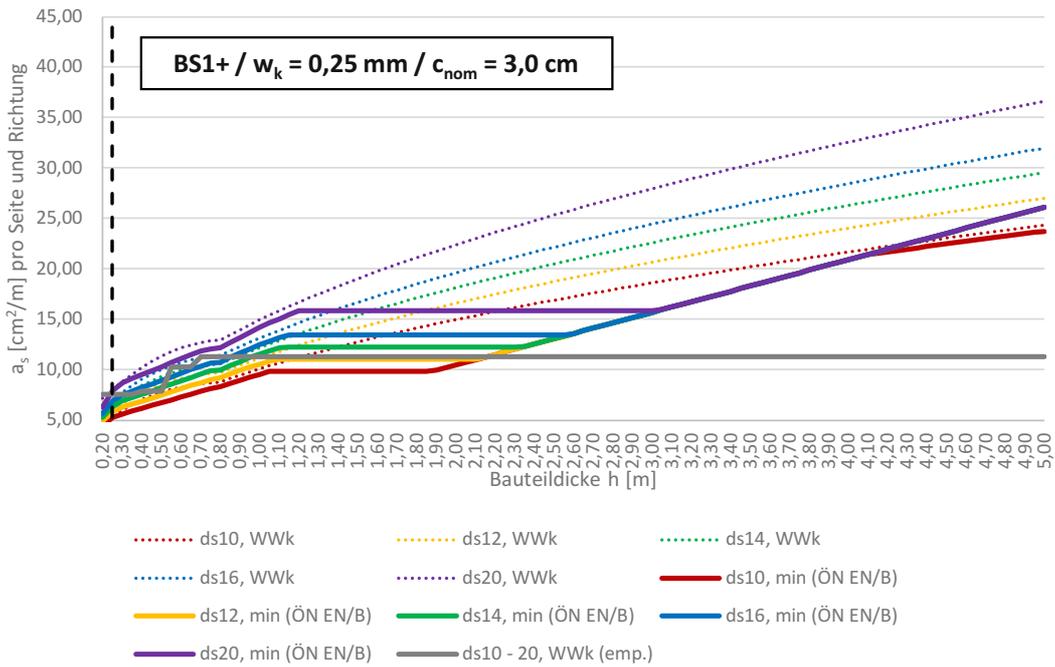


Darstellung nach [öbv-RL "Weiße Wanne" (2018); S. 17 - Abbildung 4-10]

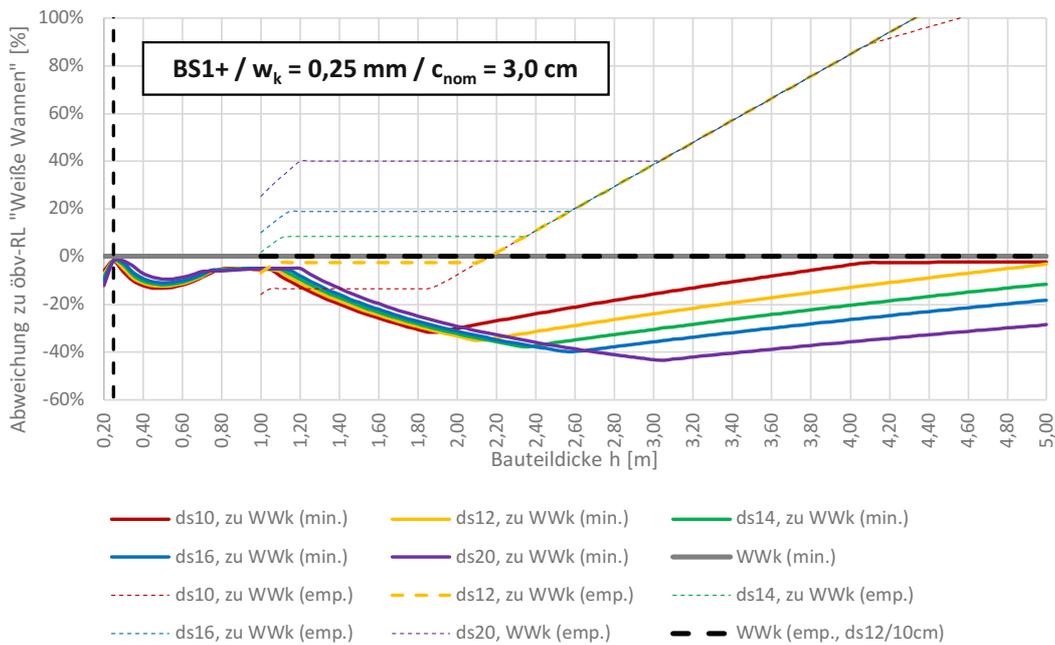
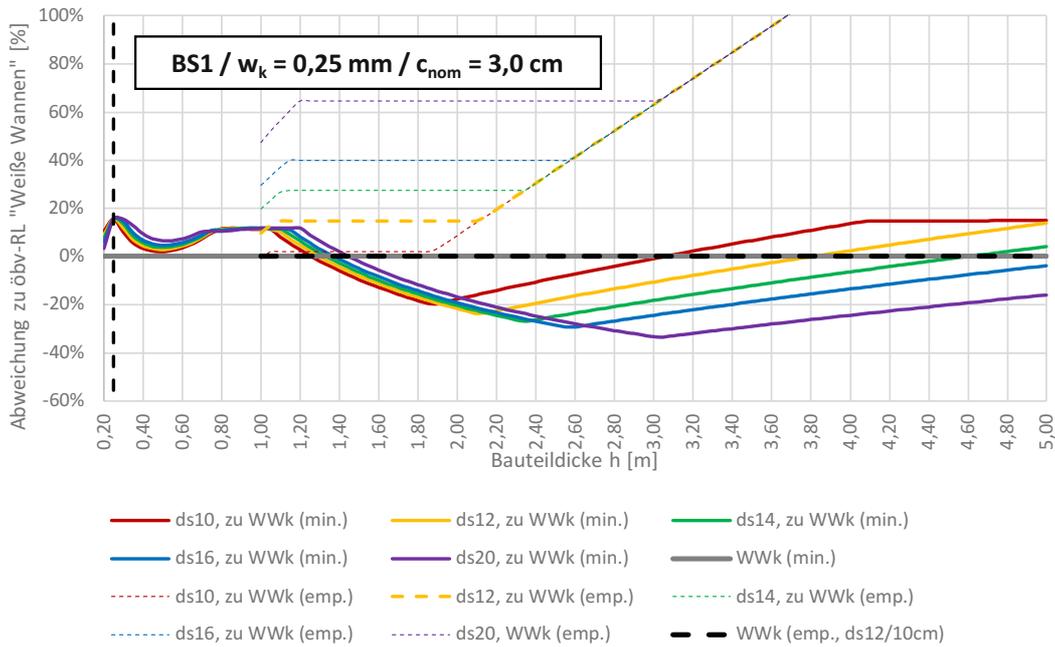
Vergleich der Mindestbewehrung für zentrischen Zwang (Frührissbildung) nach öbv-RL "Weiße Wannen" (Bemessungsmodell "Weiße Wanne klassisch") mit dem Rissbreitennachweis gemäß ÖNORM EN 1992-1-1:2015 und ÖNORM B 1992-1-1:2018



Vergleich der Mindestbewehrung für zentrischen Zwang (Frührissbildung) nach öbv-RL "Weiße Wannen" (Bemessungsmodell "Weiße Wanne klassisch") mit dem Rissbreitennachweis gemäß ÖNORM EN 1992-1-1:2015 und ÖNORM B 1992-1-1:2018



Vergleich der Mindestbewehrung für zentrischen Zwang (Frührissbildung) nach öbv-RL "Weiße Wannen" (Bemessungsmodell "Weiße Wanne klassisch") mit dem Rissbreitennachweis gemäß ÖNORM EN 1992-1-1:2015 und ÖNORM B 1992-1-1:2018



Vergleich der Mindestbewehrung für zentrischen Zwang (Frührissbildung) nach öbv-RL "Weiße Wannen" (Bemessungsmodell "Weiße Wanne klassisch") mit dem Rissbreitennachweis gemäß ÖNORM EN 1992-1-1:2015 und ÖNORM B 1992-1-1:2018

w_{zul} [mm]	c_{nom} [cm]	f_{ck} [N/mm ²]	f_{ctm} [N/mm ²]	E_{cm} [N/mm ²]	f_{yk} [N/mm ²]	E_s [N/mm ²]
0,25	4,00	25,00	2,60	31.476	550,00	200.000

RBNW / öbv-RL "Weiße Wannen" (Bemessungsmodell "Weiße Wanne klassisch") gemäß Angaben DI Alfred Moser

o_1 für $f_{ct,eff}$ [-]	o_2 für $E_{cm,eff}$ [-]	k_c [-]	o_3 für k [-]	k_t [-]	o_4 für a_s (BS1) [-]
0,30	0,30	1,00	1,00	0,60	1,00

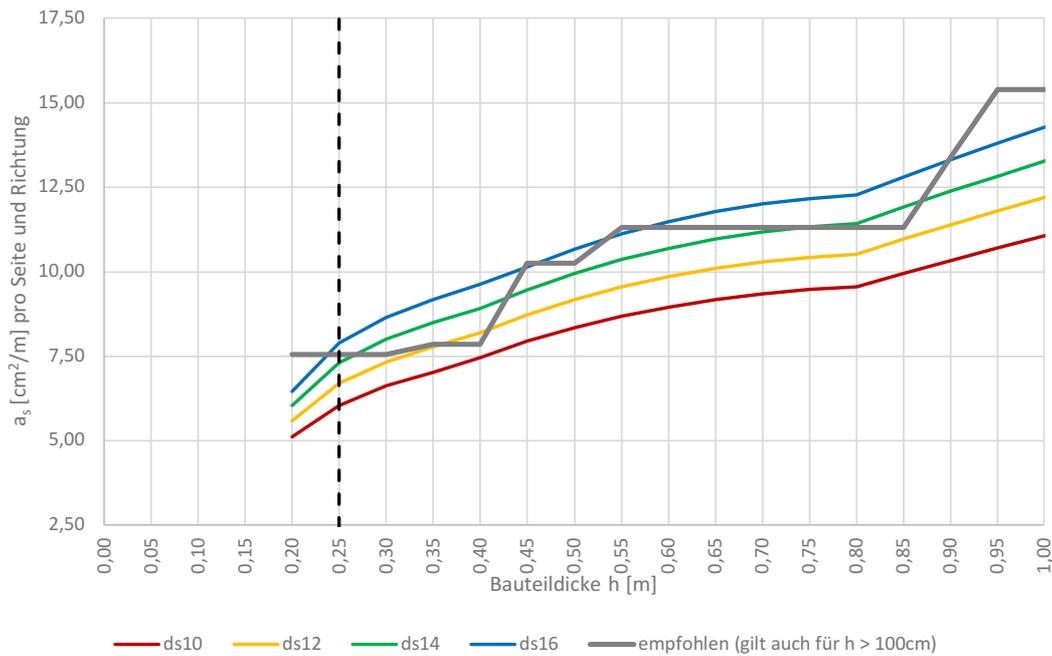
RBNW / ÖNORM EN 1992-1-1:2015 (Abs. 7.3.4) + ÖNORM 1992-1-1:2018 (Abs. 10.2.2)

o_1 für $f_{ct,eff}$ [-]	o_2 für $E_{cm,eff}$ [-]	k_c [-]	o_3 für k [-]	k_t [-]	o_4 für a_s (BS1+) [-]
0,50	0,50	1,00	0,80	0,60	0,85

RBNW / ÖNORM B 1992-1-1 (Abs. 10.2; Gl. (16))

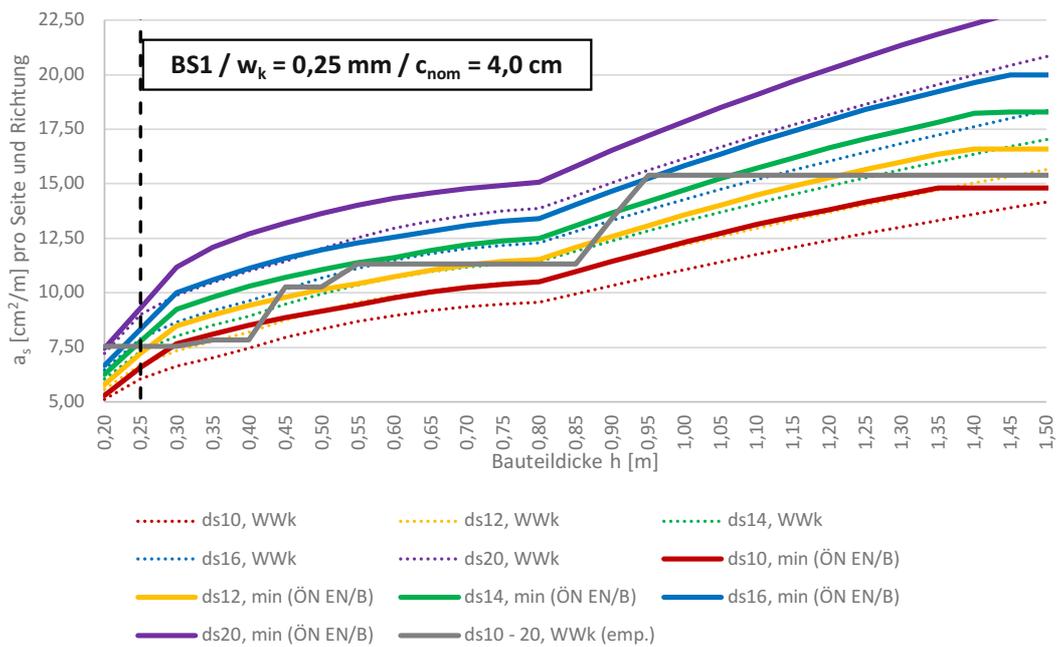
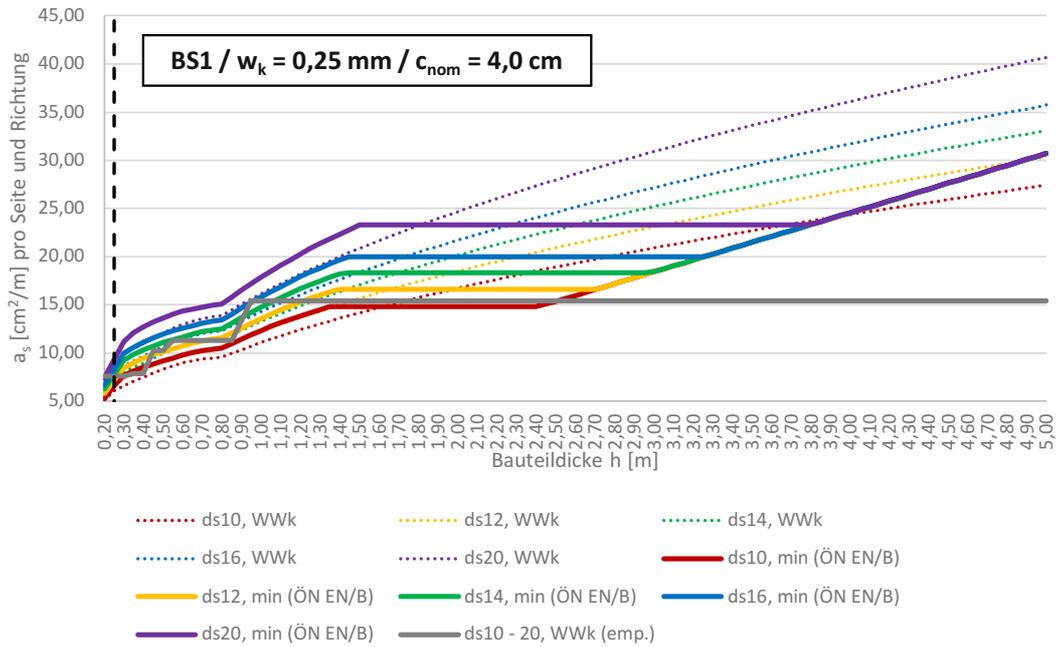
o_1 für $f_{ct,eff}$ [-]	o_3 für k [-]	o_4 für a_s (BS1+) [-]
0,50	0,80	0,85

Mindestbewehrung für überwiegende Zwangsbeanspruchung (Frührissbildung)
Rissbreite $w_k = 0,25$ mm, für Betondeckung $c = 4,0$ cm

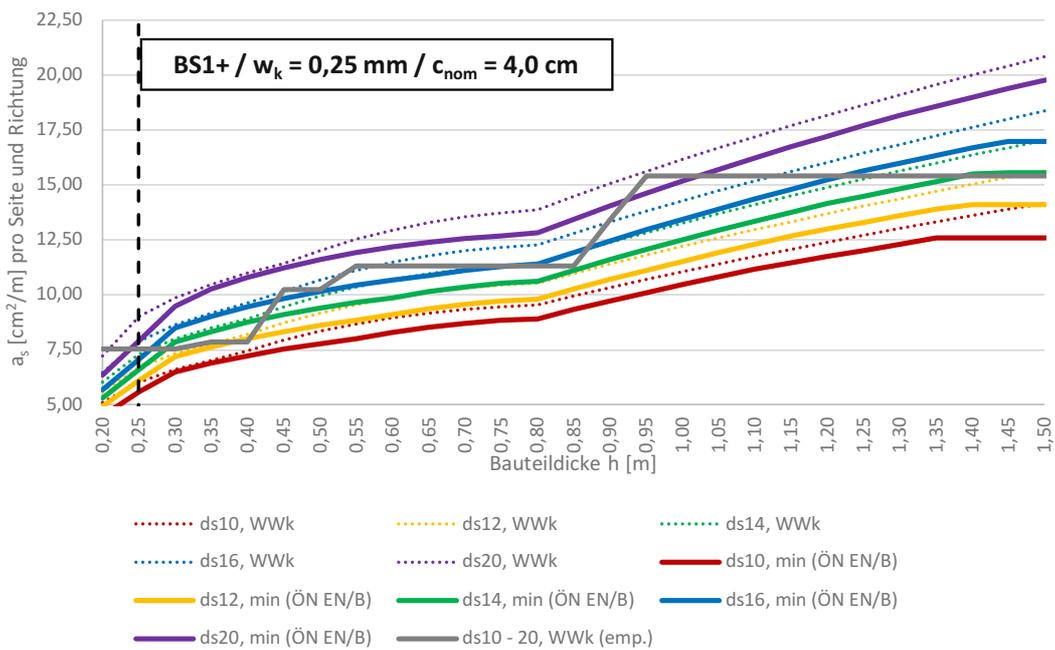
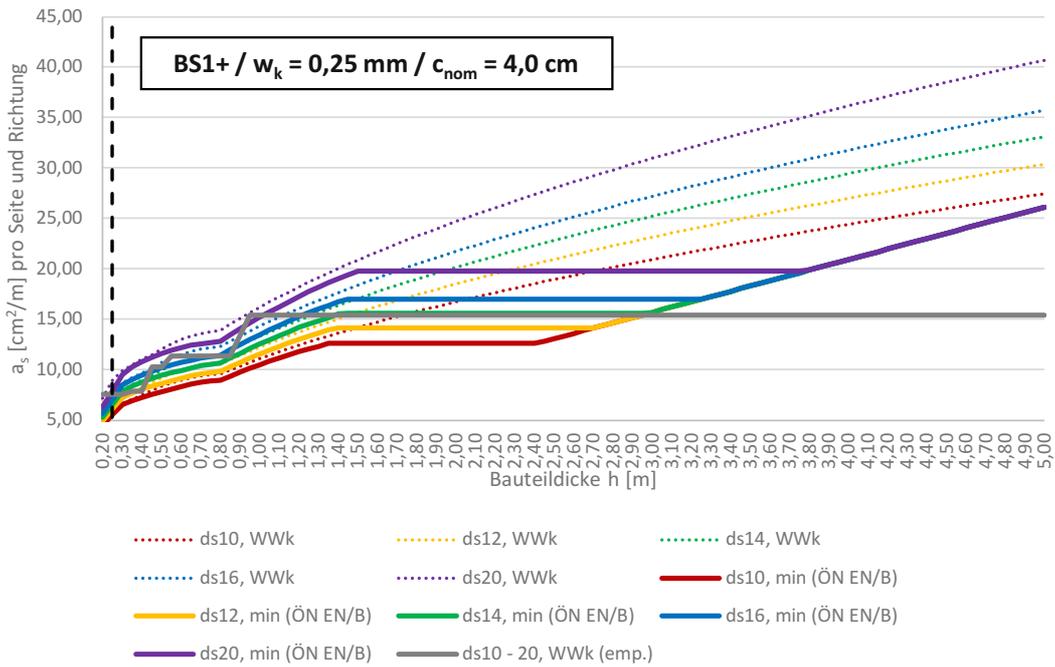


Darstellung nach [öbv-RL "Weiße Wannen" (2018); S. 16 - Abbildung 4-9]

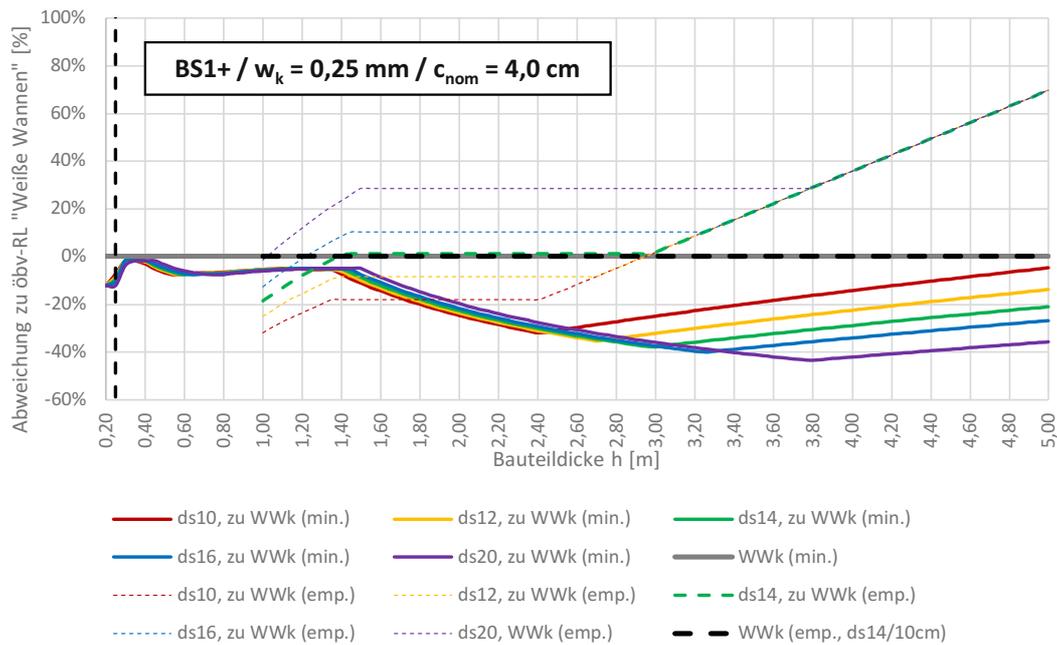
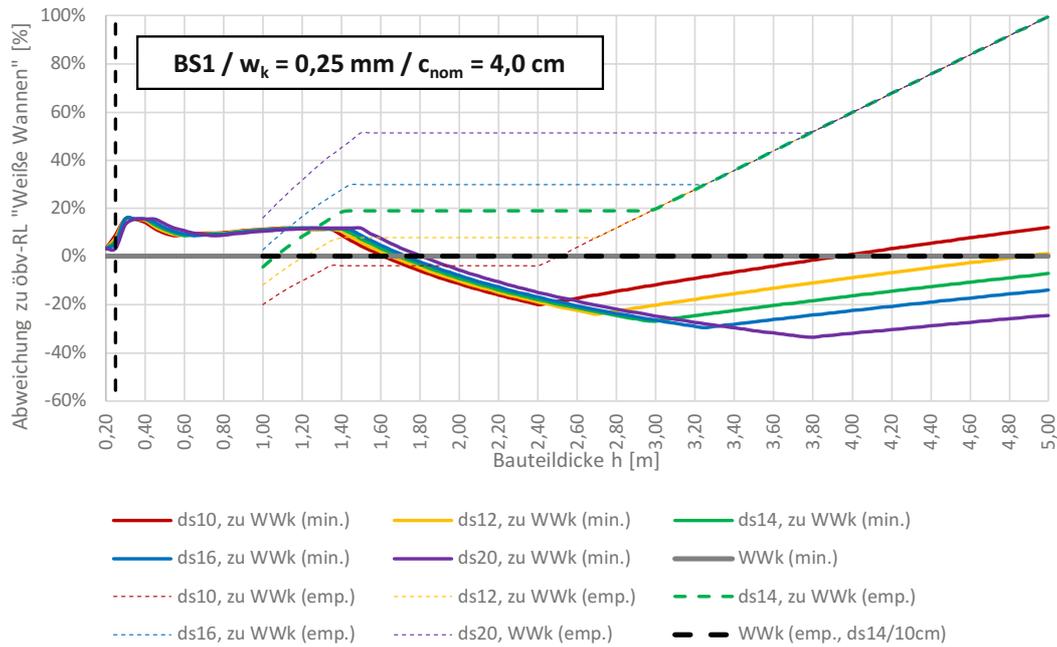
Vergleich der Mindestbewehrung für zentrischen Zwang (Frührissbildung) nach öbv-RL "Weiße Wannen" (Bemessungsmodell "Weiße Wanne klassisch") mit dem Rissbreitennachweis gemäß ÖNORM EN 1992-1-1:2015 und ÖNORM B 1992-1-1:2018



Vergleich der Mindestbewehrung für zentrischen Zwang (Frührisbildung) nach öbv-RL "Weiße Wannen" (Bemessungsmodell "Weiße Wanne klassisch") mit dem Rissbreitennachweis gemäß ÖNORM EN 1992-1-1:2015 und ÖNORM B 1992-1-1:2018



Vergleich der Mindestbewehrung für zentrischen Zwang (Frührissbildung) nach öbv-RL "Weiße Wannen" (Bemessungsmodell "Weiße Wanne klassisch") mit dem Rissbreitennachweis gemäß ÖNORM EN 1992-1-1:2015 und ÖNORM B 1992-1-1:2018



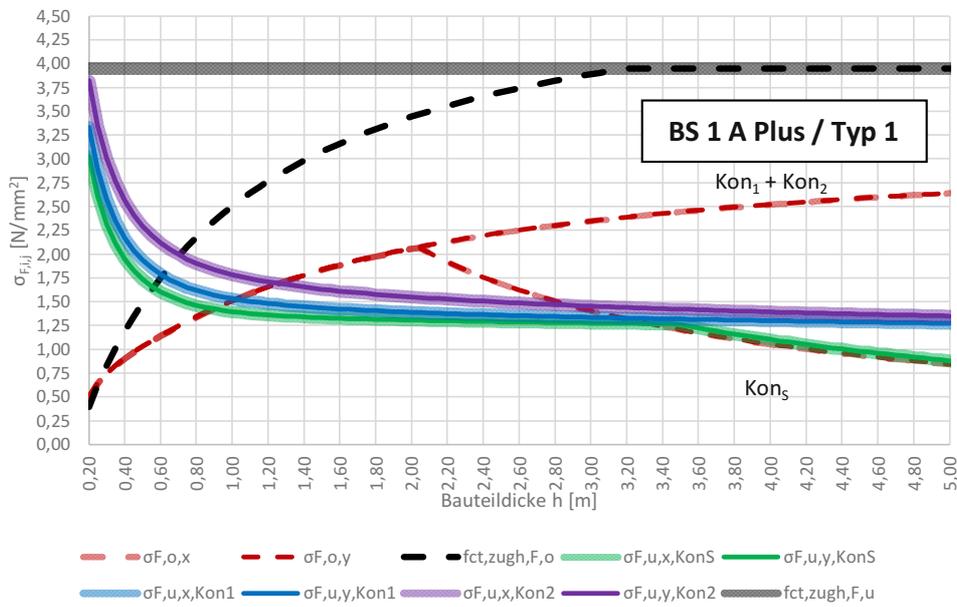
Anhang A.2

Gebrauchstauglichkeitsnachweis gemäß *öbv-MB „Weiße Wanne optimiert“* für den Betonstandard BS 1 A PLUS sowie BS 1 C PLUS mit Materialkennwerten gemäß Tabelle 4.2. [Vgl. *öbv-MB „Weiße Wanne optimiert“* (2018); S. 7 – Tabelle 3-1]

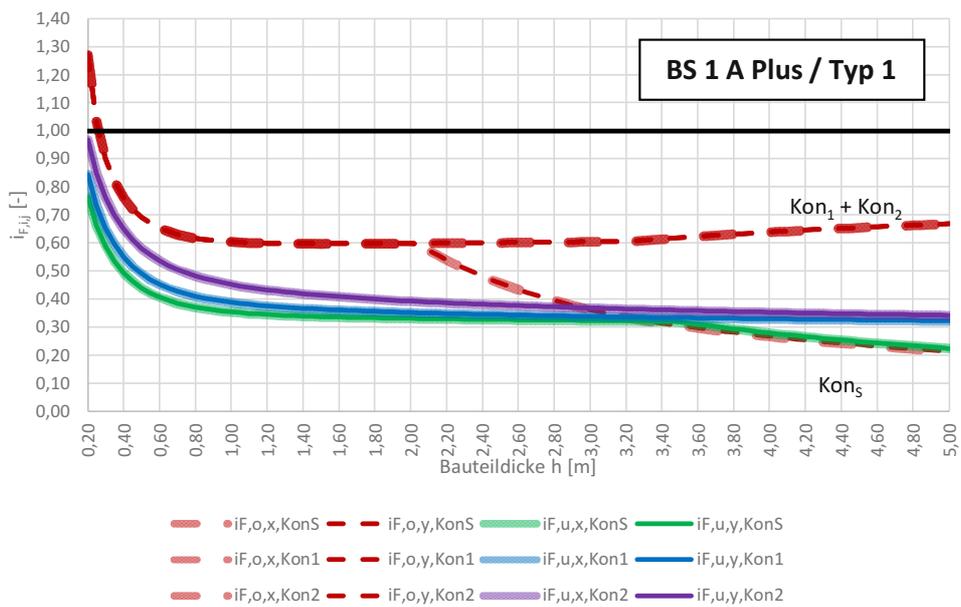
Gebrauchstauglichkeitsnachweis gemäß öbv-MB "Weiße Wanne optimiert"
für den Betonstandard BS 1 A Plus lt. öbv-MB "Weiße Wanne optimiert"; Tabelle 3-1

E_B	γ_c	f_{ck}	f_{ctm}	E_{cm}	Q_{max}	S_c	m_{BM}	α_T	NB
[N/mm ²]	[kN/m ³]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[J/g]	[kJ/(°Cm ³)]	[kg/m ³]	[1/K]	[36h/72h]
100,00	25,00	47,78	3,95	34.100,00	257,30	2.400,00	312,00	0,000010	72,00
		(ÖN, bezogen auf f_{ck} :	47,78	3,95	36.843,25)				
		(ÖN, bezogen auf f_{ctm} :	47,78	3,95	36.843,25)				
		(ÖN, bezogen auf E_{cm} :	35,10	3,22	34.100,00)				

$\Delta T_{Q,max}$	ΔT_{nom}	$\Delta T_{a,var}$	$L_{F,x}$	$L_{F,y}$	$L_{F,x,eff}$	$L_{F,y,eff}$	$A_{B,eff,x}$	$A_{B,eff,y}$	
[°C]	[°C]	[°C]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m ²]	[m ²]	
33,45	5,00	10,00	Kon_S:	15,00	15,00	7,50	7,50	105,00	105,00
			Kon₁:	30,00	30,00	15,00	15,00	420,00	420,00
			Kon₂:	60,00	60,00	30,00	30,00	1.680,00	1.680,00



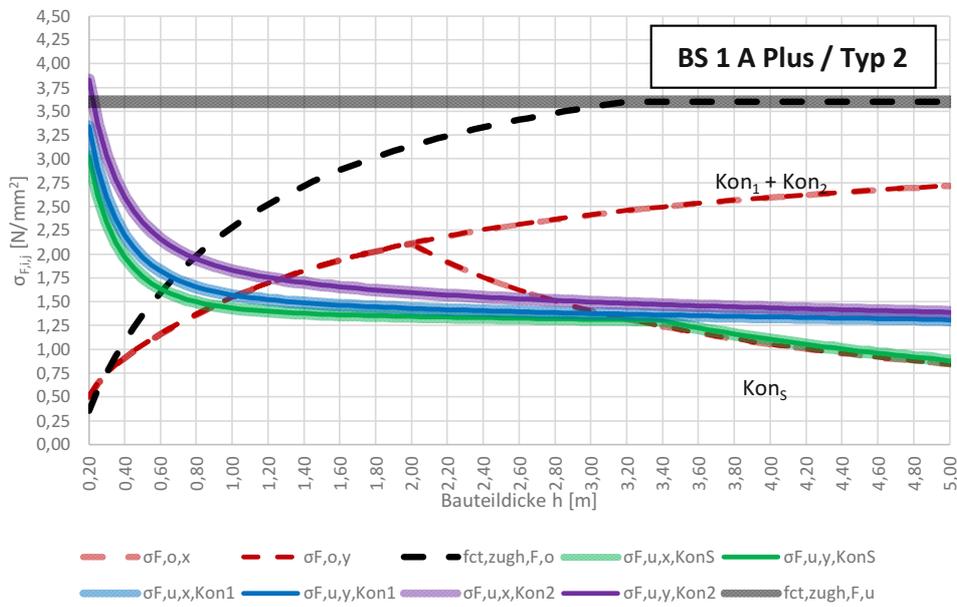
Gebrauchstauglichkeitsnachweis gemäß öbv-MB "Weiße Wanne optimiert"
 für den Betonstandard BS 1 A Plus lt. öbv-MB "Weiße Wanne optimiert"; Tabelle 3-1



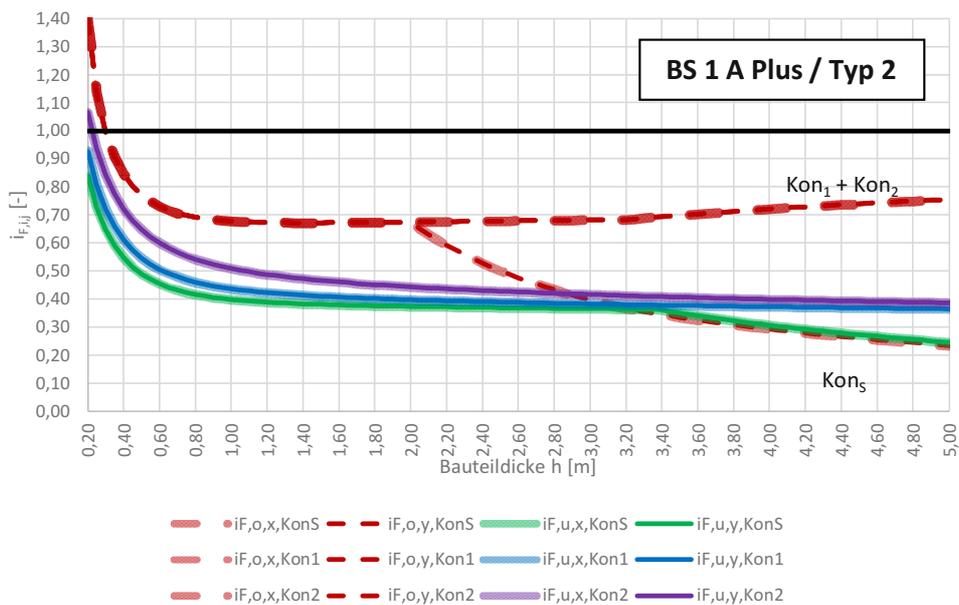
Gebrauchstauglichkeitsnachweis gemäß öbv-MB "Weiße Wanne optimiert"
für den Betonstandard BS 1 A Plus lt. öbv-MB "Weiße Wanne optimiert"; Tabelle 3-1

E_B	γ_c	f_{ck}	f_{ctm}	E_{cm}	Q_{max}	S_c	m_{BM}	α_T	NB
[N/mm ²]	[kN/m ³]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[J/g]	[kJ/(°Cm ³)]	[kg/m ³]	[1/K]	[36h/72h]
100,00	25,00	41,57	3,60	34.200,00	269,10	2.400,00	308,00	0,000010	72,00
		(ÖN, bezogen auf f_{ck} :	41,57	3,60	35.562,01)				
		(ÖN, bezogen auf f_{ctm} :	41,57	3,60	35.562,01)				
		(ÖN, bezogen auf E_{cm} :	35,52	3,24	34.200,00)				

$\Delta T_{Q,max}$	ΔT_{nom}	$\Delta T_{a,var}$	$L_{F,x}$	$L_{F,y}$	$L_{F,x,eff}$	$L_{F,y,eff}$	$A_{B,eff,x}$	$A_{B,eff,y}$	
[°C]	[°C]	[°C]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m ²]	[m ²]	
34,53	5,00	10,00	Kon_S:	15,00	15,00	7,50	7,50	105,00	105,00
			Kon₁:	30,00	30,00	15,00	15,00	420,00	420,00
			Kon₂:	60,00	60,00	30,00	30,00	1.680,00	1.680,00



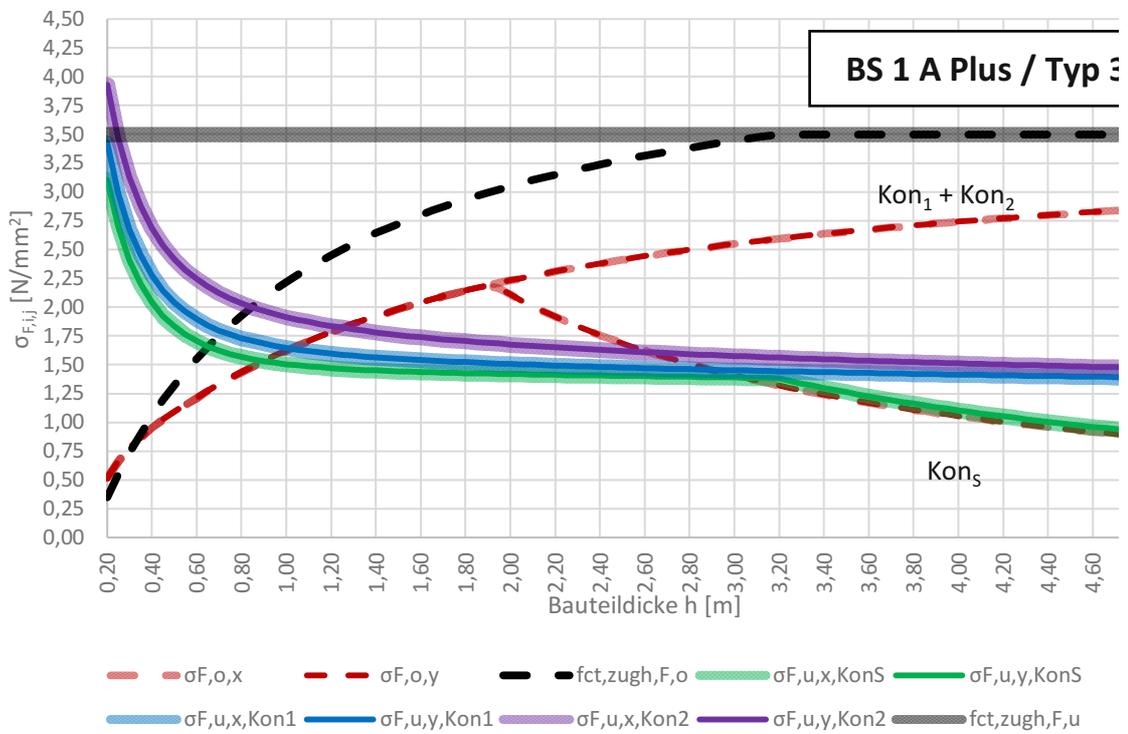
Gebrauchstauglichkeitsnachweis gemäß öbv-MB "Weiße Wanne optimiert"
 für den Betonstandard BS 1 A Plus lt. öbv-MB "Weiße Wanne optimiert"; Tabelle 3-1



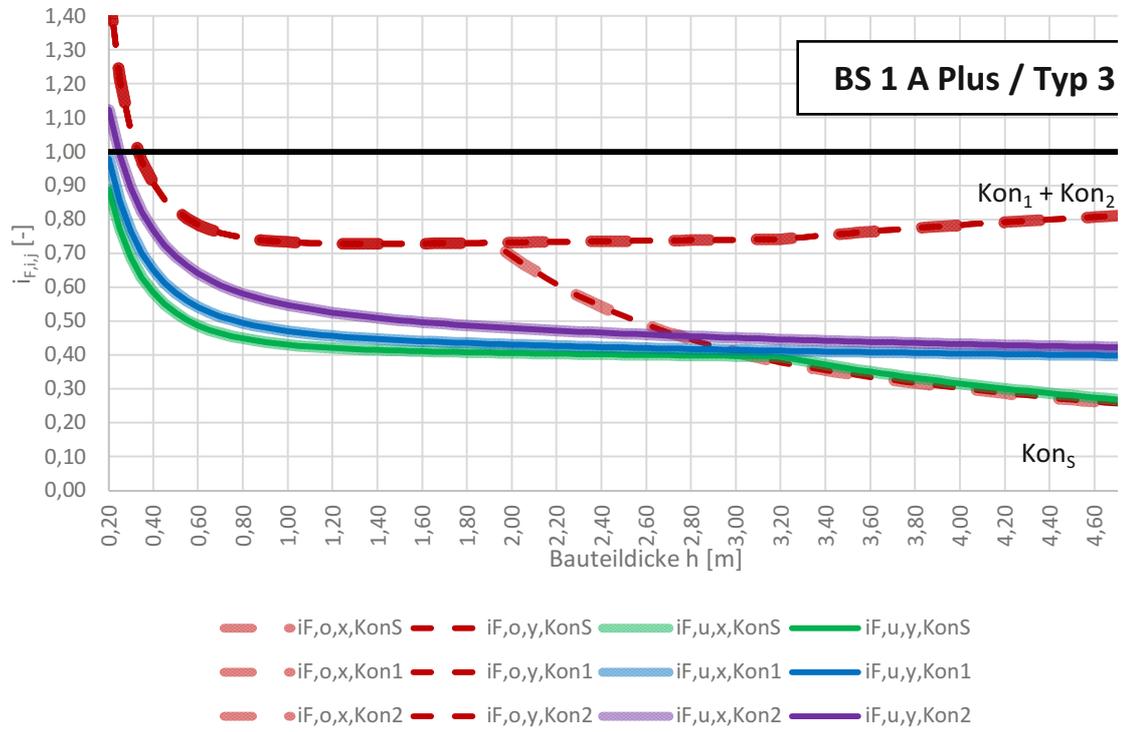
**Gebrauchstauglichkeitsnachweis gemäß öbv-MB "Weiße Wanne optimiert"
für den Betonstandard BS 1 A Plus lt. öbv-MB "Weiße Wanne optimiert"; Tabelle 3-1**

E_B	γ_c	f_{ck}	f_{ctm}	E_{cm}	Q_{max}	S_c	m_{BM}	α_T
[N/mm ²]	[kN/m ³]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[J/g]	[kJ/(°Cm ³)]	[kg/m ³]	[1/K]
100,00	25,00	39,85	3,50	35.300,00	269,90	2.400,00	316,00	0,000010
(ÖN, bezogen auf f_{ck} :		39,85	3,50	35.187,24)				
(ÖN, bezogen auf f_{ctm} :		39,85	3,50	35.187,24)				
(ÖN, bezogen auf E_{cm} :		40,36	3,53	35.300,00)				

$\Delta T_{Q,max}$	ΔT_{nom}	$\Delta T_{a,var}$	$L_{F,x}$	$L_{F,y}$	$L_{F,x,eff}$	$L_{F,y,eff}$	$A_{B,eff,x}$	
[°C]	[°C]	[°C]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m ²]	
35,54	5,00	10,00	Kon_S:	15,00	15,00	7,50	7,50	105,00
			Kon₁:	30,00	30,00	15,00	15,00	420,00
			Kon₂:	60,00	60,00	30,00	30,00	1.680,00



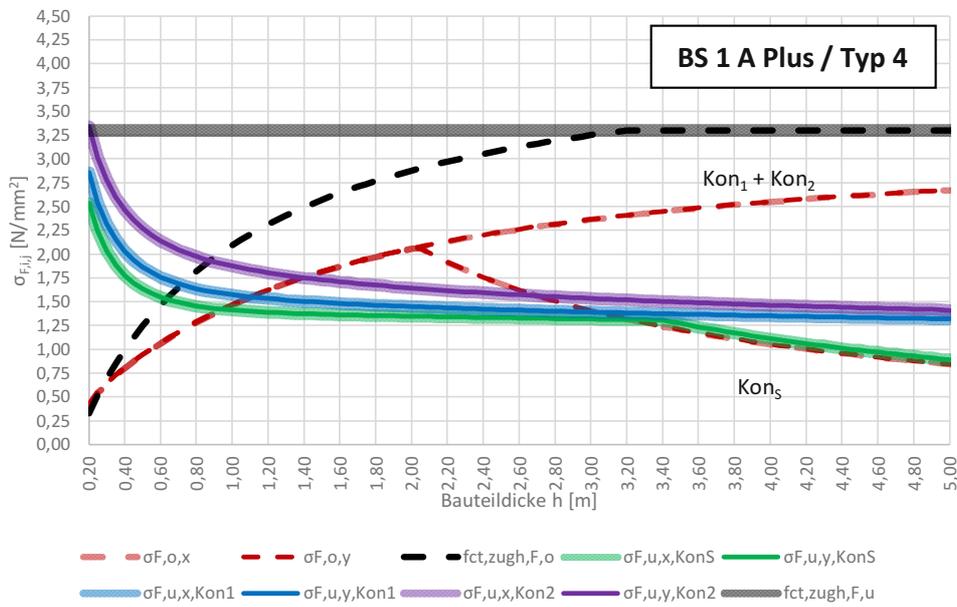
Gebrauchstauglichkeitsnachweis gemäß öbv-MB "Weiße Wanne optimiert"
für den Betonstandard BS 1 A Plus lt. öbv-MB "Weiße Wanne optimiert"; Tabelle 3-1



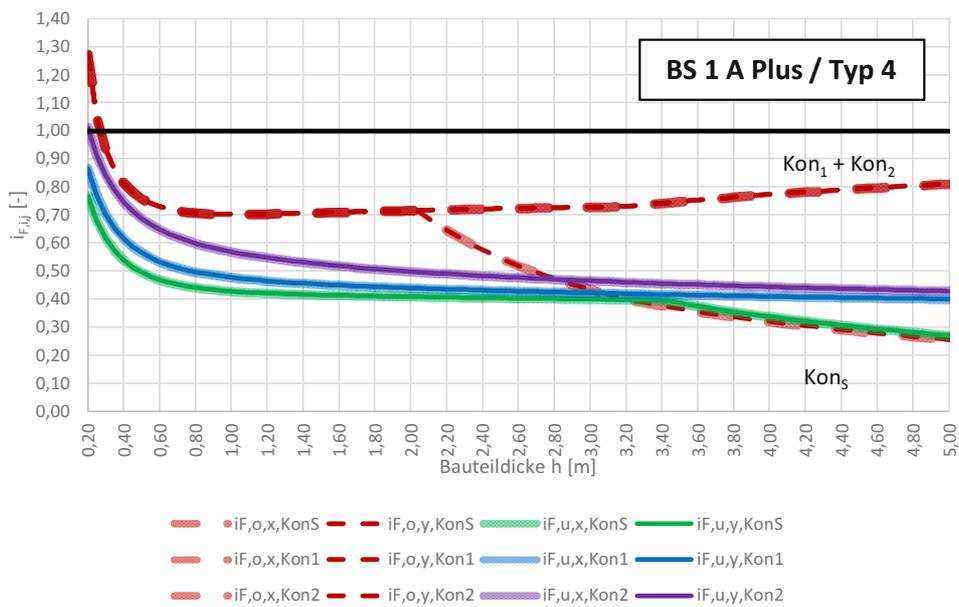
Gebrauchstauglichkeitsnachweis gemäß öbv-MB "Weiße Wanne optimiert"
für den Betonstandard BS 1 A Plus lt. öbv-MB "Weiße Wanne optimiert"; Tabelle 3-1

E_B	γ_c	f_{ck}	f_{ctm}	E_{cm}	Q_{max}	S_c	m_{BM}	α_T	NB
[N/mm ²]	[kN/m ³]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[J/g]	[kJ/(°Cm ³)]	[kg/m ³]	[1/K]	[36h/72h]
100,00	25,00	36,48	3,30	28.300,00	288,70	2.400,00	354,00	0,000010	72,00
		(ÖN, bezogen auf f_{ck} :	36,48	3,30	34.425,52)				
		(ÖN, bezogen auf f_{ctm} :	36,48	3,30	34.425,52)				
		(ÖN, bezogen auf E_{cm} :	15,15	1,84	28.300,00)				

$\Delta T_{Q,max}$	ΔT_{nom}	$\Delta T_{a,var}$	$L_{F,x}$	$L_{F,y}$	$L_{F,x,eff}$	$L_{F,y,eff}$	$A_{B,eff,x}$	$A_{B,eff,y}$	
[°C]	[°C]	[°C]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m ²]	[m ²]	
42,58	5,00	10,00	Kon_S:	15,00	15,00	7,50	7,50	105,00	105,00
			Kon₁:	30,00	30,00	15,00	15,00	420,00	420,00
			Kon₂:	60,00	60,00	30,00	30,00	1.680,00	1.680,00



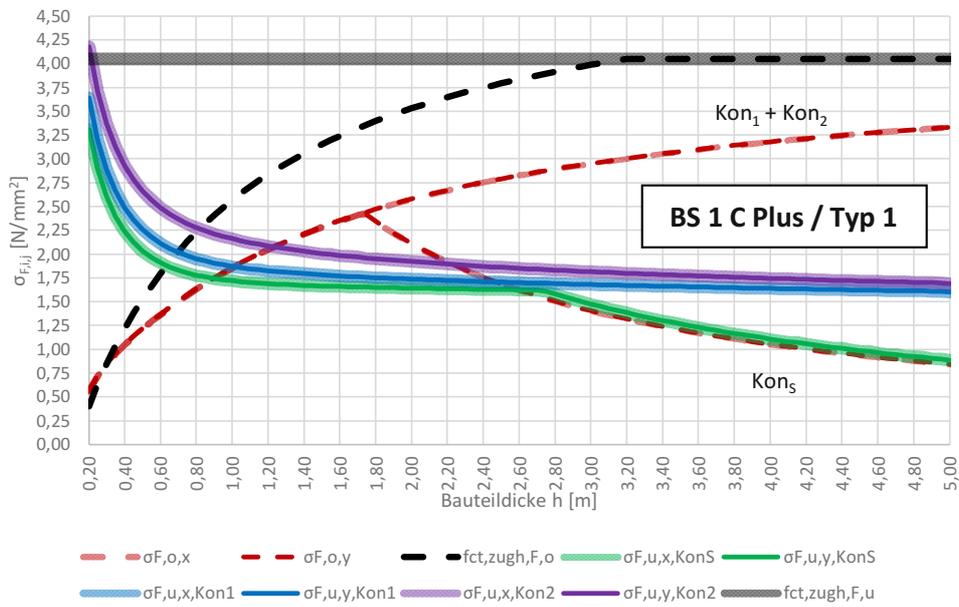
Gebrauchstauglichkeitsnachweis gemäß öbv-MB "Weiße Wanne optimiert"
 für den Betonstandard BS 1 A Plus lt. öbv-MB "Weiße Wanne optimiert"; Tabelle 3-1



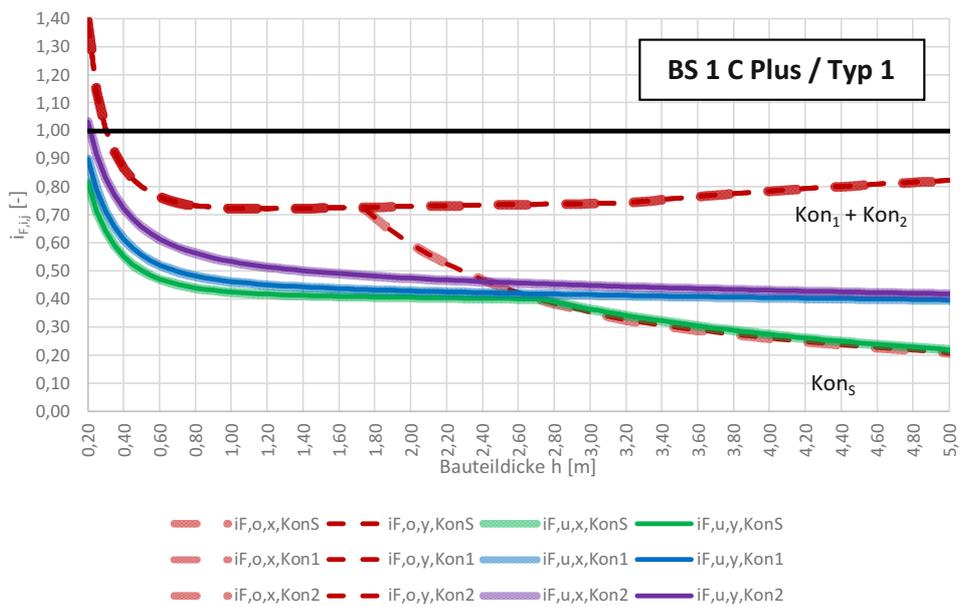
Gebrauchstauglichkeitsnachweis gemäß öbv-MB "Weiße Wanne optimiert"
für den Betonstandard BS 1 C Plus lt. öbv-MB "Weiße Wannen optimiert"; Tabelle 3-1

E_B	γ_c	f_{ck}	f_{ctm}	E_{cm}	Q_{max}	S_c	m_{BM}	α_T	NB
[N/mm ²]	[kN/m ³]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[J/g]	[kJ/(°Cm ³)]	[kg/m ³]	[1/K]	[36h/72h]
100,00	25,00	49,60	4,05	38.100,00	257,30	2.400,00	362,00	0,000010	72,00
	(ÖN, bezogen auf f_{ck} :	49,60	4,05	37.200,98)					
	(ÖN, bezogen auf f_{ctm} :	49,60	4,05	37.200,98)					
	(ÖN, bezogen auf E_{cm} :	54,37	4,31	38.100,00)					

$\Delta T_{Q,max}$	ΔT_{nom}	$\Delta T_{a,var}$	$L_{F,x}$	$L_{F,y}$	$L_{F,x,eff}$	$L_{F,y,eff}$	$A_{B,eff,x}$	$A_{B,eff,y}$	
[°C]	[°C]	[°C]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m ²]	[m ²]	
38,81	5,00	10,00	Kon_S:	15,00	15,00	7,50	7,50	105,00	105,00
			Kon₁:	30,00	30,00	15,00	15,00	420,00	420,00
			Kon₂:	60,00	60,00	30,00	30,00	1.680,00	1.680,00



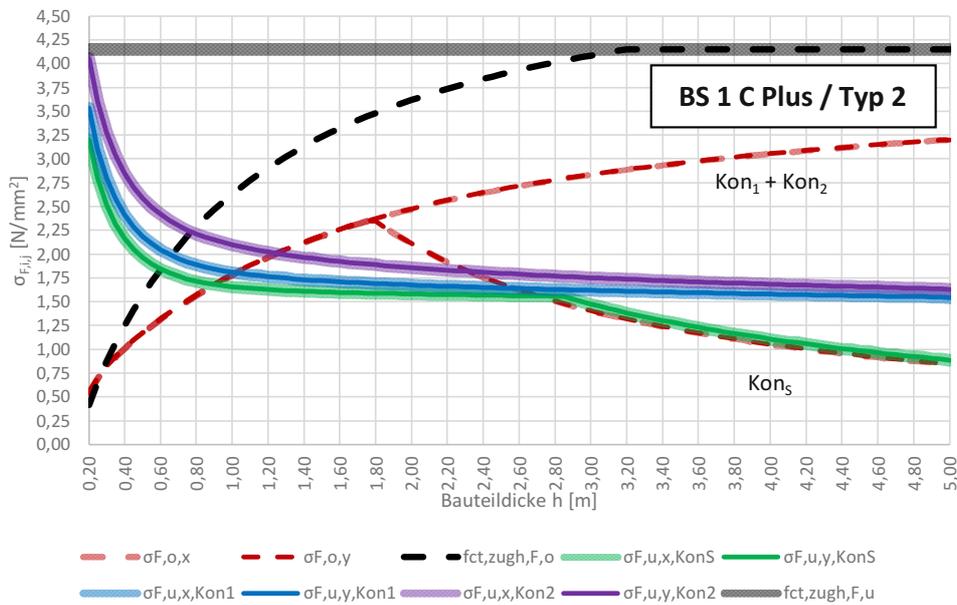
Gebrauchstauglichkeitsnachweis gemäß öbv-MB "Weiße Wanne optimiert"
 für den Betonstandard BS 1 C Plus lt. öbv-MB "Weiße Wannen optimiert"; Tabelle 3-1



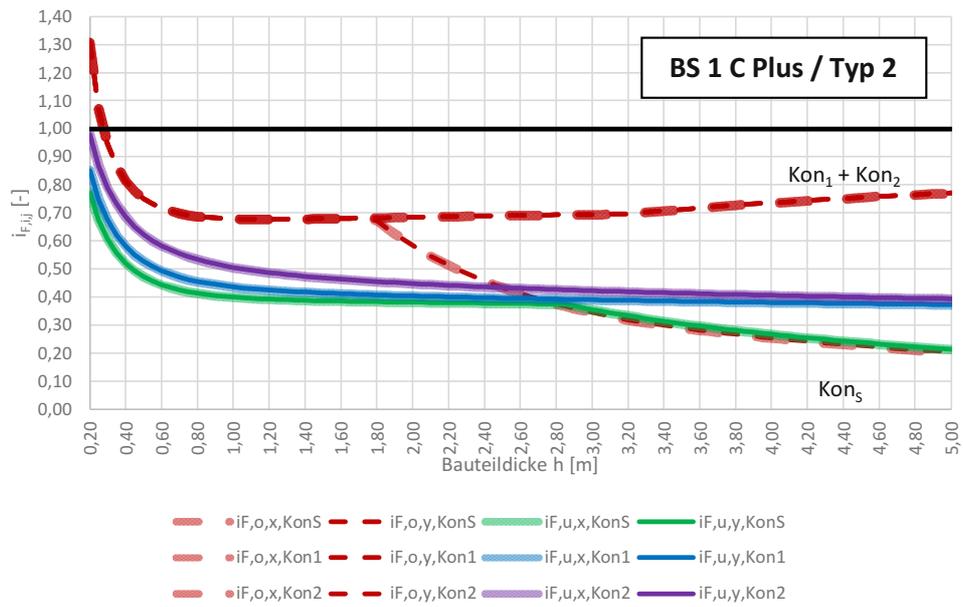
Gebrauchstauglichkeitsnachweis gemäß öbv-MB "Weiße Wanne optimiert"
für den Betonstandard BS 1 C Plus lt. öbv-MB "Weiße Wannen optimiert"; Tabelle 3-1

E_B	γ_c	f_{ck}	f_{ctm}	E_{cm}	Q_{max}	S_c	m_{BM}	α_T	NB
[N/mm ²]	[kN/m ³]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[J/g]	[kJ/(°Cm ³)]	[kg/m ³]	[1/K]	[36h/72h]
100,00	25,00	51,45	4,15	36.700,00	269,10	2.400,00	345,00	0,000010	72,00
		(ÖN, bezogen auf f_{ck} :	51,45	4,15	37.555,15)				
		(ÖN, bezogen auf f_{ctm} :	51,45	4,15	37.555,15)				
		(ÖN, bezogen auf E_{cm} :	47,06	3,91	36.700,00)				

$\Delta T_{Q,max}$	ΔT_{nom}	$\Delta T_{a,var}$	$L_{F,x}$	$L_{F,y}$	$L_{F,x,eff}$	$L_{F,y,eff}$	$A_{B,eff,x}$	$A_{B,eff,y}$	
[°C]	[°C]	[°C]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m ²]	[m ²]	
38,68	5,00	10,00	Kon_S:	15,00	15,00	7,50	7,50	105,00	105,00
			Kon₁:	30,00	30,00	15,00	15,00	420,00	420,00
			Kon₂:	60,00	60,00	30,00	30,00	1.680,00	1.680,00



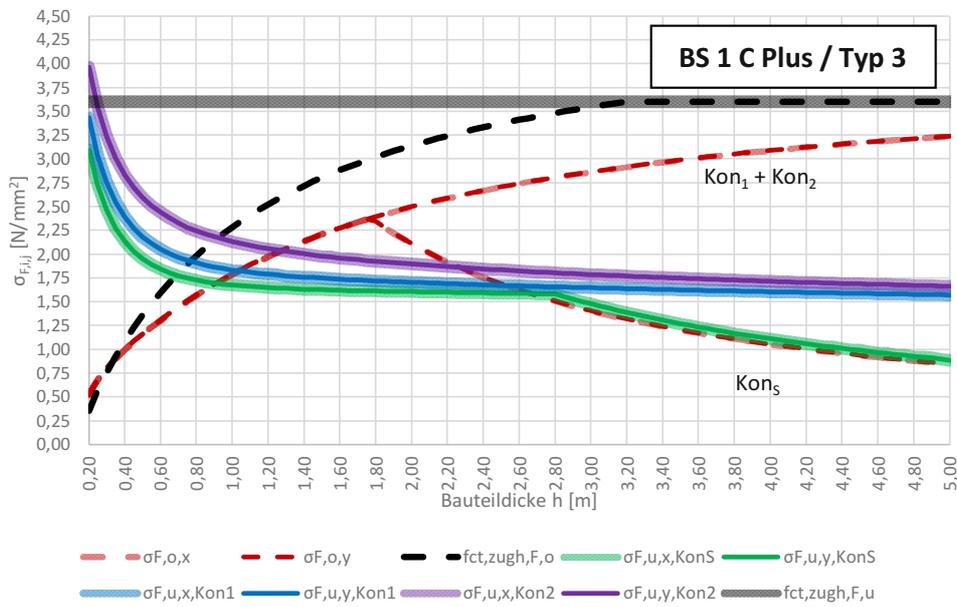
Gebrauchstauglichkeitsnachweis gemäß öbv-MB "Weiße Wanne optimiert"
 für den Betonstandard BS 1 C Plus lt. öbv-MB "Weiße Wannen optimiert"; Tabelle 3-1



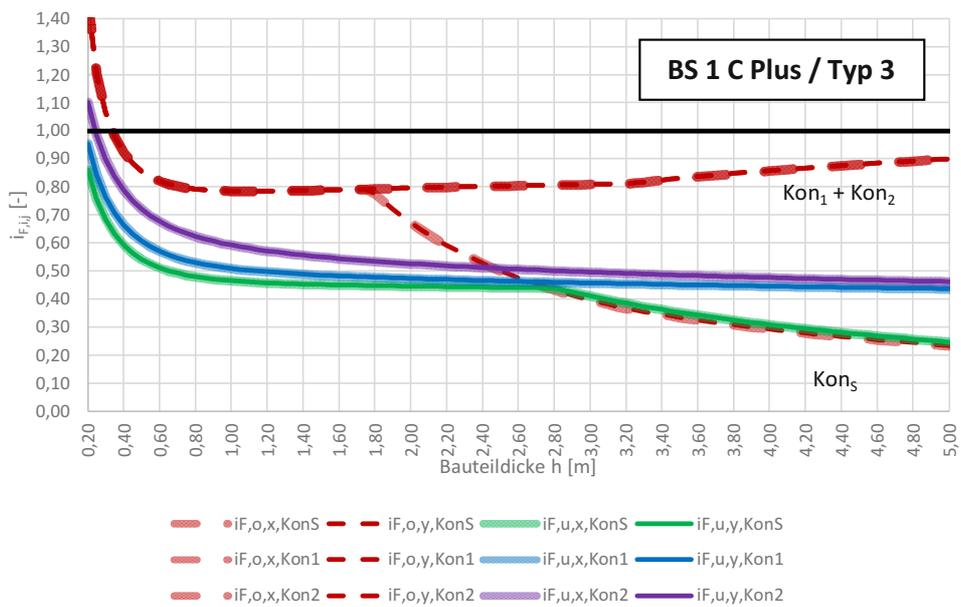
Gebrauchstauglichkeitsnachweis gemäß öbv-MB "Weiße Wanne optimiert"
für den Betonstandard BS 1 C Plus lt. öbv-MB "Weiße Wannen optimiert"; Tabelle 3-1

E_B	γ_c	f_{ck}	f_{ctm}	E_{cm}	Q_{max}	S_c	m_{BM}	α_T	NB
[N/mm ²]	[kN/m ³]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[J/g]	[kJ/(°Cm ³)]	[kg/m ³]	[1/K]	[36h/72h]
100,00	25,00	41,57	3,60	35.500,00	269,90	2.400,00	363,00	0,000010	72,00
		(ÖN, bezogen auf f_{ck} :	41,57	3,60	35.562,01)				
		(ÖN, bezogen auf f_{ctm} :	41,57	3,60	35.562,01)				
		(ÖN, bezogen auf E_{cm} :	41,28	3,58	35.500,00)				

$\Delta T_{Q,max}$	ΔT_{nom}	$\Delta T_{a,var}$	$L_{F,x}$	$L_{F,y}$	$L_{F,x,eff}$	$L_{F,y,eff}$	$A_{B,eff,x}$	$A_{B,eff,y}$	
[°C]	[°C]	[°C]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m ²]	[m ²]	
40,82	5,00	10,00	Kon_S:	15,00	15,00	7,50	7,50	105,00	105,00
			Kon₁:	30,00	30,00	15,00	15,00	420,00	420,00
			Kon₂:	60,00	60,00	30,00	30,00	1.680,00	1.680,00



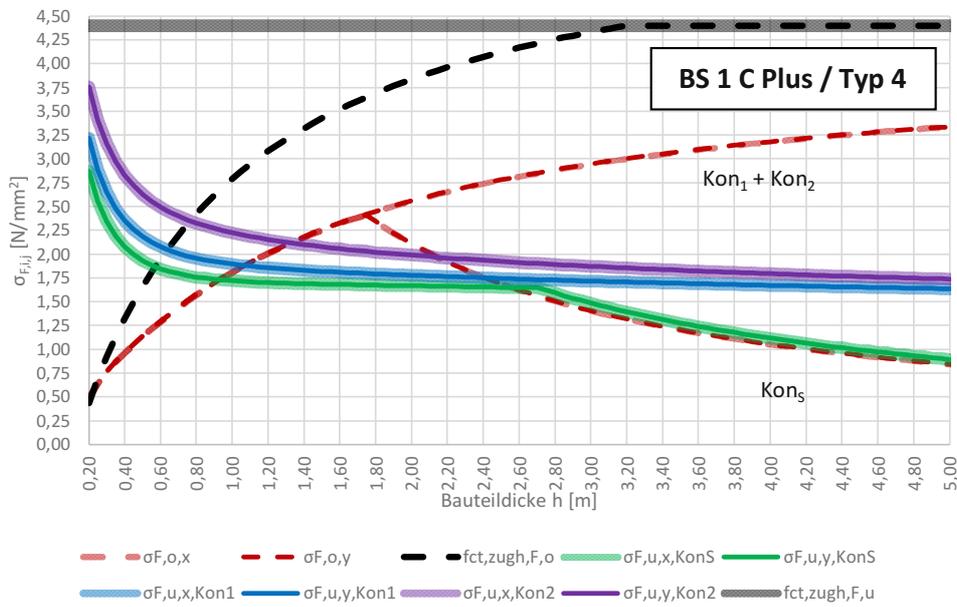
Gebrauchstauglichkeitsnachweis gemäß öbv-MB "Weiße Wanne optimiert"
 für den Betonstandard BS 1 C Plus lt. öbv-MB "Weiße Wannen optimiert"; Tabelle 3-1



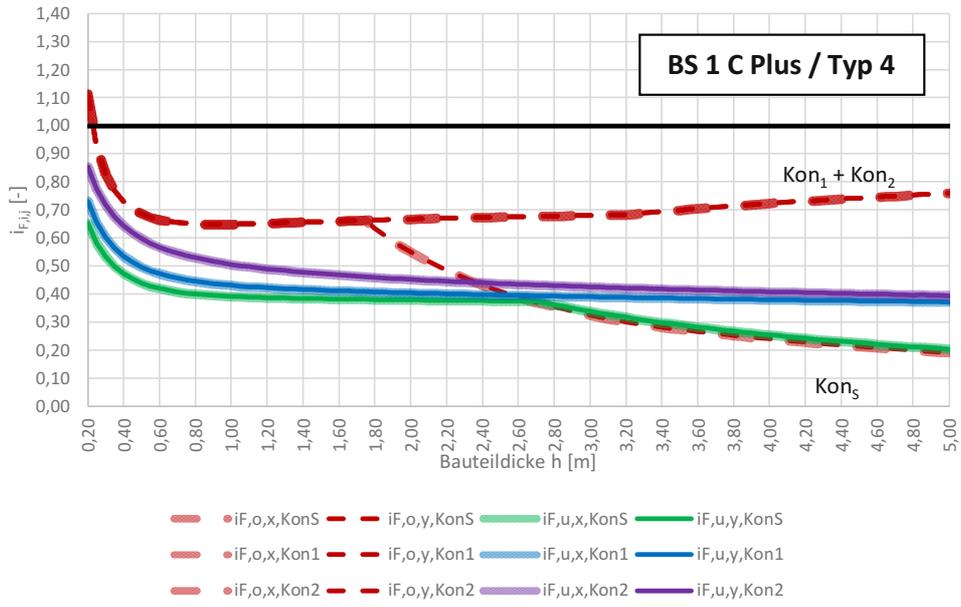
Gebrauchstauglichkeitsnachweis gemäß öbv-MB "Weiße Wanne optimiert"
für den Betonstandard BS 1 C Plus lt. öbv-MB "Weiße Wannen optimiert"; Tabelle 3-1

E_B	γ_c	f_{ck}	f_{ctm}	E_{cm}	Q_{max}	S_c	m_{BM}	α_T	NB
[N/mm ²]	[kN/m ³]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[J/g]	[kJ/(°Cm ³)]	[kg/m ³]	[1/K]	[36h/72h]
100,00	25,00	56,17	4,40	32.900,00	288,70	2.400,00	385,00	0,000010	72,00
		(ÖN, bezogen auf f_{ck} :	56,17	4,40	38.425,58)				
		(ÖN, bezogen auf f_{ctm} :	56,17	4,40	38.425,58)				
		(ÖN, bezogen auf E_{cm} :	30,25	2,91	32.900,00)				

$\Delta T_{Q,max}$	ΔT_{nom}	$\Delta T_{a,var}$	$L_{F,x}$	$L_{F,y}$	$L_{F,x,eff}$	$L_{F,y,eff}$	$A_{B,eff,x}$	$A_{B,eff,y}$	
[°C]	[°C]	[°C]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m ²]	[m ²]	
46,31	5,00	10,00	Kon_S:	15,00	15,00	7,50	7,50	105,00	105,00
			Kon₁:	30,00	30,00	15,00	15,00	420,00	420,00
			Kon₂:	60,00	60,00	30,00	30,00	1.680,00	1.680,00



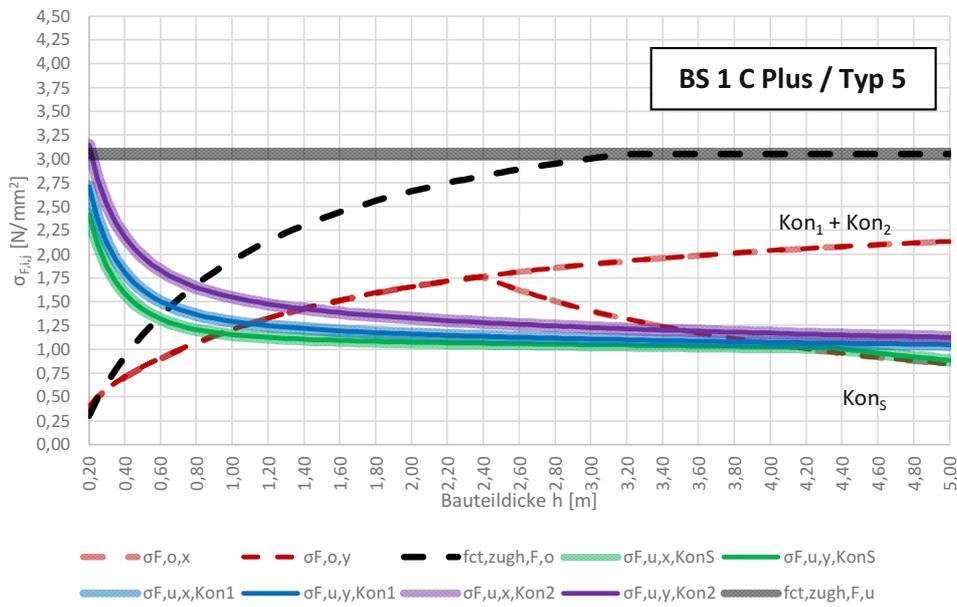
Gebrauchstauglichkeitsnachweis gemäß öbv-MB "Weiße Wanne optimiert"
 für den Betonstandard BS 1 C Plus lt. öbv-MB "Weiße Wannen optimiert"; Tabelle 3-1



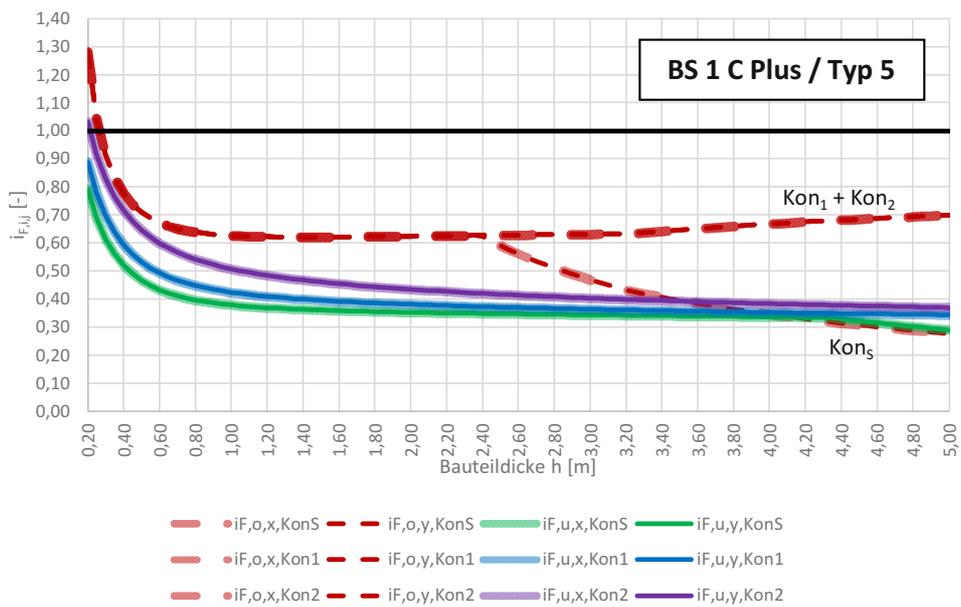
Gebrauchstauglichkeitsnachweis gemäß öbv-MB "Weiße Wanne optimiert"
für den Betonstandard BS 1 C Plus lt. öbv-MB "Weiße Wannen optimiert"; Tabelle 3-1

E_B	γ_c	f_{ck}	f_{ctm}	E_{cm}	Q_{max}	S_c	m_{BM}	α_T	NB
[N/mm ²]	[kN/m ³]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[J/g]	[kJ/(°Cm ³)]	[kg/m ³]	[1/K]	[36h/72h]
100,00	25,00	32,42	3,05	26.500,00	255,00	2.400,00	330,00	0,000010	72,00
		(ÖN, bezogen auf f_{ck} :	32,42	3,05	33.449,58)				
		(ÖN, bezogen auf f_{ctm} :	32,42	3,05	33.449,58)				
		(ÖN, bezogen auf E_{cm} :	10,60	1,45	26.500,00)				

$\Delta T_{Q,max}$	ΔT_{nom}	$\Delta T_{a,var}$	$L_{F,x}$	$L_{F,y}$	$L_{F,x,eff}$	$L_{F,y,eff}$	$A_{B,eff,x}$	$A_{B,eff,y}$	
[°C]	[°C]	[°C]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m ²]	[m ²]	
35,06	5,00	10,00	Kon_S:	15,00	15,00	7,50	7,50	105,00	105,00
			Kon₁:	30,00	30,00	15,00	15,00	420,00	420,00
			Kon₂:	60,00	60,00	30,00	30,00	1.680,00	1.680,00



Gebrauchstauglichkeitsnachweis gemäß öbv-MB "Weiße Wanne optimiert"
 für den Betonstandard BS 1 C Plus lt. öbv-MB "Weiße Wannen optimiert"; Tabelle 3-1



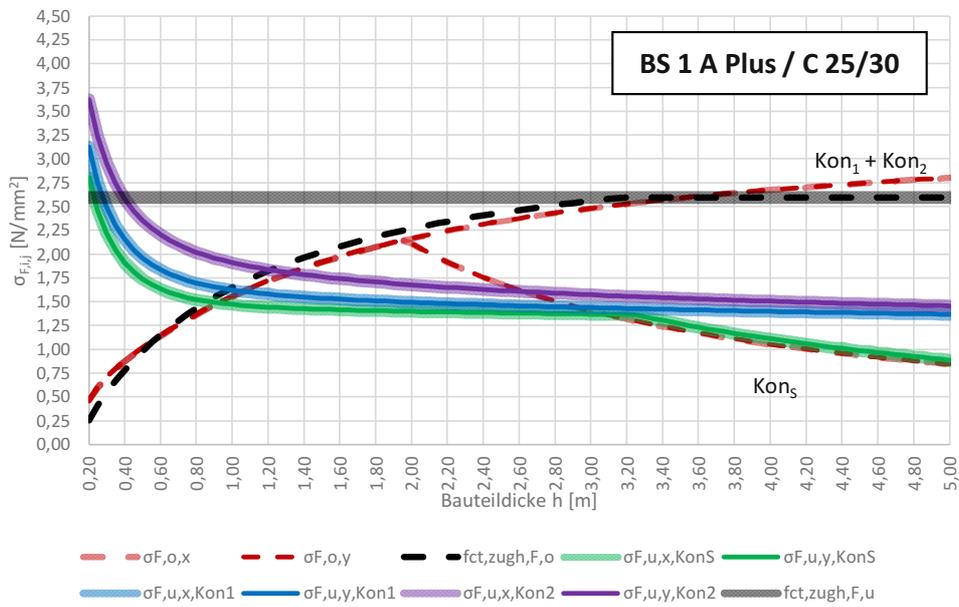
Anhang A.3

Gebrauchstauglichkeitsnachweis gemäß *öbv-MB „Weiße Wanne optimiert“* für den Betonstandard BS 1 A PLUS sowie BS 1 C PLUS mit Materialkennwerten gemäß ÖNORM EN 1992-1-1:2015.

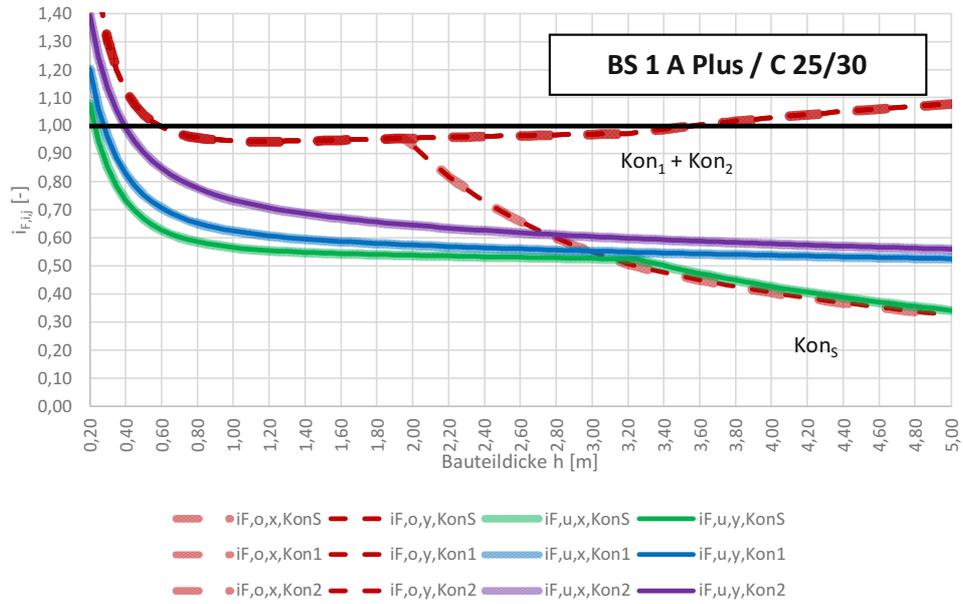
Gebrauchstauglichkeitsnachweis gemäß öbv-MB "Weiße Wanne optimiert"
für den Betonstandard BS 1 A Plus (Materialkennwerte gemäß ÖNORM EN 1992-1-1:2015)

E_B	γ_c	f_{ck}	f_{ctm}	E_{cm}	Q_{max}	S_c	m_{BM}	α_T	NB
[N/mm ²]	[kN/m ³]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[J/g]	[kJ/(°Cm ³)]	[kg/m ³]	[1/K]	[36h/72h]
100,00	25,00	25,51	2,60	31.622,08	300,52	2.400,00	315,00	0,000010	72,00
		(ÖN, bezogen auf f_{ck} :	25,51	2,60	31.622,08)				
		(ÖN, bezogen auf f_{ctm} :	25,51	2,60	31.622,08)				
		(ÖN, bezogen auf E_{cm} :	25,51	2,60	31.622,08)				

$\Delta T_{Q,max}$	ΔT_{nom}	$\Delta T_{a,var}$	$L_{F,x}$	$L_{F,y}$	$L_{F,x,eff}$	$L_{F,y,eff}$	$A_{B,eff,x}$	$A_{B,eff,y}$	
[°C]	[°C]	[°C]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m ²]	[m ²]	
39,44	5,00	10,00	Kon_S:	15,00	15,00	7,50	7,50	105,00	105,00
			Kon₁:	30,00	30,00	15,00	15,00	420,00	420,00
			Kon₂:	60,00	60,00	30,00	30,00	1.680,00	1.680,00



Gebrauchstauglichkeitsnachweis gemäß öbv-MB "Weiße Wanne optimiert"
für den Betonstandard BS 1 A Plus (Materialkennwerte gemäß ÖNORM EN 1992-1-1:2015)



h	k_{NB}	$\Delta T_{M,eq,F,o}$	$\Delta T_{M,eq,F,u}$	$\Delta T_{N,eq,F}$	$f_{ct,zugh,F,o}$	$E_{c,eff,o}$	$f_{ct,zugh,F,u}$	$E_{c,eff,u}$
[m]	[-]	[°C]	[°C]	[°C]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]
0,20	0,32	2,96	-15,24	-12,51	0,26	15.848,58	2,60	31.622,08
0,25	0,43	3,82	-13,35	-13,60	0,41	18.150,09	2,60	31.622,08
0,30	0,52	4,49	-12,01	-14,62	0,54	19.773,84	2,60	31.622,08
0,35	0,59	5,06	-11,06	-15,57	0,67	21.024,60	2,60	31.622,08
0,40	0,65	5,56	-10,36	-16,45	0,78	22.035,70	2,60	31.622,08
0,45	0,70	6,02	-9,85	-17,26	0,88	22.878,85	2,60	31.622,08
0,50	0,74	6,45	-9,46	-18,02	0,98	23.597,51	2,60	31.622,08
0,55	0,77	6,86	-9,17	-18,73	1,07	24.220,23	2,60	31.622,08
0,60	0,80	7,25	-8,95	-19,38	1,15	24.766,78	2,60	31.622,08
0,65	0,83	7,62	-8,78	-20,00	1,23	25.251,50	2,60	31.622,08
0,70	0,85	7,98	-8,65	-20,57	1,30	25.685,11	2,60	31.622,08
0,75	0,87	8,32	-8,55	-21,10	1,37	26.075,83	2,60	31.622,08
0,80	0,88	8,65	-8,47	-21,60	1,43	26.430,13	2,60	31.622,08
0,85	0,89	8,97	-8,41	-22,07	1,49	26.753,14	2,60	31.622,08
0,90	0,90	9,28	-8,36	-22,51	1,54	27.049,06	2,60	31.622,08
0,95	0,91	9,57	-8,32	-22,92	1,60	27.321,31	2,60	31.622,08
1,00	0,92	9,85	-8,29	-23,31	1,65	27.572,75	2,60	31.622,08
1,05	0,93	10,12	-8,27	-23,68	1,69	27.805,78	2,60	31.622,08
1,10	0,94	10,38	-8,26	-24,03	1,74	28.022,41	2,60	31.622,08
1,15	0,94	10,63	-8,24	-24,36	1,78	28.224,38	2,60	31.622,08
1,20	0,95	10,87	-8,24	-24,67	1,82	28.413,18	2,60	31.622,08
1,25	0,95	11,10	-8,23	-24,96	1,86	28.590,09	2,60	31.622,08
1,30	0,96	11,32	-8,22	-25,24	1,89	28.756,24	2,60	31.622,08
1,35	0,96	11,54	-8,22	-25,51	1,93	28.912,60	2,60	31.622,08
1,40	0,96	11,74	-8,22	-25,76	1,96	29.060,03	2,60	31.622,08
1,45	0,97	11,94	-8,22	-26,00	1,99	29.199,30	2,60	31.622,08
1,50	0,97	12,13	-8,22	-26,23	2,02	29.331,08	2,60	31.622,08
1,55	0,97	12,31	-8,22	-26,45	2,05	29.455,96	2,60	31.622,08
1,60	0,97	12,49	-8,22	-26,66	2,08	29.574,50	2,60	31.622,08
1,65	0,98	12,66	-8,22	-26,86	2,11	29.687,17	2,60	31.622,08
1,70	0,98	12,82	-8,22	-27,05	2,13	29.794,40	2,60	31.622,08
1,75	0,98	12,98	-8,23	-27,23	2,16	29.896,58	2,60	31.622,08
1,80	0,98	13,13	-8,23	-27,41	2,18	29.994,07	2,60	31.622,08
1,85	0,98	13,28	-8,23	-27,58	2,20	30.087,19	2,60	31.622,08
1,90	0,98	13,43	-8,23	-27,74	2,22	30.176,22	2,60	31.622,08
1,95	0,98	13,56	-8,23	-27,90	2,25	30.261,45	2,60	31.622,08
2,00	0,99	13,70	-8,23	-28,05	2,27	30.343,10	2,60	31.622,08
2,05	0,99	13,83	-8,23	-28,19	2,29	30.421,41	2,60	31.622,08
2,10	0,99	13,95	-8,23	-28,33	2,30	30.496,57	2,60	31.622,08
2,15	0,99	14,08	-8,23	-28,46	2,32	30.568,77	2,60	31.622,08
2,20	0,99	14,19	-8,23	-28,59	2,34	30.638,20	2,60	31.622,08
2,25	0,99	14,31	-8,23	-28,72	2,36	30.704,99	2,60	31.622,08
2,30	0,99	14,42	-8,23	-28,84	2,37	30.769,32	2,60	31.622,08
2,35	0,99	14,53	-8,23	-28,95	2,39	30.831,30	2,60	31.622,08
2,40	0,99	14,63	-8,23	-29,06	2,41	30.891,07	2,60	31.622,08
2,45	0,99	14,74	-8,23	-29,17	2,42	30.948,74	2,60	31.622,08
2,50	0,99	14,84	-8,23	-29,28	2,43	31.004,43	2,60	31.622,08

h	k_{NB}	$\Delta T_{M,eq,F,o}$	$\Delta T_{M,eq,F,u}$	$\Delta T_{N,eq,F}$	$f_{ct,zugh,F,o}$	$E_{c,eff,o}$	$f_{ct,zugh,F,u}$	$E_{c,eff,u}$
[m]	[-]	[°C]	[°C]	[°C]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]
2,55	0,99	14,93	-8,23	-29,38	2,45	31.058,24	2,60	31.622,08
2,60	0,99	15,03	-8,23	-29,48	2,46	31.110,25	2,60	31.622,08
2,65	0,99	15,12	-8,23	-29,57	2,48	31.160,56	2,60	31.622,08
2,70	0,99	15,21	-8,23	-29,66	2,49	31.209,26	2,60	31.622,08
2,75	0,99	15,29	-8,23	-29,75	2,50	31.256,41	2,60	31.622,08
2,80	0,99	15,38	-8,22	-29,84	2,51	31.302,10	2,60	31.622,08
2,85	0,99	15,46	-8,22	-29,93	2,53	31.346,38	2,60	31.622,08
2,90	1,00	15,54	-8,22	-30,01	2,54	31.389,33	2,60	31.622,08
2,95	1,00	15,62	-8,22	-30,09	2,55	31.431,00	2,60	31.622,08
3,00	1,00	15,70	-8,22	-30,16	2,56	31.471,46	2,60	31.622,08
3,05	1,00	15,77	-8,21	-30,24	2,57	31.510,74	2,60	31.622,08
3,10	1,00	15,84	-8,21	-30,31	2,58	31.548,91	2,60	31.622,08
3,15	1,00	15,91	-8,21	-30,38	2,59	31.586,01	2,60	31.622,08
3,20	1,00	15,98	-8,21	-30,45	2,60	31.622,08	2,60	31.622,08
3,25	1,00	16,05	-8,20	-30,52	2,60	31.622,08	2,60	31.622,08
3,30	1,00	16,12	-8,20	-30,59	2,60	31.622,08	2,60	31.622,08
3,35	1,00	16,18	-8,20	-30,65	2,60	31.622,08	2,60	31.622,08
3,40	1,00	16,25	-8,20	-30,71	2,60	31.622,08	2,60	31.622,08
3,45	1,00	16,31	-8,19	-30,77	2,60	31.622,08	2,60	31.622,08
3,50	1,00	16,37	-8,19	-30,83	2,60	31.622,08	2,60	31.622,08
3,55	1,00	16,43	-8,19	-30,89	2,60	31.622,08	2,60	31.622,08
3,60	1,00	16,49	-8,18	-30,95	2,60	31.622,08	2,60	31.622,08
3,65	1,00	16,54	-8,18	-31,00	2,60	31.622,08	2,60	31.622,08
3,70	1,00	16,60	-8,18	-31,06	2,60	31.622,08	2,60	31.622,08
3,75	1,00	16,65	-8,17	-31,11	2,60	31.622,08	2,60	31.622,08
3,80	1,00	16,71	-8,17	-31,16	2,60	31.622,08	2,60	31.622,08
3,85	1,00	16,76	-8,17	-31,21	2,60	31.622,08	2,60	31.622,08
3,90	1,00	16,81	-8,16	-31,26	2,60	31.622,08	2,60	31.622,08
3,95	1,00	16,86	-8,16	-31,31	2,60	31.622,08	2,60	31.622,08
4,00	1,00	16,91	-8,16	-31,35	2,60	31.622,08	2,60	31.622,08
4,05	1,00	16,96	-8,15	-31,40	2,60	31.622,08	2,60	31.622,08
4,10	1,00	17,00	-8,15	-31,45	2,60	31.622,08	2,60	31.622,08
4,15	1,00	17,05	-8,15	-31,49	2,60	31.622,08	2,60	31.622,08
4,20	1,00	17,10	-8,14	-31,53	2,60	31.622,08	2,60	31.622,08
4,25	1,00	17,14	-8,14	-31,57	2,60	31.622,08	2,60	31.622,08
4,30	1,00	17,18	-8,14	-31,62	2,60	31.622,08	2,60	31.622,08
4,35	1,00	17,23	-8,13	-31,66	2,60	31.622,08	2,60	31.622,08
4,40	1,00	17,27	-8,13	-31,70	2,60	31.622,08	2,60	31.622,08
4,45	1,00	17,31	-8,13	-31,74	2,60	31.622,08	2,60	31.622,08
4,50	1,00	17,35	-8,12	-31,77	2,60	31.622,08	2,60	31.622,08
4,55	1,00	17,39	-8,12	-31,81	2,60	31.622,08	2,60	31.622,08
4,60	1,00	17,43	-8,12	-31,85	2,60	31.622,08	2,60	31.622,08
4,65	1,00	17,47	-8,11	-31,88	2,60	31.622,08	2,60	31.622,08
4,70	1,00	17,51	-8,11	-31,92	2,60	31.622,08	2,60	31.622,08
4,75	1,00	17,55	-8,11	-31,95	2,60	31.622,08	2,60	31.622,08
4,80	1,00	17,58	-8,10	-31,99	2,60	31.622,08	2,60	31.622,08
4,85	1,00	17,62	-8,10	-32,02	2,60	31.622,08	2,60	31.622,08
4,90	1,00	17,66	-8,10	-32,05	2,60	31.622,08	2,60	31.622,08
4,95	1,00	17,69	-8,09	-32,08	2,60	31.622,08	2,60	31.622,08
5,00	1,00	17,72	-8,09	-32,12	2,60	31.622,08	2,60	31.622,08

h [m]	Konstruktionsklasse KonS										
	$\alpha_{F,x,KonS}$ [-]	$\alpha_{F,y,KonS}$ [-]	$\sigma_{F,o,x,KonS}$ [N/mm ²]	$\sigma_{F,o,y,KonS}$ [N/mm ²]	$\sigma_{F,u,x,KonS}$ [N/mm ²]	$\sigma_{F,u,y,KonS}$ [N/mm ²]	$i_{F,o,x,KonS}$ [-]	$i_{F,o,y,KonS}$ [-]	$i_{F,u,x,KonS}$ [-]	$i_{F,u,y,KonS}$ [-]	
0,20	0,100	0,100	0,47	0,47	2,80	2,80	1,80	1,80	1,08	1,08	
0,25	0,081	0,081	0,60	0,60	2,46	2,46	1,48	1,48	0,95	0,95	
0,30	0,069	0,069	0,71	0,71	2,22	2,22	1,31	1,31	0,85	0,85	
0,35	0,059	0,059	0,80	0,80	2,04	2,04	1,20	1,20	0,79	0,79	
0,40	0,052	0,052	0,88	0,88	1,91	1,91	1,13	1,13	0,74	0,74	
0,45	0,047	0,047	0,95	0,95	1,81	1,81	1,08	1,08	0,70	0,70	
0,50	0,042	0,042	1,02	1,02	1,74	1,74	1,04	1,04	0,67	0,67	
0,55	0,039	0,039	1,08	1,08	1,68	1,68	1,01	1,01	0,65	0,65	
0,60	0,036	0,036	1,15	1,15	1,63	1,63	1,00	1,00	0,63	0,63	
0,65	0,033	0,033	1,21	1,21	1,60	1,60	0,98	0,98	0,61	0,61	
0,70	0,031	0,031	1,26	1,26	1,57	1,57	0,97	0,97	0,60	0,60	
0,75	0,029	0,029	1,32	1,32	1,54	1,54	0,96	0,96	0,59	0,59	
0,80	0,027	0,027	1,37	1,37	1,52	1,52	0,96	0,96	0,59	0,59	
0,85	0,025	0,025	1,42	1,42	1,51	1,51	0,95	0,95	0,58	0,58	
0,90	0,024	0,024	1,47	1,47	1,49	1,49	0,95	0,95	0,57	0,57	
0,95	0,023	0,023	1,51	1,51	1,48	1,48	0,95	0,95	0,57	0,57	
1,00	0,022	0,022	1,56	1,56	1,47	1,47	0,95	0,95	0,57	0,57	
1,05	0,021	0,021	1,60	1,60	1,46	1,46	0,95	0,95	0,56	0,56	
1,10	0,020	0,020	1,64	1,64	1,46	1,46	0,94	0,94	0,56	0,56	
1,15	0,019	0,019	1,68	1,68	1,45	1,45	0,94	0,94	0,56	0,56	
1,20	0,018	0,018	1,72	1,72	1,44	1,44	0,94	0,94	0,56	0,56	
1,25	0,017	0,017	1,76	1,76	1,44	1,44	0,94	0,94	0,55	0,55	
1,30	0,017	0,017	1,79	1,79	1,43	1,43	0,95	0,95	0,55	0,55	
1,35	0,016	0,016	1,82	1,82	1,43	1,43	0,95	0,95	0,55	0,55	
1,40	0,016	0,016	1,86	1,86	1,43	1,43	0,95	0,95	0,55	0,55	
1,45	0,015	0,015	1,89	1,89	1,42	1,42	0,95	0,95	0,55	0,55	
1,50	0,015	0,015	1,92	1,92	1,42	1,42	0,95	0,95	0,55	0,55	
1,55	0,014	0,014	1,95	1,95	1,42	1,42	0,95	0,95	0,55	0,55	
1,60	0,014	0,014	1,97	1,97	1,42	1,42	0,95	0,95	0,54	0,54	
1,65	0,013	0,013	2,00	2,00	1,41	1,41	0,95	0,95	0,54	0,54	
1,70	0,013	0,013	2,03	2,03	1,41	1,41	0,95	0,95	0,54	0,54	
1,75	0,012	0,012	2,05	2,05	1,41	1,41	0,95	0,95	0,54	0,54	
1,80	0,012	0,012	2,08	2,08	1,41	1,41	0,95	0,95	0,54	0,54	
1,85	0,012	0,012	2,10	2,10	1,40	1,40	0,95	0,95	0,54	0,54	
1,90	0,012	0,012	2,12	2,12	1,40	1,40	0,95	0,95	0,54	0,54	
1,95	0,011	0,011	2,14	2,14	1,40	1,40	0,96	0,96	0,54	0,54	
2,00	0,011	0,011	2,11	2,11	1,40	1,40	0,93	0,93	0,54	0,54	
2,05	0,011	0,011	2,06	2,06	1,40	1,40	0,90	0,90	0,54	0,54	
2,10	0,010	0,010	2,01	2,01	1,40	1,40	0,87	0,87	0,54	0,54	
2,15	0,010	0,010	1,96	1,96	1,39	1,39	0,84	0,84	0,54	0,54	
2,20	0,010	0,010	1,92	1,92	1,39	1,39	0,82	0,82	0,54	0,54	
2,25	0,010	0,010	1,88	1,88	1,39	1,39	0,80	0,80	0,53	0,53	
2,30	0,010	0,010	1,83	1,83	1,39	1,39	0,77	0,77	0,53	0,53	
2,35	0,009	0,009	1,80	1,80	1,39	1,39	0,75	0,75	0,53	0,53	
2,40	0,009	0,009	1,76	1,76	1,39	1,39	0,73	0,73	0,53	0,53	
2,45	0,009	0,009	1,72	1,72	1,38	1,38	0,71	0,71	0,53	0,53	
2,50	0,009	0,009	1,69	1,69	1,38	1,38	0,69	0,69	0,53	0,53	

Konstruktionsklasse KonS											
h	$\alpha_{F,x,KonS}$	$\alpha_{F,y,KonS}$	$\sigma_{F,o,x,KonS}$	$\sigma_{F,o,y,KonS}$	$\sigma_{F,u,x,KonS}$	$\sigma_{F,u,y,KonS}$	$i_{F,o,x,KonS}$	$i_{F,o,y,KonS}$	$i_{F,u,x,KonS}$	$i_{F,u,y,KonS}$	
[m]	[-]	[-]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[-]	[-]	[-]	[-]	
2,55	0,009	0,009	1,65	1,65	1,38	1,38	0,68	0,68	0,53	0,53	
2,60	0,008	0,008	1,62	1,62	1,38	1,38	0,66	0,66	0,53	0,53	
2,65	0,008	0,008	1,59	1,59	1,38	1,38	0,64	0,64	0,53	0,53	
2,70	0,008	0,008	1,56	1,56	1,38	1,38	0,63	0,63	0,53	0,53	
2,75	0,008	0,008	1,53	1,53	1,38	1,38	0,61	0,61	0,53	0,53	
2,80	0,008	0,008	1,51	1,51	1,37	1,37	0,60	0,60	0,53	0,53	
2,85	0,008	0,008	1,48	1,48	1,37	1,37	0,59	0,59	0,53	0,53	
2,90	0,008	0,008	1,45	1,45	1,37	1,37	0,57	0,57	0,53	0,53	
2,95	0,007	0,007	1,43	1,43	1,37	1,37	0,56	0,56	0,53	0,53	
3,00	0,007	0,007	1,41	1,41	1,37	1,37	0,55	0,55	0,53	0,53	
3,05	0,007	0,007	1,38	1,38	1,37	1,37	0,54	0,54	0,53	0,53	
3,10	0,007	0,007	1,36	1,36	1,37	1,37	0,53	0,53	0,53	0,53	
3,15	0,007	0,007	1,34	1,34	1,36	1,36	0,52	0,52	0,52	0,52	
3,20	0,007	0,007	1,32	1,32	1,36	1,36	0,51	0,51	0,52	0,52	
3,25	0,007	0,007	1,30	1,30	1,36	1,36	0,50	0,50	0,52	0,52	
3,30	0,007	0,007	1,28	1,28	1,34	1,34	0,49	0,49	0,52	0,52	
3,35	0,007	0,007	1,26	1,26	1,32	1,32	0,48	0,48	0,51	0,51	
3,40	0,006	0,006	1,24	1,24	1,30	1,30	0,48	0,48	0,50	0,50	
3,45	0,006	0,006	1,22	1,22	1,28	1,28	0,47	0,47	0,49	0,49	
3,50	0,006	0,006	1,21	1,21	1,27	1,27	0,46	0,46	0,49	0,49	
3,55	0,006	0,006	1,19	1,19	1,25	1,25	0,46	0,46	0,48	0,48	
3,60	0,006	0,006	1,17	1,17	1,23	1,23	0,45	0,45	0,47	0,47	
3,65	0,006	0,006	1,16	1,16	1,21	1,21	0,44	0,44	0,47	0,47	
3,70	0,006	0,006	1,14	1,14	1,20	1,20	0,44	0,44	0,46	0,46	
3,75	0,006	0,006	1,13	1,13	1,18	1,18	0,43	0,43	0,45	0,45	
3,80	0,006	0,006	1,11	1,11	1,17	1,17	0,43	0,43	0,45	0,45	
3,85	0,006	0,006	1,10	1,10	1,15	1,15	0,42	0,42	0,44	0,44	
3,90	0,006	0,006	1,08	1,08	1,14	1,14	0,42	0,42	0,44	0,44	
3,95	0,006	0,006	1,07	1,07	1,12	1,12	0,41	0,41	0,43	0,43	
4,00	0,006	0,006	1,05	1,05	1,11	1,11	0,41	0,41	0,43	0,43	
4,05	0,005	0,005	1,04	1,04	1,10	1,10	0,40	0,40	0,42	0,42	
4,10	0,005	0,005	1,03	1,03	1,08	1,08	0,40	0,40	0,42	0,42	
4,15	0,005	0,005	1,02	1,02	1,07	1,07	0,39	0,39	0,41	0,41	
4,20	0,005	0,005	1,00	1,00	1,06	1,06	0,39	0,39	0,41	0,41	
4,25	0,005	0,005	0,99	0,99	1,04	1,04	0,38	0,38	0,40	0,40	
4,30	0,005	0,005	0,98	0,98	1,03	1,03	0,38	0,38	0,40	0,40	
4,35	0,005	0,005	0,97	0,97	1,02	1,02	0,37	0,37	0,39	0,39	
4,40	0,005	0,005	0,96	0,96	1,01	1,01	0,37	0,37	0,39	0,39	
4,45	0,005	0,005	0,95	0,95	1,00	1,00	0,36	0,36	0,38	0,38	
4,50	0,005	0,005	0,94	0,94	0,99	0,99	0,36	0,36	0,38	0,38	
4,55	0,005	0,005	0,93	0,93	0,98	0,98	0,36	0,36	0,38	0,38	
4,60	0,005	0,005	0,92	0,92	0,97	0,97	0,35	0,35	0,37	0,37	
4,65	0,005	0,005	0,91	0,91	0,96	0,96	0,35	0,35	0,37	0,37	
4,70	0,005	0,005	0,90	0,90	0,94	0,94	0,35	0,35	0,36	0,36	
4,75	0,005	0,005	0,89	0,89	0,94	0,94	0,34	0,34	0,36	0,36	
4,80	0,005	0,005	0,88	0,88	0,93	0,93	0,34	0,34	0,36	0,36	
4,85	0,005	0,005	0,87	0,87	0,92	0,92	0,33	0,33	0,35	0,35	
4,90	0,004	0,004	0,86	0,86	0,91	0,91	0,33	0,33	0,35	0,35	
4,95	0,004	0,004	0,85	0,85	0,90	0,90	0,33	0,33	0,35	0,35	
5,00	0,004	0,004	0,84	0,84	0,89	0,89	0,32	0,32	0,34	0,34	

h [m]	Konstruktionsklasse Kon ₁									
	$\alpha_{F,x,Kon1}$ [-]	$\alpha_{F,y,Kon1}$ [-]	$\sigma_{F,o,x,Kon1}$ [N/mm ²]	$\sigma_{F,o,y,Kon1}$ [N/mm ²]	$\sigma_{F,u,x,Kon1}$ [N/mm ²]	$\sigma_{F,u,y,Kon1}$ [N/mm ²]	$i_{F,o,x,Kon1}$ [-]	$i_{F,o,y,Kon1}$ [-]	$i_{F,u,x,Kon1}$ [-]	$i_{F,u,y,Kon1}$ [-]
0,20	0,181	0,181	0,47	0,47	3,13	3,13	1,80	1,80	1,20	1,20
0,25	0,150	0,150	0,60	0,60	2,76	2,76	1,48	1,48	1,06	1,06
0,30	0,129	0,129	0,71	0,71	2,49	2,49	1,31	1,31	0,96	0,96
0,35	0,112	0,112	0,80	0,80	2,30	2,30	1,20	1,20	0,89	0,89
0,40	0,100	0,100	0,88	0,88	2,16	2,16	1,13	1,13	0,83	0,83
0,45	0,090	0,090	0,95	0,95	2,05	2,05	1,08	1,08	0,79	0,79
0,50	0,081	0,081	1,02	1,02	1,96	1,96	1,04	1,04	0,75	0,75
0,55	0,074	0,074	1,08	1,08	1,89	1,89	1,01	1,01	0,73	0,73
0,60	0,069	0,069	1,15	1,15	1,84	1,84	1,00	1,00	0,71	0,71
0,65	0,064	0,064	1,21	1,21	1,79	1,79	0,98	0,98	0,69	0,69
0,70	0,059	0,059	1,26	1,26	1,75	1,75	0,97	0,97	0,67	0,67
0,75	0,056	0,056	1,32	1,32	1,72	1,72	0,96	0,96	0,66	0,66
0,80	0,052	0,052	1,37	1,37	1,70	1,70	0,96	0,96	0,65	0,65
0,85	0,050	0,050	1,42	1,42	1,67	1,67	0,95	0,95	0,64	0,64
0,90	0,047	0,047	1,47	1,47	1,66	1,66	0,95	0,95	0,64	0,64
0,95	0,045	0,045	1,51	1,51	1,64	1,64	0,95	0,95	0,63	0,63
1,00	0,042	0,042	1,56	1,56	1,62	1,62	0,95	0,95	0,62	0,62
1,05	0,040	0,040	1,60	1,60	1,61	1,61	0,95	0,95	0,62	0,62
1,10	0,039	0,039	1,64	1,64	1,60	1,60	0,94	0,94	0,62	0,62
1,15	0,037	0,037	1,68	1,68	1,59	1,59	0,94	0,94	0,61	0,61
1,20	0,036	0,036	1,72	1,72	1,58	1,58	0,94	0,94	0,61	0,61
1,25	0,034	0,034	1,76	1,76	1,57	1,57	0,94	0,94	0,60	0,60
1,30	0,033	0,033	1,79	1,79	1,56	1,56	0,95	0,95	0,60	0,60
1,35	0,032	0,032	1,82	1,82	1,56	1,56	0,95	0,95	0,60	0,60
1,40	0,031	0,031	1,86	1,86	1,55	1,55	0,95	0,95	0,60	0,60
1,45	0,030	0,030	1,89	1,89	1,54	1,54	0,95	0,95	0,59	0,59
1,50	0,029	0,029	1,92	1,92	1,54	1,54	0,95	0,95	0,59	0,59
1,55	0,028	0,028	1,95	1,95	1,53	1,53	0,95	0,95	0,59	0,59
1,60	0,027	0,027	1,97	1,97	1,53	1,53	0,95	0,95	0,59	0,59
1,65	0,026	0,026	2,00	2,00	1,52	1,52	0,95	0,95	0,59	0,59
1,70	0,025	0,025	2,03	2,03	1,52	1,52	0,95	0,95	0,58	0,58
1,75	0,025	0,025	2,05	2,05	1,51	1,51	0,95	0,95	0,58	0,58
1,80	0,024	0,024	2,08	2,08	1,51	1,51	0,95	0,95	0,58	0,58
1,85	0,023	0,023	2,10	2,10	1,50	1,50	0,95	0,95	0,58	0,58
1,90	0,023	0,023	2,12	2,12	1,50	1,50	0,95	0,95	0,58	0,58
1,95	0,022	0,022	2,14	2,14	1,50	1,50	0,96	0,96	0,58	0,58
2,00	0,022	0,022	2,17	2,17	1,49	1,49	0,96	0,96	0,57	0,57
2,05	0,021	0,021	2,19	2,19	1,49	1,49	0,96	0,96	0,57	0,57
2,10	0,021	0,021	2,21	2,21	1,49	1,49	0,96	0,96	0,57	0,57
2,15	0,020	0,020	2,23	2,23	1,48	1,48	0,96	0,96	0,57	0,57
2,20	0,020	0,020	2,24	2,24	1,48	1,48	0,96	0,96	0,57	0,57
2,25	0,019	0,019	2,26	2,26	1,48	1,48	0,96	0,96	0,57	0,57
2,30	0,019	0,019	2,28	2,28	1,47	1,47	0,96	0,96	0,57	0,57
2,35	0,018	0,018	2,30	2,30	1,47	1,47	0,96	0,96	0,57	0,57
2,40	0,018	0,018	2,31	2,31	1,47	1,47	0,96	0,96	0,56	0,56
2,45	0,018	0,018	2,33	2,33	1,47	1,47	0,96	0,96	0,56	0,56
2,50	0,017	0,017	2,35	2,35	1,46	1,46	0,96	0,96	0,56	0,56

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

h [m]	Konstruktionsklasse Kon ₁									
	$\alpha_{F,x,Kon1}$ [-]	$\alpha_{F,y,Kon1}$ [-]	$\sigma_{F,o,x,Kon1}$ [N/mm ²]	$\sigma_{F,o,y,Kon1}$ [N/mm ²]	$\sigma_{F,u,x,Kon1}$ [N/mm ²]	$\sigma_{F,u,y,Kon1}$ [N/mm ²]	$i_{F,o,x,Kon1}$ [-]	$i_{F,o,y,Kon1}$ [-]	$i_{F,u,x,Kon1}$ [-]	$i_{F,u,y,Kon1}$ [-]
2,55	0,017	0,017	2,36	2,36	1,46	1,46	0,96	0,96	0,56	0,56
2,60	0,017	0,017	2,38	2,38	1,46	1,46	0,96	0,96	0,56	0,56
2,65	0,016	0,016	2,39	2,39	1,45	1,45	0,97	0,97	0,56	0,56
2,70	0,016	0,016	2,40	2,40	1,45	1,45	0,97	0,97	0,56	0,56
2,75	0,016	0,016	2,42	2,42	1,45	1,45	0,97	0,97	0,56	0,56
2,80	0,016	0,016	2,43	2,43	1,45	1,45	0,97	0,97	0,56	0,56
2,85	0,015	0,015	2,44	2,44	1,44	1,44	0,97	0,97	0,56	0,56
2,90	0,015	0,015	2,46	2,46	1,44	1,44	0,97	0,97	0,55	0,55
2,95	0,015	0,015	2,47	2,47	1,44	1,44	0,97	0,97	0,55	0,55
3,00	0,015	0,015	2,48	2,48	1,44	1,44	0,97	0,97	0,55	0,55
3,05	0,014	0,014	2,49	2,49	1,44	1,44	0,97	0,97	0,55	0,55
3,10	0,014	0,014	2,50	2,50	1,43	1,43	0,97	0,97	0,55	0,55
3,15	0,014	0,014	2,52	2,52	1,43	1,43	0,97	0,97	0,55	0,55
3,20	0,014	0,014	2,53	2,53	1,43	1,43	0,97	0,97	0,55	0,55
3,25	0,013	0,013	2,54	2,54	1,43	1,43	0,98	0,98	0,55	0,55
3,30	0,013	0,013	2,55	2,55	1,42	1,42	0,98	0,98	0,55	0,55
3,35	0,013	0,013	2,56	2,56	1,42	1,42	0,98	0,98	0,55	0,55
3,40	0,013	0,013	2,57	2,57	1,42	1,42	0,99	0,99	0,55	0,55
3,45	0,013	0,013	2,58	2,58	1,42	1,42	0,99	0,99	0,55	0,55
3,50	0,012	0,012	2,59	2,59	1,42	1,42	1,00	1,00	0,54	0,54
3,55	0,012	0,012	2,60	2,60	1,41	1,41	1,00	1,00	0,54	0,54
3,60	0,012	0,012	2,61	2,61	1,41	1,41	1,00	1,00	0,54	0,54
3,65	0,012	0,012	2,62	2,62	1,41	1,41	1,01	1,01	0,54	0,54
3,70	0,012	0,012	2,62	2,62	1,41	1,41	1,01	1,01	0,54	0,54
3,75	0,012	0,012	2,63	2,63	1,41	1,41	1,01	1,01	0,54	0,54
3,80	0,012	0,012	2,64	2,64	1,41	1,41	1,02	1,02	0,54	0,54
3,85	0,011	0,011	2,65	2,65	1,40	1,40	1,02	1,02	0,54	0,54
3,90	0,011	0,011	2,66	2,66	1,40	1,40	1,02	1,02	0,54	0,54
3,95	0,011	0,011	2,67	2,67	1,40	1,40	1,03	1,03	0,54	0,54
4,00	0,011	0,011	2,67	2,67	1,40	1,40	1,03	1,03	0,54	0,54
4,05	0,011	0,011	2,68	2,68	1,40	1,40	1,03	1,03	0,54	0,54
4,10	0,011	0,011	2,69	2,69	1,40	1,40	1,03	1,03	0,54	0,54
4,15	0,011	0,011	2,70	2,70	1,39	1,39	1,04	1,04	0,54	0,54
4,20	0,010	0,010	2,70	2,70	1,39	1,39	1,04	1,04	0,54	0,54
4,25	0,010	0,010	2,71	2,71	1,39	1,39	1,04	1,04	0,53	0,53
4,30	0,010	0,010	2,72	2,72	1,39	1,39	1,05	1,05	0,53	0,53
4,35	0,010	0,010	2,72	2,72	1,39	1,39	1,05	1,05	0,53	0,53
4,40	0,010	0,010	2,73	2,73	1,39	1,39	1,05	1,05	0,53	0,53
4,45	0,010	0,010	2,74	2,74	1,38	1,38	1,05	1,05	0,53	0,53
4,50	0,010	0,010	2,74	2,74	1,38	1,38	1,06	1,06	0,53	0,53
4,55	0,010	0,010	2,75	2,75	1,38	1,38	1,06	1,06	0,53	0,53
4,60	0,010	0,010	2,76	2,76	1,38	1,38	1,06	1,06	0,53	0,53
4,65	0,009	0,009	2,76	2,76	1,38	1,38	1,06	1,06	0,53	0,53
4,70	0,009	0,009	2,77	2,77	1,38	1,38	1,06	1,06	0,53	0,53
4,75	0,009	0,009	2,77	2,77	1,38	1,38	1,07	1,07	0,53	0,53
4,80	0,009	0,009	2,78	2,78	1,37	1,37	1,07	1,07	0,53	0,53
4,85	0,009	0,009	2,79	2,79	1,37	1,37	1,07	1,07	0,53	0,53
4,90	0,009	0,009	2,79	2,79	1,37	1,37	1,07	1,07	0,53	0,53
4,95	0,009	0,009	2,80	2,80	1,37	1,37	1,08	1,08	0,53	0,53
5,00	0,009	0,009	2,80	2,80	1,37	1,37	1,08	1,08	0,53	0,53

Konstruktionsklasse Kon ₂											
h	$\alpha_{F,x,Kon2}$	$\alpha_{F,y,Kon2}$	$\sigma_{F,o,x,Kon2}$	$\sigma_{F,o,y,Kon2}$	$\sigma_{F,u,x,Kon2}$	$\sigma_{F,u,y,Kon2}$	$i_{F,o,x,Kon2}$	$i_{F,o,y,Kon2}$	$i_{F,u,x,Kon2}$	$i_{F,u,y,Kon2}$	
[m]	[-]	[-]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[-]	[-]	[-]	[-]	
0,20	0,307	0,307	0,47	0,47	3,62	3,62	1,80	1,80	1,39	1,39	
0,25	0,262	0,262	0,60	0,60	3,23	3,23	1,48	1,48	1,24	1,24	
0,30	0,228	0,228	0,71	0,71	2,95	2,95	1,31	1,31	1,14	1,14	
0,35	0,202	0,202	0,80	0,80	2,74	2,74	1,20	1,20	1,05	1,05	
0,40	0,181	0,181	0,88	0,88	2,58	2,58	1,13	1,13	0,99	0,99	
0,45	0,164	0,164	0,95	0,95	2,45	2,45	1,08	1,08	0,94	0,94	
0,50	0,150	0,150	1,02	1,02	2,35	2,35	1,04	1,04	0,91	0,91	
0,55	0,139	0,139	1,08	1,08	2,27	2,27	1,01	1,01	0,87	0,87	
0,60	0,129	0,129	1,15	1,15	2,20	2,20	1,00	1,00	0,85	0,85	
0,65	0,120	0,120	1,21	1,21	2,15	2,15	0,98	0,98	0,83	0,83	
0,70	0,112	0,112	1,26	1,26	2,10	2,10	0,97	0,97	0,81	0,81	
0,75	0,106	0,106	1,32	1,32	2,06	2,06	0,96	0,96	0,79	0,79	
0,80	0,100	0,100	1,37	1,37	2,02	2,02	0,96	0,96	0,78	0,78	
0,85	0,094	0,094	1,42	1,42	1,99	1,99	0,95	0,95	0,76	0,76	
0,90	0,090	0,090	1,47	1,47	1,96	1,96	0,95	0,95	0,75	0,75	
0,95	0,085	0,085	1,51	1,51	1,93	1,93	0,95	0,95	0,74	0,74	
1,00	0,081	0,081	1,56	1,56	1,91	1,91	0,95	0,95	0,73	0,73	
1,05	0,078	0,078	1,60	1,60	1,89	1,89	0,95	0,95	0,73	0,73	
1,10	0,074	0,074	1,64	1,64	1,87	1,87	0,94	0,94	0,72	0,72	
1,15	0,071	0,071	1,68	1,68	1,85	1,85	0,94	0,94	0,71	0,71	
1,20	0,069	0,069	1,72	1,72	1,84	1,84	0,94	0,94	0,71	0,71	
1,25	0,066	0,066	1,76	1,76	1,82	1,82	0,94	0,94	0,70	0,70	
1,30	0,064	0,064	1,79	1,79	1,81	1,81	0,95	0,95	0,70	0,70	
1,35	0,062	0,062	1,82	1,82	1,80	1,80	0,95	0,95	0,69	0,69	
1,40	0,059	0,059	1,86	1,86	1,78	1,78	0,95	0,95	0,69	0,69	
1,45	0,058	0,058	1,89	1,89	1,77	1,77	0,95	0,95	0,68	0,68	
1,50	0,056	0,056	1,92	1,92	1,76	1,76	0,95	0,95	0,68	0,68	
1,55	0,054	0,054	1,95	1,95	1,75	1,75	0,95	0,95	0,67	0,67	
1,60	0,052	0,052	1,97	1,97	1,74	1,74	0,95	0,95	0,67	0,67	
1,65	0,051	0,051	2,00	2,00	1,73	1,73	0,95	0,95	0,67	0,67	
1,70	0,050	0,050	2,03	2,03	1,72	1,72	0,95	0,95	0,66	0,66	
1,75	0,048	0,048	2,05	2,05	1,72	1,72	0,95	0,95	0,66	0,66	
1,80	0,047	0,047	2,08	2,08	1,71	1,71	0,95	0,95	0,66	0,66	
1,85	0,046	0,046	2,10	2,10	1,70	1,70	0,95	0,95	0,65	0,65	
1,90	0,045	0,045	2,12	2,12	1,69	1,69	0,95	0,95	0,65	0,65	
1,95	0,043	0,043	2,14	2,14	1,68	1,68	0,96	0,96	0,65	0,65	
2,00	0,042	0,042	2,17	2,17	1,68	1,68	0,96	0,96	0,65	0,65	
2,05	0,041	0,041	2,19	2,19	1,67	1,67	0,96	0,96	0,64	0,64	
2,10	0,040	0,040	2,21	2,21	1,66	1,66	0,96	0,96	0,64	0,64	
2,15	0,040	0,040	2,23	2,23	1,66	1,66	0,96	0,96	0,64	0,64	
2,20	0,039	0,039	2,24	2,24	1,65	1,65	0,96	0,96	0,64	0,64	
2,25	0,038	0,038	2,26	2,26	1,65	1,65	0,96	0,96	0,63	0,63	
2,30	0,037	0,037	2,28	2,28	1,64	1,64	0,96	0,96	0,63	0,63	
2,35	0,036	0,036	2,30	2,30	1,63	1,63	0,96	0,96	0,63	0,63	
2,40	0,036	0,036	2,31	2,31	1,63	1,63	0,96	0,96	0,63	0,63	
2,45	0,035	0,035	2,33	2,33	1,62	1,62	0,96	0,96	0,62	0,62	
2,50	0,034	0,034	2,35	2,35	1,62	1,62	0,96	0,96	0,62	0,62	

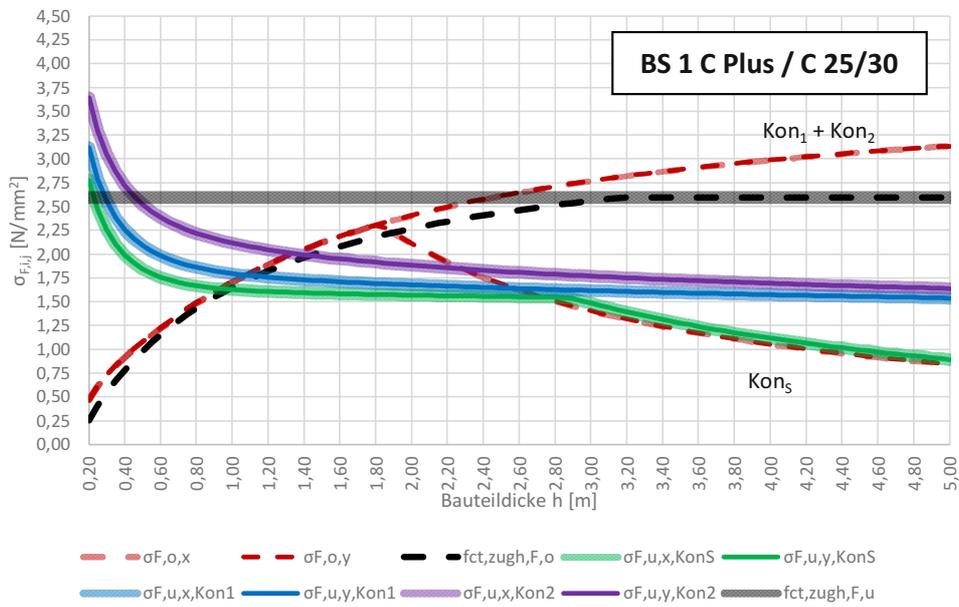
Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Konstruktionsklasse Kon ₂											
h	$\alpha_{F,x,Kon2}$	$\alpha_{F,y,Kon2}$	$\sigma_{F,o,x,Kon2}$	$\sigma_{F,o,y,Kon2}$	$\sigma_{F,u,x,Kon2}$	$\sigma_{F,u,y,Kon2}$	$i_{F,o,x,Kon2}$	$i_{F,o,y,Kon2}$	$i_{F,u,x,Kon2}$	$i_{F,u,y,Kon2}$	
[m]	[-]	[-]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[-]	[-]	[-]	[-]	
2,55	0,034	0,034	2,36	2,36	1,61	1,61	0,96	0,96	0,62	0,62	
2,60	0,033	0,033	2,38	2,38	1,61	1,61	0,96	0,96	0,62	0,62	
2,65	0,032	0,032	2,39	2,39	1,60	1,60	0,97	0,97	0,62	0,62	
2,70	0,032	0,032	2,40	2,40	1,60	1,60	0,97	0,97	0,61	0,61	
2,75	0,031	0,031	2,42	2,42	1,59	1,59	0,97	0,97	0,61	0,61	
2,80	0,031	0,031	2,43	2,43	1,59	1,59	0,97	0,97	0,61	0,61	
2,85	0,030	0,030	2,44	2,44	1,59	1,59	0,97	0,97	0,61	0,61	
2,90	0,030	0,030	2,46	2,46	1,58	1,58	0,97	0,97	0,61	0,61	
2,95	0,029	0,029	2,47	2,47	1,58	1,58	0,97	0,97	0,61	0,61	
3,00	0,029	0,029	2,48	2,48	1,57	1,57	0,97	0,97	0,60	0,60	
3,05	0,028	0,028	2,49	2,49	1,57	1,57	0,97	0,97	0,60	0,60	
3,10	0,028	0,028	2,50	2,50	1,56	1,56	0,97	0,97	0,60	0,60	
3,15	0,027	0,027	2,52	2,52	1,56	1,56	0,97	0,97	0,60	0,60	
3,20	0,027	0,027	2,53	2,53	1,56	1,56	0,97	0,97	0,60	0,60	
3,25	0,027	0,027	2,54	2,54	1,55	1,55	0,98	0,98	0,60	0,60	
3,30	0,026	0,026	2,55	2,55	1,55	1,55	0,98	0,98	0,60	0,60	
3,35	0,026	0,026	2,56	2,56	1,55	1,55	0,98	0,98	0,59	0,59	
3,40	0,025	0,025	2,57	2,57	1,54	1,54	0,99	0,99	0,59	0,59	
3,45	0,025	0,025	2,58	2,58	1,54	1,54	0,99	0,99	0,59	0,59	
3,50	0,025	0,025	2,59	2,59	1,54	1,54	1,00	1,00	0,59	0,59	
3,55	0,024	0,024	2,60	2,60	1,53	1,53	1,00	1,00	0,59	0,59	
3,60	0,024	0,024	2,61	2,61	1,53	1,53	1,00	1,00	0,59	0,59	
3,65	0,024	0,024	2,62	2,62	1,53	1,53	1,01	1,01	0,59	0,59	
3,70	0,023	0,023	2,62	2,62	1,52	1,52	1,01	1,01	0,59	0,59	
3,75	0,023	0,023	2,63	2,63	1,52	1,52	1,01	1,01	0,58	0,58	
3,80	0,023	0,023	2,64	2,64	1,52	1,52	1,02	1,02	0,58	0,58	
3,85	0,022	0,022	2,65	2,65	1,51	1,51	1,02	1,02	0,58	0,58	
3,90	0,022	0,022	2,66	2,66	1,51	1,51	1,02	1,02	0,58	0,58	
3,95	0,022	0,022	2,67	2,67	1,51	1,51	1,03	1,03	0,58	0,58	
4,00	0,022	0,022	2,67	2,67	1,50	1,50	1,03	1,03	0,58	0,58	
4,05	0,021	0,021	2,68	2,68	1,50	1,50	1,03	1,03	0,58	0,58	
4,10	0,021	0,021	2,69	2,69	1,50	1,50	1,03	1,03	0,58	0,58	
4,15	0,021	0,021	2,70	2,70	1,50	1,50	1,04	1,04	0,58	0,58	
4,20	0,021	0,021	2,70	2,70	1,49	1,49	1,04	1,04	0,57	0,57	
4,25	0,020	0,020	2,71	2,71	1,49	1,49	1,04	1,04	0,57	0,57	
4,30	0,020	0,020	2,72	2,72	1,49	1,49	1,05	1,05	0,57	0,57	
4,35	0,020	0,020	2,72	2,72	1,49	1,49	1,05	1,05	0,57	0,57	
4,40	0,020	0,020	2,73	2,73	1,48	1,48	1,05	1,05	0,57	0,57	
4,45	0,020	0,020	2,74	2,74	1,48	1,48	1,05	1,05	0,57	0,57	
4,50	0,019	0,019	2,74	2,74	1,48	1,48	1,06	1,06	0,57	0,57	
4,55	0,019	0,019	2,75	2,75	1,48	1,48	1,06	1,06	0,57	0,57	
4,60	0,019	0,019	2,76	2,76	1,47	1,47	1,06	1,06	0,57	0,57	
4,65	0,019	0,019	2,76	2,76	1,47	1,47	1,06	1,06	0,57	0,57	
4,70	0,018	0,018	2,77	2,77	1,47	1,47	1,06	1,06	0,57	0,57	
4,75	0,018	0,018	2,77	2,77	1,47	1,47	1,07	1,07	0,56	0,56	
4,80	0,018	0,018	2,78	2,78	1,46	1,46	1,07	1,07	0,56	0,56	
4,85	0,018	0,018	2,79	2,79	1,46	1,46	1,07	1,07	0,56	0,56	
4,90	0,018	0,018	2,79	2,79	1,46	1,46	1,07	1,07	0,56	0,56	
4,95	0,018	0,018	2,80	2,80	1,46	1,46	1,08	1,08	0,56	0,56	
5,00	0,017	0,017	2,80	2,80	1,46	1,46	1,08	1,08	0,56	0,56	

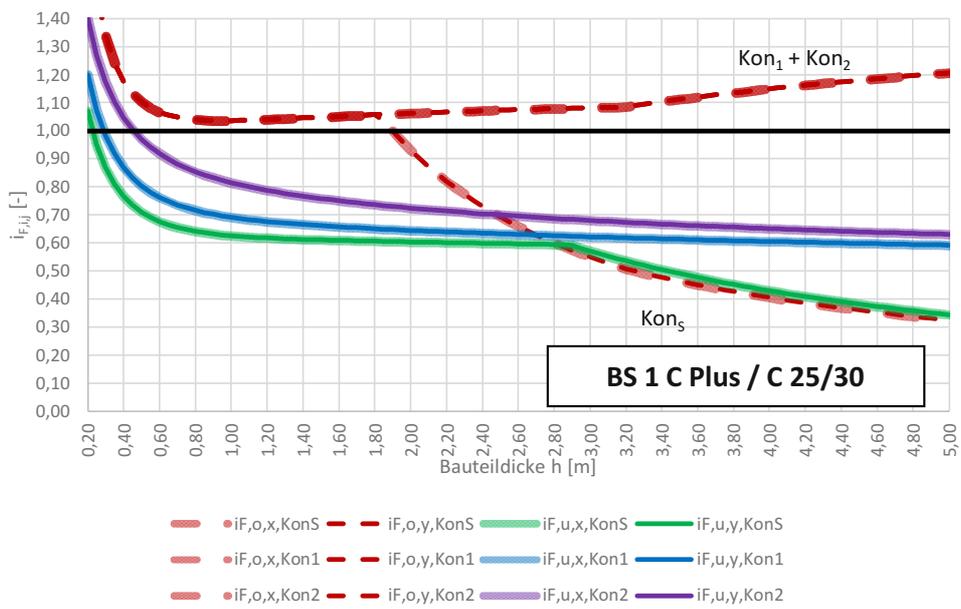
Gebrauchstauglichkeitsnachweis gemäß öbv-MB "Weiße Wanne optimiert"
für den Betonstandard BS 1 C Plus (Materialkennwerte gemäß ÖNORM EN 1992-1-1:2015)

E_B	γ_c	f_{ck}	f_{ctm}	E_{cm}	Q_{max}	S_c	m_{BM}	α_T	NB
[N/mm ²]	[kN/m ³]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[J/g]	[kJ/(°Cm ³)]	[kg/m ³]	[1/K]	[36h/72h]
100,00	25,00	25,51	2,60	31.622,08	300,52	2.400,00	360,00	0,000010	72,00
		(ÖN, bezogen auf f_{ck} :	25,51	2,60	31.622,08)				
		(ÖN, bezogen auf f_{ctm} :	25,51	2,60	31.622,08)				
		(ÖN, bezogen auf E_{cm} :	25,51	2,60	31.622,08)				

$\Delta T_{Q,max}$	ΔT_{nom}	$\Delta T_{a,var}$	$L_{F,x}$	$L_{F,y}$	$L_{F,x,eff}$	$L_{F,y,eff}$	$A_{B,eff,x}$	$A_{B,eff,y}$	
[°C]	[°C]	[°C]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m ²]	[m ²]	
45,08	5,00	10,00	Kon_S:	15,00	15,00	7,50	7,50	105,00	105,00
			Kon₁:	30,00	30,00	15,00	15,00	420,00	420,00
			Kon₂:	60,00	60,00	30,00	30,00	1.680,00	1.680,00



Gebrauchstauglichkeitsnachweis gemäß öbv-MB "Weiße Wanne optimiert"
 für den Betonstandard BS 1 C Plus (Materialkennwerte gemäß ÖNORM EN 1992-1-1:2015)



h	k_{NB}	$\Delta T_{M,eq,F,o}$	$\Delta T_{M,eq,F,u}$	$\Delta T_{N,eq,F}$	$f_{ct,zugh,F,o}$	$E_{c,eff,o}$	$f_{ct,zugh,F,u}$	$E_{c,eff,u}$
[m]	[-]	[°C]	[°C]	[°C]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]
0,20	0,32	2,98	-14,96	-13,15	0,26	15.848,58	2,60	31.622,08
0,25	0,43	3,88	-13,29	-14,50	0,41	18.150,09	2,60	31.622,08
0,30	0,52	4,61	-12,12	-15,75	0,54	19.773,84	2,60	31.622,08
0,35	0,59	5,24	-11,30	-16,89	0,67	21.024,60	2,60	31.622,08
0,40	0,65	5,81	-10,72	-17,95	0,78	22.035,70	2,60	31.622,08
0,45	0,70	6,34	-10,29	-18,92	0,88	22.878,85	2,60	31.622,08
0,50	0,74	6,83	-9,98	-19,83	0,98	23.597,51	2,60	31.622,08
0,55	0,77	7,31	-9,75	-20,66	1,07	24.220,23	2,60	31.622,08
0,60	0,80	7,76	-9,58	-21,43	1,15	24.766,78	2,60	31.622,08
0,65	0,83	8,20	-9,46	-22,15	1,23	25.251,50	2,60	31.622,08
0,70	0,85	8,61	-9,37	-22,82	1,30	25.685,11	2,60	31.622,08
0,75	0,87	9,01	-9,30	-23,45	1,37	26.075,83	2,60	31.622,08
0,80	0,88	9,40	-9,25	-24,03	1,43	26.430,13	2,60	31.622,08
0,85	0,89	9,77	-9,21	-24,57	1,49	26.753,14	2,60	31.622,08
0,90	0,90	10,12	-9,19	-25,09	1,54	27.049,06	2,60	31.622,08
0,95	0,91	10,46	-9,17	-25,57	1,60	27.321,31	2,60	31.622,08
1,00	0,92	10,79	-9,16	-26,02	1,65	27.572,75	2,60	31.622,08
1,05	0,93	11,10	-9,15	-26,44	1,69	27.805,78	2,60	31.622,08
1,10	0,94	11,40	-9,15	-26,85	1,74	28.022,41	2,60	31.622,08
1,15	0,94	11,69	-9,15	-27,23	1,78	28.224,38	2,60	31.622,08
1,20	0,95	11,97	-9,15	-27,58	1,82	28.413,18	2,60	31.622,08
1,25	0,95	12,23	-9,16	-27,92	1,86	28.590,09	2,60	31.622,08
1,30	0,96	12,49	-9,16	-28,25	1,89	28.756,24	2,60	31.622,08
1,35	0,96	12,73	-9,17	-28,55	1,93	28.912,60	2,60	31.622,08
1,40	0,96	12,97	-9,17	-28,85	1,96	29.060,03	2,60	31.622,08
1,45	0,97	13,20	-9,18	-29,12	1,99	29.199,30	2,60	31.622,08
1,50	0,97	13,42	-9,19	-29,39	2,02	29.331,08	2,60	31.622,08
1,55	0,97	13,63	-9,19	-29,64	2,05	29.455,96	2,60	31.622,08
1,60	0,97	13,83	-9,20	-29,88	2,08	29.574,50	2,60	31.622,08
1,65	0,98	14,03	-9,20	-30,11	2,11	29.687,17	2,60	31.622,08
1,70	0,98	14,21	-9,21	-30,33	2,13	29.794,40	2,60	31.622,08
1,75	0,98	14,40	-9,22	-30,54	2,16	29.896,58	2,60	31.622,08
1,80	0,98	14,57	-9,22	-30,74	2,18	29.994,07	2,60	31.622,08
1,85	0,98	14,74	-9,22	-30,94	2,20	30.087,19	2,60	31.622,08
1,90	0,98	14,91	-9,23	-31,12	2,22	30.176,22	2,60	31.622,08
1,95	0,98	15,07	-9,23	-31,30	2,25	30.261,45	2,60	31.622,08
2,00	0,99	15,22	-9,24	-31,47	2,27	30.343,10	2,60	31.622,08
2,05	0,99	15,37	-9,24	-31,64	2,29	30.421,41	2,60	31.622,08
2,10	0,99	15,51	-9,24	-31,80	2,30	30.496,57	2,60	31.622,08
2,15	0,99	15,65	-9,24	-31,95	2,32	30.568,77	2,60	31.622,08
2,20	0,99	15,79	-9,25	-32,10	2,34	30.638,20	2,60	31.622,08
2,25	0,99	15,92	-9,25	-32,24	2,36	30.704,99	2,60	31.622,08
2,30	0,99	16,05	-9,25	-32,38	2,37	30.769,32	2,60	31.622,08
2,35	0,99	16,17	-9,25	-32,51	2,39	30.831,30	2,60	31.622,08
2,40	0,99	16,29	-9,25	-32,64	2,41	30.891,07	2,60	31.622,08
2,45	0,99	16,41	-9,25	-32,76	2,42	30.948,74	2,60	31.622,08
2,50	0,99	16,52	-9,25	-32,88	2,43	31.004,43	2,60	31.622,08

h	k_{NB}	$\Delta T_{M,eq,F,o}$	$\Delta T_{M,eq,F,u}$	$\Delta T_{N,eq,F}$	$f_{ct,zugh,F,o}$	$E_{c,eff,o}$	$f_{ct,zugh,F,u}$	$E_{c,eff,u}$
[m]	[-]	[°C]	[°C]	[°C]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]
2,55	0,99	16,63	-9,25	-33,00	2,45	31.058,24	2,60	31.622,08
2,60	0,99	16,74	-9,25	-33,11	2,46	31.110,25	2,60	31.622,08
2,65	0,99	16,85	-9,25	-33,22	2,48	31.160,56	2,60	31.622,08
2,70	0,99	16,95	-9,25	-33,33	2,49	31.209,26	2,60	31.622,08
2,75	0,99	17,05	-9,25	-33,43	2,50	31.256,41	2,60	31.622,08
2,80	0,99	17,14	-9,25	-33,53	2,51	31.302,10	2,60	31.622,08
2,85	0,99	17,24	-9,24	-33,63	2,53	31.346,38	2,60	31.622,08
2,90	1,00	17,33	-9,24	-33,72	2,54	31.389,33	2,60	31.622,08
2,95	1,00	17,42	-9,24	-33,81	2,55	31.431,00	2,60	31.622,08
3,00	1,00	17,51	-9,24	-33,90	2,56	31.471,46	2,60	31.622,08
3,05	1,00	17,59	-9,24	-33,99	2,57	31.510,74	2,60	31.622,08
3,10	1,00	17,68	-9,23	-34,07	2,58	31.548,91	2,60	31.622,08
3,15	1,00	17,76	-9,23	-34,15	2,59	31.586,01	2,60	31.622,08
3,20	1,00	17,84	-9,23	-34,23	2,60	31.622,08	2,60	31.622,08
3,25	1,00	17,91	-9,23	-34,31	2,60	31.622,08	2,60	31.622,08
3,30	1,00	17,99	-9,22	-34,38	2,60	31.622,08	2,60	31.622,08
3,35	1,00	18,06	-9,22	-34,46	2,60	31.622,08	2,60	31.622,08
3,40	1,00	18,14	-9,22	-34,53	2,60	31.622,08	2,60	31.622,08
3,45	1,00	18,21	-9,21	-34,60	2,60	31.622,08	2,60	31.622,08
3,50	1,00	18,28	-9,21	-34,66	2,60	31.622,08	2,60	31.622,08
3,55	1,00	18,34	-9,21	-34,73	2,60	31.622,08	2,60	31.622,08
3,60	1,00	18,41	-9,20	-34,80	2,60	31.622,08	2,60	31.622,08
3,65	1,00	18,48	-9,20	-34,86	2,60	31.622,08	2,60	31.622,08
3,70	1,00	18,54	-9,20	-34,92	2,60	31.622,08	2,60	31.622,08
3,75	1,00	18,60	-9,19	-34,98	2,60	31.622,08	2,60	31.622,08
3,80	1,00	18,66	-9,19	-35,04	2,60	31.622,08	2,60	31.622,08
3,85	1,00	18,72	-9,19	-35,10	2,60	31.622,08	2,60	31.622,08
3,90	1,00	18,78	-9,18	-35,15	2,60	31.622,08	2,60	31.622,08
3,95	1,00	18,84	-9,18	-35,21	2,60	31.622,08	2,60	31.622,08
4,00	1,00	18,89	-9,18	-35,26	2,60	31.622,08	2,60	31.622,08
4,05	1,00	18,95	-9,17	-35,31	2,60	31.622,08	2,60	31.622,08
4,10	1,00	19,00	-9,17	-35,37	2,60	31.622,08	2,60	31.622,08
4,15	1,00	19,06	-9,17	-35,42	2,60	31.622,08	2,60	31.622,08
4,20	1,00	19,11	-9,16	-35,47	2,60	31.622,08	2,60	31.622,08
4,25	1,00	19,16	-9,16	-35,51	2,60	31.622,08	2,60	31.622,08
4,30	1,00	19,21	-9,16	-35,56	2,60	31.622,08	2,60	31.622,08
4,35	1,00	19,26	-9,15	-35,61	2,60	31.622,08	2,60	31.622,08
4,40	1,00	19,31	-9,15	-35,65	2,60	31.622,08	2,60	31.622,08
4,45	1,00	19,36	-9,14	-35,70	2,60	31.622,08	2,60	31.622,08
4,50	1,00	19,40	-9,14	-35,74	2,60	31.622,08	2,60	31.622,08
4,55	1,00	19,45	-9,14	-35,78	2,60	31.622,08	2,60	31.622,08
4,60	1,00	19,49	-9,13	-35,82	2,60	31.622,08	2,60	31.622,08
4,65	1,00	19,54	-9,13	-35,87	2,60	31.622,08	2,60	31.622,08
4,70	1,00	19,58	-9,12	-35,91	2,60	31.622,08	2,60	31.622,08
4,75	1,00	19,62	-9,12	-35,95	2,60	31.622,08	2,60	31.622,08
4,80	1,00	19,67	-9,12	-35,98	2,60	31.622,08	2,60	31.622,08
4,85	1,00	19,71	-9,11	-36,02	2,60	31.622,08	2,60	31.622,08
4,90	1,00	19,75	-9,11	-36,06	2,60	31.622,08	2,60	31.622,08
4,95	1,00	19,79	-9,11	-36,10	2,60	31.622,08	2,60	31.622,08
5,00	1,00	19,83	-9,10	-36,13	2,60	31.622,08	2,60	31.622,08

h [m]	Konstruktionsklasse KonS									
	$\alpha_{F,x,KonS}$ [-]	$\alpha_{F,y,KonS}$ [-]	$\sigma_{F,o,x,KonS}$ [N/mm ²]	$\sigma_{F,o,y,KonS}$ [N/mm ²]	$\sigma_{F,u,x,KonS}$ [N/mm ²]	$\sigma_{F,u,y,KonS}$ [N/mm ²]	$i_{F,o,x,KonS}$ [-]	$i_{F,o,y,KonS}$ [-]	$i_{F,u,x,KonS}$ [-]	$i_{F,u,y,KonS}$ [-]
0,20	0,100	0,100	0,47	0,47	2,78	2,78	1,81	1,81	1,07	1,07
0,25	0,081	0,081	0,61	0,61	2,47	2,47	1,50	1,50	0,95	0,95
0,30	0,069	0,069	0,73	0,73	2,26	2,26	1,34	1,34	0,87	0,87
0,35	0,059	0,059	0,83	0,83	2,10	2,10	1,24	1,24	0,81	0,81
0,40	0,052	0,052	0,92	0,92	1,99	1,99	1,18	1,18	0,77	0,77
0,45	0,047	0,047	1,00	1,00	1,91	1,91	1,13	1,13	0,73	0,73
0,50	0,042	0,042	1,08	1,08	1,84	1,84	1,10	1,10	0,71	0,71
0,55	0,039	0,039	1,16	1,16	1,79	1,79	1,08	1,08	0,69	0,69
0,60	0,036	0,036	1,23	1,23	1,76	1,76	1,07	1,07	0,68	0,68
0,65	0,033	0,033	1,30	1,30	1,73	1,73	1,05	1,05	0,66	0,66
0,70	0,031	0,031	1,36	1,36	1,70	1,70	1,05	1,05	0,65	0,65
0,75	0,029	0,029	1,43	1,43	1,68	1,68	1,04	1,04	0,65	0,65
0,80	0,027	0,027	1,49	1,49	1,67	1,67	1,04	1,04	0,64	0,64
0,85	0,025	0,025	1,54	1,54	1,65	1,65	1,04	1,04	0,64	0,64
0,90	0,024	0,024	1,60	1,60	1,64	1,64	1,04	1,04	0,63	0,63
0,95	0,023	0,023	1,65	1,65	1,63	1,63	1,04	1,04	0,63	0,63
1,00	0,022	0,022	1,71	1,71	1,63	1,63	1,04	1,04	0,63	0,63
1,05	0,021	0,021	1,76	1,76	1,62	1,62	1,04	1,04	0,62	0,62
1,10	0,020	0,020	1,80	1,80	1,61	1,61	1,04	1,04	0,62	0,62
1,15	0,019	0,019	1,85	1,85	1,61	1,61	1,04	1,04	0,62	0,62
1,20	0,018	0,018	1,89	1,89	1,61	1,61	1,04	1,04	0,62	0,62
1,25	0,017	0,017	1,93	1,93	1,60	1,60	1,04	1,04	0,62	0,62
1,30	0,017	0,017	1,97	1,97	1,60	1,60	1,04	1,04	0,61	0,61
1,35	0,016	0,016	2,01	2,01	1,60	1,60	1,04	1,04	0,61	0,61
1,40	0,016	0,016	2,05	2,05	1,59	1,59	1,05	1,05	0,61	0,61
1,45	0,015	0,015	2,09	2,09	1,59	1,59	1,05	1,05	0,61	0,61
1,50	0,015	0,015	2,12	2,12	1,59	1,59	1,05	1,05	0,61	0,61
1,55	0,014	0,014	2,15	2,15	1,59	1,59	1,05	1,05	0,61	0,61
1,60	0,014	0,014	2,19	2,19	1,58	1,58	1,05	1,05	0,61	0,61
1,65	0,013	0,013	2,22	2,22	1,58	1,58	1,05	1,05	0,61	0,61
1,70	0,013	0,013	2,25	2,25	1,58	1,58	1,05	1,05	0,61	0,61
1,75	0,012	0,012	2,28	2,28	1,58	1,58	1,06	1,06	0,61	0,61
1,80	0,012	0,012	2,30	2,30	1,58	1,58	1,06	1,06	0,61	0,61
1,85	0,012	0,012	2,28	2,28	1,57	1,57	1,04	1,04	0,61	0,61
1,90	0,012	0,012	2,22	2,22	1,57	1,57	1,00	1,00	0,60	0,60
1,95	0,011	0,011	2,16	2,16	1,57	1,57	0,96	0,96	0,60	0,60
2,00	0,011	0,011	2,11	2,11	1,57	1,57	0,93	0,93	0,60	0,60
2,05	0,011	0,011	2,06	2,06	1,57	1,57	0,90	0,90	0,60	0,60
2,10	0,010	0,010	2,01	2,01	1,57	1,57	0,87	0,87	0,60	0,60
2,15	0,010	0,010	1,96	1,96	1,56	1,56	0,84	0,84	0,60	0,60
2,20	0,010	0,010	1,92	1,92	1,56	1,56	0,82	0,82	0,60	0,60
2,25	0,010	0,010	1,88	1,88	1,56	1,56	0,80	0,80	0,60	0,60
2,30	0,010	0,010	1,83	1,83	1,56	1,56	0,77	0,77	0,60	0,60
2,35	0,009	0,009	1,80	1,80	1,56	1,56	0,75	0,75	0,60	0,60
2,40	0,009	0,009	1,76	1,76	1,56	1,56	0,73	0,73	0,60	0,60
2,45	0,009	0,009	1,72	1,72	1,56	1,56	0,71	0,71	0,60	0,60
2,50	0,009	0,009	1,69	1,69	1,55	1,55	0,69	0,69	0,60	0,60

h [m]	Konstruktionsklasse KonS									
	$\alpha_{F,x,KonS}$ [-]	$\alpha_{F,y,KonS}$ [-]	$\sigma_{F,o,x,KonS}$ [N/mm ²]	$\sigma_{F,o,y,KonS}$ [N/mm ²]	$\sigma_{F,u,x,KonS}$ [N/mm ²]	$\sigma_{F,u,y,KonS}$ [N/mm ²]	$i_{F,o,x,KonS}$ [-]	$i_{F,o,y,KonS}$ [-]	$i_{F,u,x,KonS}$ [-]	$i_{F,u,y,KonS}$ [-]
2,55	0,009	0,009	1,65	1,65	1,55	1,55	0,68	0,68	0,60	0,60
2,60	0,008	0,008	1,62	1,62	1,55	1,55	0,66	0,66	0,60	0,60
2,65	0,008	0,008	1,59	1,59	1,55	1,55	0,64	0,64	0,60	0,60
2,70	0,008	0,008	1,56	1,56	1,55	1,55	0,63	0,63	0,60	0,60
2,75	0,008	0,008	1,53	1,53	1,55	1,55	0,61	0,61	0,59	0,59
2,80	0,008	0,008	1,51	1,51	1,54	1,54	0,60	0,60	0,59	0,59
2,85	0,008	0,008	1,48	1,48	1,54	1,54	0,59	0,59	0,59	0,59
2,90	0,008	0,008	1,45	1,45	1,54	1,54	0,57	0,57	0,59	0,59
2,95	0,007	0,007	1,43	1,43	1,51	1,51	0,56	0,56	0,58	0,58
3,00	0,007	0,007	1,41	1,41	1,48	1,48	0,55	0,55	0,57	0,57
3,05	0,007	0,007	1,38	1,38	1,46	1,46	0,54	0,54	0,56	0,56
3,10	0,007	0,007	1,36	1,36	1,44	1,44	0,53	0,53	0,55	0,55
3,15	0,007	0,007	1,34	1,34	1,41	1,41	0,52	0,52	0,54	0,54
3,20	0,007	0,007	1,32	1,32	1,39	1,39	0,51	0,51	0,54	0,54
3,25	0,007	0,007	1,30	1,30	1,37	1,37	0,50	0,50	0,53	0,53
3,30	0,007	0,007	1,28	1,28	1,35	1,35	0,49	0,49	0,52	0,52
3,35	0,007	0,007	1,26	1,26	1,33	1,33	0,48	0,48	0,51	0,51
3,40	0,006	0,006	1,24	1,24	1,31	1,31	0,48	0,48	0,50	0,50
3,45	0,006	0,006	1,22	1,22	1,29	1,29	0,47	0,47	0,50	0,50
3,50	0,006	0,006	1,21	1,21	1,27	1,27	0,46	0,46	0,49	0,49
3,55	0,006	0,006	1,19	1,19	1,26	1,26	0,46	0,46	0,48	0,48
3,60	0,006	0,006	1,17	1,17	1,24	1,24	0,45	0,45	0,48	0,48
3,65	0,006	0,006	1,16	1,16	1,22	1,22	0,44	0,44	0,47	0,47
3,70	0,006	0,006	1,14	1,14	1,21	1,21	0,44	0,44	0,46	0,46
3,75	0,006	0,006	1,13	1,13	1,19	1,19	0,43	0,43	0,46	0,46
3,80	0,006	0,006	1,11	1,11	1,17	1,17	0,43	0,43	0,45	0,45
3,85	0,006	0,006	1,10	1,10	1,16	1,16	0,42	0,42	0,45	0,45
3,90	0,006	0,006	1,08	1,08	1,14	1,14	0,42	0,42	0,44	0,44
3,95	0,006	0,006	1,07	1,07	1,13	1,13	0,41	0,41	0,43	0,43
4,00	0,006	0,006	1,05	1,05	1,12	1,12	0,41	0,41	0,43	0,43
4,05	0,005	0,005	1,04	1,04	1,10	1,10	0,40	0,40	0,42	0,42
4,10	0,005	0,005	1,03	1,03	1,09	1,09	0,40	0,40	0,42	0,42
4,15	0,005	0,005	1,02	1,02	1,08	1,08	0,39	0,39	0,41	0,41
4,20	0,005	0,005	1,00	1,00	1,06	1,06	0,39	0,39	0,41	0,41
4,25	0,005	0,005	0,99	0,99	1,05	1,05	0,38	0,38	0,40	0,40
4,30	0,005	0,005	0,98	0,98	1,04	1,04	0,38	0,38	0,40	0,40
4,35	0,005	0,005	0,97	0,97	1,03	1,03	0,37	0,37	0,39	0,39
4,40	0,005	0,005	0,96	0,96	1,02	1,02	0,37	0,37	0,39	0,39
4,45	0,005	0,005	0,95	0,95	1,00	1,00	0,36	0,36	0,39	0,39
4,50	0,005	0,005	0,94	0,94	0,99	0,99	0,36	0,36	0,38	0,38
4,55	0,005	0,005	0,93	0,93	0,98	0,98	0,36	0,36	0,38	0,38
4,60	0,005	0,005	0,92	0,92	0,97	0,97	0,35	0,35	0,37	0,37
4,65	0,005	0,005	0,91	0,91	0,96	0,96	0,35	0,35	0,37	0,37
4,70	0,005	0,005	0,90	0,90	0,95	0,95	0,35	0,35	0,37	0,37
4,75	0,005	0,005	0,89	0,89	0,94	0,94	0,34	0,34	0,36	0,36
4,80	0,005	0,005	0,88	0,88	0,93	0,93	0,34	0,34	0,36	0,36
4,85	0,005	0,005	0,87	0,87	0,92	0,92	0,33	0,33	0,35	0,35
4,90	0,004	0,004	0,86	0,86	0,91	0,91	0,33	0,33	0,35	0,35
4,95	0,004	0,004	0,85	0,85	0,90	0,90	0,33	0,33	0,35	0,35
5,00	0,004	0,004	0,84	0,84	0,89	0,89	0,32	0,32	0,34	0,34

h [m]	Konstruktionsklasse Kon ₁									
	$\alpha_{F,x,Kon1}$ [-]	$\alpha_{F,y,Kon1}$ [-]	$\sigma_{F,o,x,Kon1}$ [N/mm ²]	$\sigma_{F,o,y,Kon1}$ [N/mm ²]	$\sigma_{F,u,x,Kon1}$ [N/mm ²]	$\sigma_{F,u,y,Kon1}$ [N/mm ²]	$i_{F,o,x,Kon1}$ [-]	$i_{F,o,y,Kon1}$ [-]	$i_{F,u,x,Kon1}$ [-]	$i_{F,u,y,Kon1}$ [-]
0,20	0,181	0,181	0,47	0,47	3,12	3,12	1,81	1,81	1,20	1,20
0,25	0,150	0,150	0,61	0,61	2,79	2,79	1,50	1,50	1,07	1,07
0,30	0,129	0,129	0,73	0,73	2,56	2,56	1,34	1,34	0,98	0,98
0,35	0,112	0,112	0,83	0,83	2,39	2,39	1,24	1,24	0,92	0,92
0,40	0,100	0,100	0,92	0,92	2,26	2,26	1,18	1,18	0,87	0,87
0,45	0,090	0,090	1,00	1,00	2,16	2,16	1,13	1,13	0,83	0,83
0,50	0,081	0,081	1,08	1,08	2,09	2,09	1,10	1,10	0,80	0,80
0,55	0,074	0,074	1,16	1,16	2,03	2,03	1,08	1,08	0,78	0,78
0,60	0,069	0,069	1,23	1,23	1,98	1,98	1,07	1,07	0,76	0,76
0,65	0,064	0,064	1,30	1,30	1,94	1,94	1,05	1,05	0,75	0,75
0,70	0,059	0,059	1,36	1,36	1,91	1,91	1,05	1,05	0,73	0,73
0,75	0,056	0,056	1,43	1,43	1,88	1,88	1,04	1,04	0,72	0,72
0,80	0,052	0,052	1,49	1,49	1,86	1,86	1,04	1,04	0,72	0,72
0,85	0,050	0,050	1,54	1,54	1,84	1,84	1,04	1,04	0,71	0,71
0,90	0,047	0,047	1,60	1,60	1,82	1,82	1,04	1,04	0,70	0,70
0,95	0,045	0,045	1,65	1,65	1,81	1,81	1,04	1,04	0,70	0,70
1,00	0,042	0,042	1,71	1,71	1,80	1,80	1,04	1,04	0,69	0,69
1,05	0,040	0,040	1,76	1,76	1,79	1,79	1,04	1,04	0,69	0,69
1,10	0,039	0,039	1,80	1,80	1,78	1,78	1,04	1,04	0,68	0,68
1,15	0,037	0,037	1,85	1,85	1,77	1,77	1,04	1,04	0,68	0,68
1,20	0,036	0,036	1,89	1,89	1,76	1,76	1,04	1,04	0,68	0,68
1,25	0,034	0,034	1,93	1,93	1,75	1,75	1,04	1,04	0,67	0,67
1,30	0,033	0,033	1,97	1,97	1,74	1,74	1,04	1,04	0,67	0,67
1,35	0,032	0,032	2,01	2,01	1,74	1,74	1,04	1,04	0,67	0,67
1,40	0,031	0,031	2,05	2,05	1,73	1,73	1,05	1,05	0,67	0,67
1,45	0,030	0,030	2,09	2,09	1,72	1,72	1,05	1,05	0,66	0,66
1,50	0,029	0,029	2,12	2,12	1,72	1,72	1,05	1,05	0,66	0,66
1,55	0,028	0,028	2,15	2,15	1,71	1,71	1,05	1,05	0,66	0,66
1,60	0,027	0,027	2,19	2,19	1,71	1,71	1,05	1,05	0,66	0,66
1,65	0,026	0,026	2,22	2,22	1,70	1,70	1,05	1,05	0,66	0,66
1,70	0,025	0,025	2,25	2,25	1,70	1,70	1,05	1,05	0,65	0,65
1,75	0,025	0,025	2,28	2,28	1,70	1,70	1,06	1,06	0,65	0,65
1,80	0,024	0,024	2,30	2,30	1,69	1,69	1,06	1,06	0,65	0,65
1,85	0,023	0,023	2,33	2,33	1,69	1,69	1,06	1,06	0,65	0,65
1,90	0,023	0,023	2,36	2,36	1,68	1,68	1,06	1,06	0,65	0,65
1,95	0,022	0,022	2,38	2,38	1,68	1,68	1,06	1,06	0,65	0,65
2,00	0,022	0,022	2,41	2,41	1,68	1,68	1,06	1,06	0,64	0,64
2,05	0,021	0,021	2,43	2,43	1,67	1,67	1,06	1,06	0,64	0,64
2,10	0,021	0,021	2,45	2,45	1,67	1,67	1,06	1,06	0,64	0,64
2,15	0,020	0,020	2,47	2,47	1,67	1,67	1,07	1,07	0,64	0,64
2,20	0,020	0,020	2,50	2,50	1,66	1,66	1,07	1,07	0,64	0,64
2,25	0,019	0,019	2,52	2,52	1,66	1,66	1,07	1,07	0,64	0,64
2,30	0,019	0,019	2,54	2,54	1,66	1,66	1,07	1,07	0,64	0,64
2,35	0,018	0,018	2,56	2,56	1,65	1,65	1,07	1,07	0,64	0,64
2,40	0,018	0,018	2,58	2,58	1,65	1,65	1,07	1,07	0,63	0,63
2,45	0,018	0,018	2,59	2,59	1,65	1,65	1,07	1,07	0,63	0,63
2,50	0,017	0,017	2,61	2,61	1,64	1,64	1,07	1,07	0,63	0,63

h [m]	Konstruktionsklasse Kon ₁									
	$\alpha_{F,x,Kon1}$ [-]	$\alpha_{F,y,Kon1}$ [-]	$\sigma_{F,o,x,Kon1}$ [N/mm ²]	$\sigma_{F,o,y,Kon1}$ [N/mm ²]	$\sigma_{F,u,x,Kon1}$ [N/mm ²]	$\sigma_{F,u,y,Kon1}$ [N/mm ²]	$i_{F,o,x,Kon1}$ [-]	$i_{F,o,y,Kon1}$ [-]	$i_{F,u,x,Kon1}$ [-]	$i_{F,u,y,Kon1}$ [-]
2,55	0,017	0,017	2,63	2,63	1,64	1,64	1,07	1,07	0,63	0,63
2,60	0,017	0,017	2,65	2,65	1,64	1,64	1,07	1,07	0,63	0,63
2,65	0,016	0,016	2,66	2,66	1,63	1,63	1,08	1,08	0,63	0,63
2,70	0,016	0,016	2,68	2,68	1,63	1,63	1,08	1,08	0,63	0,63
2,75	0,016	0,016	2,70	2,70	1,63	1,63	1,08	1,08	0,63	0,63
2,80	0,016	0,016	2,71	2,71	1,63	1,63	1,08	1,08	0,63	0,63
2,85	0,015	0,015	2,73	2,73	1,62	1,62	1,08	1,08	0,62	0,62
2,90	0,015	0,015	2,74	2,74	1,62	1,62	1,08	1,08	0,62	0,62
2,95	0,015	0,015	2,75	2,75	1,62	1,62	1,08	1,08	0,62	0,62
3,00	0,015	0,015	2,77	2,77	1,62	1,62	1,08	1,08	0,62	0,62
3,05	0,014	0,014	2,78	2,78	1,61	1,61	1,08	1,08	0,62	0,62
3,10	0,014	0,014	2,79	2,79	1,61	1,61	1,08	1,08	0,62	0,62
3,15	0,014	0,014	2,81	2,81	1,61	1,61	1,08	1,08	0,62	0,62
3,20	0,014	0,014	2,82	2,82	1,61	1,61	1,08	1,08	0,62	0,62
3,25	0,013	0,013	2,83	2,83	1,60	1,60	1,09	1,09	0,62	0,62
3,30	0,013	0,013	2,84	2,84	1,60	1,60	1,09	1,09	0,62	0,62
3,35	0,013	0,013	2,86	2,86	1,60	1,60	1,10	1,10	0,62	0,62
3,40	0,013	0,013	2,87	2,87	1,60	1,60	1,10	1,10	0,61	0,61
3,45	0,013	0,013	2,88	2,88	1,60	1,60	1,11	1,11	0,61	0,61
3,50	0,012	0,012	2,89	2,89	1,59	1,59	1,11	1,11	0,61	0,61
3,55	0,012	0,012	2,90	2,90	1,59	1,59	1,12	1,12	0,61	0,61
3,60	0,012	0,012	2,91	2,91	1,59	1,59	1,12	1,12	0,61	0,61
3,65	0,012	0,012	2,92	2,92	1,59	1,59	1,12	1,12	0,61	0,61
3,70	0,012	0,012	2,93	2,93	1,58	1,58	1,13	1,13	0,61	0,61
3,75	0,012	0,012	2,94	2,94	1,58	1,58	1,13	1,13	0,61	0,61
3,80	0,012	0,012	2,95	2,95	1,58	1,58	1,13	1,13	0,61	0,61
3,85	0,011	0,011	2,96	2,96	1,58	1,58	1,14	1,14	0,61	0,61
3,90	0,011	0,011	2,97	2,97	1,58	1,58	1,14	1,14	0,61	0,61
3,95	0,011	0,011	2,98	2,98	1,57	1,57	1,15	1,15	0,61	0,61
4,00	0,011	0,011	2,99	2,99	1,57	1,57	1,15	1,15	0,61	0,61
4,05	0,011	0,011	3,00	3,00	1,57	1,57	1,15	1,15	0,60	0,60
4,10	0,011	0,011	3,00	3,00	1,57	1,57	1,16	1,16	0,60	0,60
4,15	0,011	0,011	3,01	3,01	1,57	1,57	1,16	1,16	0,60	0,60
4,20	0,010	0,010	3,02	3,02	1,57	1,57	1,16	1,16	0,60	0,60
4,25	0,010	0,010	3,03	3,03	1,56	1,56	1,17	1,17	0,60	0,60
4,30	0,010	0,010	3,04	3,04	1,56	1,56	1,17	1,17	0,60	0,60
4,35	0,010	0,010	3,05	3,05	1,56	1,56	1,17	1,17	0,60	0,60
4,40	0,010	0,010	3,05	3,05	1,56	1,56	1,17	1,17	0,60	0,60
4,45	0,010	0,010	3,06	3,06	1,56	1,56	1,18	1,18	0,60	0,60
4,50	0,010	0,010	3,07	3,07	1,56	1,56	1,18	1,18	0,60	0,60
4,55	0,010	0,010	3,08	3,08	1,55	1,55	1,18	1,18	0,60	0,60
4,60	0,010	0,010	3,08	3,08	1,55	1,55	1,19	1,19	0,60	0,60
4,65	0,009	0,009	3,09	3,09	1,55	1,55	1,19	1,19	0,60	0,60
4,70	0,009	0,009	3,10	3,10	1,55	1,55	1,19	1,19	0,60	0,60
4,75	0,009	0,009	3,10	3,10	1,55	1,55	1,19	1,19	0,60	0,60
4,80	0,009	0,009	3,11	3,11	1,55	1,55	1,20	1,20	0,59	0,59
4,85	0,009	0,009	3,12	3,12	1,54	1,54	1,20	1,20	0,59	0,59
4,90	0,009	0,009	3,12	3,12	1,54	1,54	1,20	1,20	0,59	0,59
4,95	0,009	0,009	3,13	3,13	1,54	1,54	1,20	1,20	0,59	0,59
5,00	0,009	0,009	3,13	3,13	1,54	1,54	1,21	1,21	0,59	0,59

Konstruktionsklasse Kon ₂											
h	$\alpha_{F,x,Kon2}$	$\alpha_{F,y,Kon2}$	$\sigma_{F,o,x,Kon2}$	$\sigma_{F,o,y,Kon2}$	$\sigma_{F,u,x,Kon2}$	$\sigma_{F,u,y,Kon2}$	$i_{F,o,x,Kon2}$	$i_{F,o,y,Kon2}$	$i_{F,u,x,Kon2}$	$i_{F,u,y,Kon2}$	
[m]	[-]	[-]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[-]	[-]	[-]	[-]	
0,20	0,307	0,307	0,47	0,47	3,64	3,64	1,81	1,81	1,40	1,40	
0,25	0,262	0,262	0,61	0,61	3,30	3,30	1,50	1,50	1,27	1,27	
0,30	0,228	0,228	0,73	0,73	3,05	3,05	1,34	1,34	1,17	1,17	
0,35	0,202	0,202	0,83	0,83	2,87	2,87	1,24	1,24	1,10	1,10	
0,40	0,181	0,181	0,92	0,92	2,72	2,72	1,18	1,18	1,05	1,05	
0,45	0,164	0,164	1,00	1,00	2,61	2,61	1,13	1,13	1,00	1,00	
0,50	0,150	0,150	1,08	1,08	2,52	2,52	1,10	1,10	0,97	0,97	
0,55	0,139	0,139	1,16	1,16	2,45	2,45	1,08	1,08	0,94	0,94	
0,60	0,129	0,129	1,23	1,23	2,39	2,39	1,07	1,07	0,92	0,92	
0,65	0,120	0,120	1,30	1,30	2,34	2,34	1,05	1,05	0,90	0,90	
0,70	0,112	0,112	1,36	1,36	2,29	2,29	1,05	1,05	0,88	0,88	
0,75	0,106	0,106	1,43	1,43	2,25	2,25	1,04	1,04	0,87	0,87	
0,80	0,100	0,100	1,49	1,49	2,22	2,22	1,04	1,04	0,85	0,85	
0,85	0,094	0,094	1,54	1,54	2,19	2,19	1,04	1,04	0,84	0,84	
0,90	0,090	0,090	1,60	1,60	2,16	2,16	1,04	1,04	0,83	0,83	
0,95	0,085	0,085	1,65	1,65	2,14	2,14	1,04	1,04	0,82	0,82	
1,00	0,081	0,081	1,71	1,71	2,12	2,12	1,04	1,04	0,81	0,81	
1,05	0,078	0,078	1,76	1,76	2,10	2,10	1,04	1,04	0,81	0,81	
1,10	0,074	0,074	1,80	1,80	2,08	2,08	1,04	1,04	0,80	0,80	
1,15	0,071	0,071	1,85	1,85	2,06	2,06	1,04	1,04	0,79	0,79	
1,20	0,069	0,069	1,89	1,89	2,05	2,05	1,04	1,04	0,79	0,79	
1,25	0,066	0,066	1,93	1,93	2,03	2,03	1,04	1,04	0,78	0,78	
1,30	0,064	0,064	1,97	1,97	2,02	2,02	1,04	1,04	0,78	0,78	
1,35	0,062	0,062	2,01	2,01	2,01	2,01	1,04	1,04	0,77	0,77	
1,40	0,059	0,059	2,05	2,05	1,99	1,99	1,05	1,05	0,77	0,77	
1,45	0,058	0,058	2,09	2,09	1,98	1,98	1,05	1,05	0,76	0,76	
1,50	0,056	0,056	2,12	2,12	1,97	1,97	1,05	1,05	0,76	0,76	
1,55	0,054	0,054	2,15	2,15	1,96	1,96	1,05	1,05	0,75	0,75	
1,60	0,052	0,052	2,19	2,19	1,95	1,95	1,05	1,05	0,75	0,75	
1,65	0,051	0,051	2,22	2,22	1,94	1,94	1,05	1,05	0,75	0,75	
1,70	0,050	0,050	2,25	2,25	1,93	1,93	1,05	1,05	0,74	0,74	
1,75	0,048	0,048	2,28	2,28	1,92	1,92	1,06	1,06	0,74	0,74	
1,80	0,047	0,047	2,30	2,30	1,91	1,91	1,06	1,06	0,74	0,74	
1,85	0,046	0,046	2,33	2,33	1,91	1,91	1,06	1,06	0,73	0,73	
1,90	0,045	0,045	2,36	2,36	1,90	1,90	1,06	1,06	0,73	0,73	
1,95	0,043	0,043	2,38	2,38	1,89	1,89	1,06	1,06	0,73	0,73	
2,00	0,042	0,042	2,41	2,41	1,88	1,88	1,06	1,06	0,72	0,72	
2,05	0,041	0,041	2,43	2,43	1,87	1,87	1,06	1,06	0,72	0,72	
2,10	0,040	0,040	2,45	2,45	1,87	1,87	1,06	1,06	0,72	0,72	
2,15	0,040	0,040	2,47	2,47	1,86	1,86	1,07	1,07	0,72	0,72	
2,20	0,039	0,039	2,50	2,50	1,85	1,85	1,07	1,07	0,71	0,71	
2,25	0,038	0,038	2,52	2,52	1,85	1,85	1,07	1,07	0,71	0,71	
2,30	0,037	0,037	2,54	2,54	1,84	1,84	1,07	1,07	0,71	0,71	
2,35	0,036	0,036	2,56	2,56	1,84	1,84	1,07	1,07	0,71	0,71	
2,40	0,036	0,036	2,58	2,58	1,83	1,83	1,07	1,07	0,70	0,70	
2,45	0,035	0,035	2,59	2,59	1,82	1,82	1,07	1,07	0,70	0,70	
2,50	0,034	0,034	2,61	2,61	1,82	1,82	1,07	1,07	0,70	0,70	

Konstruktionsklasse Kon ₂											
h	$\alpha_{F,x,Kon2}$	$\alpha_{F,y,Kon2}$	$\sigma_{F,o,x,Kon2}$	$\sigma_{F,o,y,Kon2}$	$\sigma_{F,u,x,Kon2}$	$\sigma_{F,u,y,Kon2}$	$i_{F,o,x,Kon2}$	$i_{F,o,y,Kon2}$	$i_{F,u,x,Kon2}$	$i_{F,u,y,Kon2}$	
[m]	[-]	[-]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[-]	[-]	[-]	[-]	
2,55	0,034	0,034	2,63	2,63	1,81	1,81	1,07	1,07	0,70	0,70	
2,60	0,033	0,033	2,65	2,65	1,81	1,81	1,07	1,07	0,70	0,70	
2,65	0,032	0,032	2,66	2,66	1,80	1,80	1,08	1,08	0,69	0,69	
2,70	0,032	0,032	2,68	2,68	1,80	1,80	1,08	1,08	0,69	0,69	
2,75	0,031	0,031	2,70	2,70	1,79	1,79	1,08	1,08	0,69	0,69	
2,80	0,031	0,031	2,71	2,71	1,79	1,79	1,08	1,08	0,69	0,69	
2,85	0,030	0,030	2,73	2,73	1,78	1,78	1,08	1,08	0,69	0,69	
2,90	0,030	0,030	2,74	2,74	1,78	1,78	1,08	1,08	0,68	0,68	
2,95	0,029	0,029	2,75	2,75	1,77	1,77	1,08	1,08	0,68	0,68	
3,00	0,029	0,029	2,77	2,77	1,77	1,77	1,08	1,08	0,68	0,68	
3,05	0,028	0,028	2,78	2,78	1,76	1,76	1,08	1,08	0,68	0,68	
3,10	0,028	0,028	2,79	2,79	1,76	1,76	1,08	1,08	0,68	0,68	
3,15	0,027	0,027	2,81	2,81	1,75	1,75	1,08	1,08	0,67	0,67	
3,20	0,027	0,027	2,82	2,82	1,75	1,75	1,08	1,08	0,67	0,67	
3,25	0,027	0,027	2,83	2,83	1,75	1,75	1,09	1,09	0,67	0,67	
3,30	0,026	0,026	2,84	2,84	1,74	1,74	1,09	1,09	0,67	0,67	
3,35	0,026	0,026	2,86	2,86	1,74	1,74	1,10	1,10	0,67	0,67	
3,40	0,025	0,025	2,87	2,87	1,73	1,73	1,10	1,10	0,67	0,67	
3,45	0,025	0,025	2,88	2,88	1,73	1,73	1,11	1,11	0,67	0,67	
3,50	0,025	0,025	2,89	2,89	1,73	1,73	1,11	1,11	0,66	0,66	
3,55	0,024	0,024	2,90	2,90	1,72	1,72	1,12	1,12	0,66	0,66	
3,60	0,024	0,024	2,91	2,91	1,72	1,72	1,12	1,12	0,66	0,66	
3,65	0,024	0,024	2,92	2,92	1,72	1,72	1,12	1,12	0,66	0,66	
3,70	0,023	0,023	2,93	2,93	1,71	1,71	1,13	1,13	0,66	0,66	
3,75	0,023	0,023	2,94	2,94	1,71	1,71	1,13	1,13	0,66	0,66	
3,80	0,023	0,023	2,95	2,95	1,71	1,71	1,13	1,13	0,66	0,66	
3,85	0,022	0,022	2,96	2,96	1,70	1,70	1,14	1,14	0,65	0,65	
3,90	0,022	0,022	2,97	2,97	1,70	1,70	1,14	1,14	0,65	0,65	
3,95	0,022	0,022	2,98	2,98	1,70	1,70	1,15	1,15	0,65	0,65	
4,00	0,022	0,022	2,99	2,99	1,69	1,69	1,15	1,15	0,65	0,65	
4,05	0,021	0,021	3,00	3,00	1,69	1,69	1,15	1,15	0,65	0,65	
4,10	0,021	0,021	3,00	3,00	1,69	1,69	1,16	1,16	0,65	0,65	
4,15	0,021	0,021	3,01	3,01	1,68	1,68	1,16	1,16	0,65	0,65	
4,20	0,021	0,021	3,02	3,02	1,68	1,68	1,16	1,16	0,65	0,65	
4,25	0,020	0,020	3,03	3,03	1,68	1,68	1,17	1,17	0,65	0,65	
4,30	0,020	0,020	3,04	3,04	1,67	1,67	1,17	1,17	0,64	0,64	
4,35	0,020	0,020	3,05	3,05	1,67	1,67	1,17	1,17	0,64	0,64	
4,40	0,020	0,020	3,05	3,05	1,67	1,67	1,17	1,17	0,64	0,64	
4,45	0,020	0,020	3,06	3,06	1,67	1,67	1,18	1,18	0,64	0,64	
4,50	0,019	0,019	3,07	3,07	1,66	1,66	1,18	1,18	0,64	0,64	
4,55	0,019	0,019	3,08	3,08	1,66	1,66	1,18	1,18	0,64	0,64	
4,60	0,019	0,019	3,08	3,08	1,66	1,66	1,19	1,19	0,64	0,64	
4,65	0,019	0,019	3,09	3,09	1,66	1,66	1,19	1,19	0,64	0,64	
4,70	0,018	0,018	3,10	3,10	1,65	1,65	1,19	1,19	0,64	0,64	
4,75	0,018	0,018	3,10	3,10	1,65	1,65	1,19	1,19	0,63	0,63	
4,80	0,018	0,018	3,11	3,11	1,65	1,65	1,20	1,20	0,63	0,63	
4,85	0,018	0,018	3,12	3,12	1,65	1,65	1,20	1,20	0,63	0,63	
4,90	0,018	0,018	3,12	3,12	1,64	1,64	1,20	1,20	0,63	0,63	
4,95	0,018	0,018	3,13	3,13	1,64	1,64	1,20	1,20	0,63	0,63	
5,00	0,017	0,017	3,13	3,13	1,64	1,64	1,21	1,21	0,63	0,63	

Anhang A.4

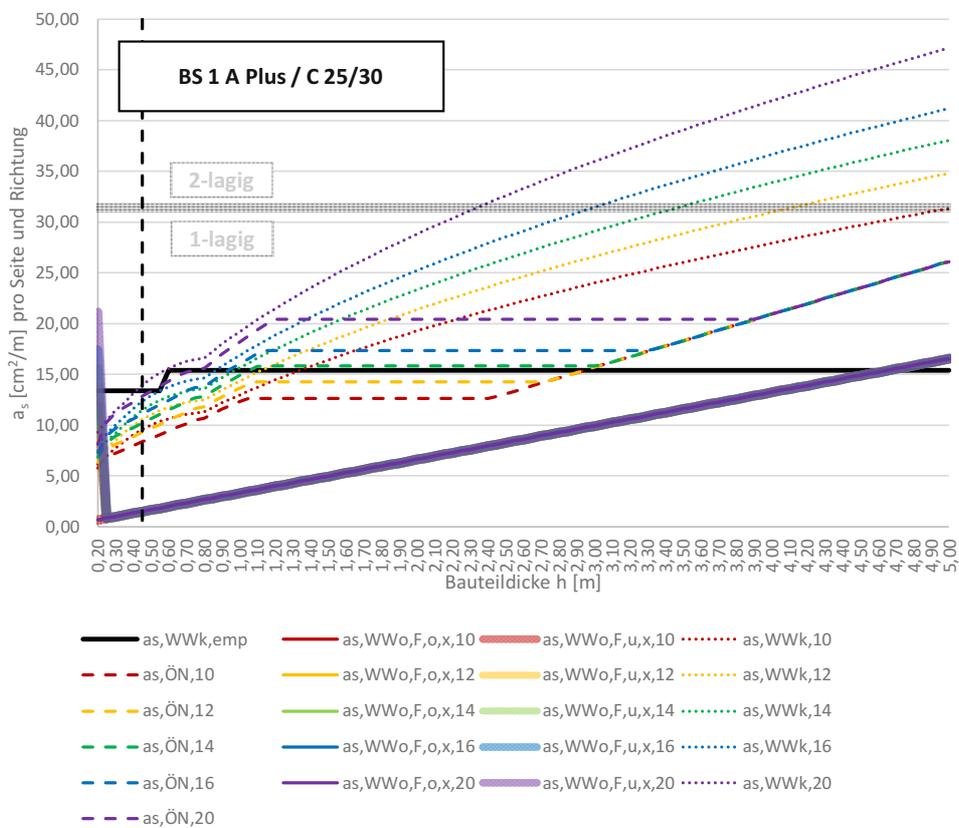
Vergleich der Mindestbewehrung für zentrischen Zwang (Frührissbildung) nach *öbv-RL „Weiße Wannen“* (Bemessungsmodell „Weiße Wanne klassisch“) und ÖNORM EN 1992-1-1:2015 und ÖNORM B 1992-1-1:2018 mit dem Nachweis gemäß *öbv-MB „Weiße Wanne optimiert“* (Bemessungsmodell „Weiße Wanne optimiert“) und der Begrenzung der Rissbreite unter Beachtung der Verformungskompatibilität nach SCHLICKE (2014).

Vergleich der Mindestbewehrung für zentrischen Zwang (Frührissbildung) nach öbv-RL "Weiße Wannen 2018" mit dem Rissbreitennachweis nach ÖNorm und Merkblatt "Weiße Wanne optimiert 2018" & SCHLICKE (2014)

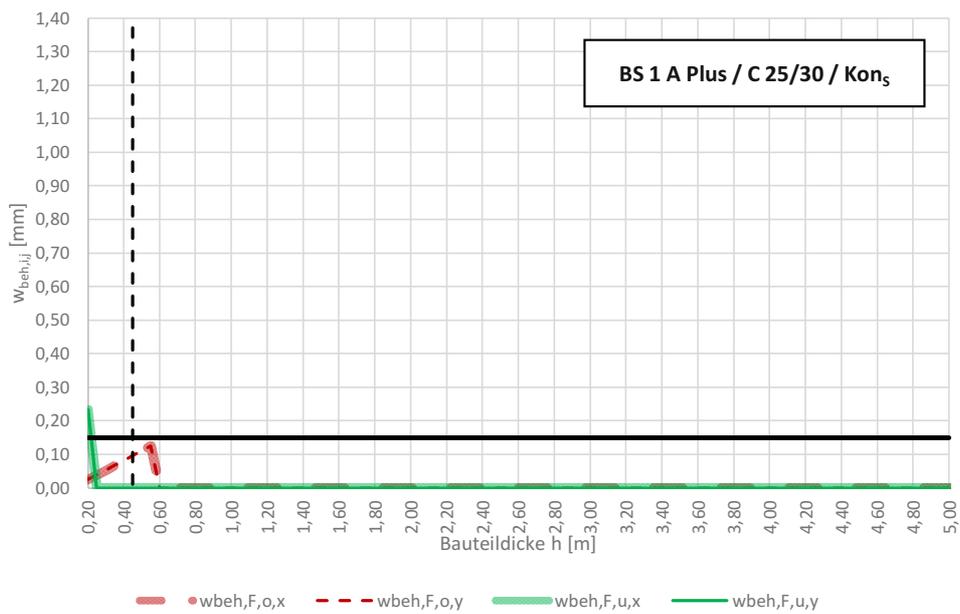
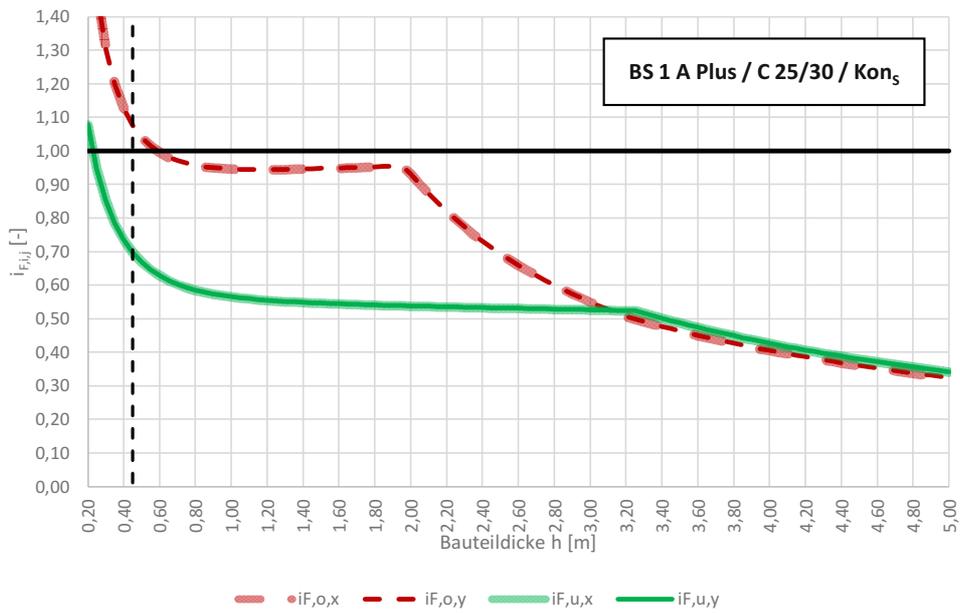
E_B	γ_c	f_{ck}	f_{ctm}	E_{cm}	Q_{max}	S_c	m_{BM}	α_T	NB
[N/mm ²]	[kN/m ³]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[J/g]	[kJ/(°Cm ³)]	[kg/m ³]	[1/K]	[36h/72h]
100,00	25,00	25,51	2,60	31.622,08	300,52	2.400,00	315,00	0,000010	72,00
(ÖN, bezogen auf f_{ck} :		25,00	2,56	31.475,81)					
(ÖN, bezogen auf f_{ctm} :		25,51	2,60	31.622,08)					
(ÖN, bezogen auf E_{cm} :		25,51	2,60	31.622,08)					

$\Delta T_{Q,max}$	ΔT_{nom}	$\Delta T_{a,var}$	$L_{F,x}$	$L_{F,y}$	$L_{F,x,eff}$	$L_{F,y,eff}$	$A_{B,eff,x}$	$A_{B,eff,y}$
[°C]	[°C]	[°C]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m ²]	[m ²]
39,44	5,00	10,00	15,00	15,00	7,50	7,50	105,00	105,00

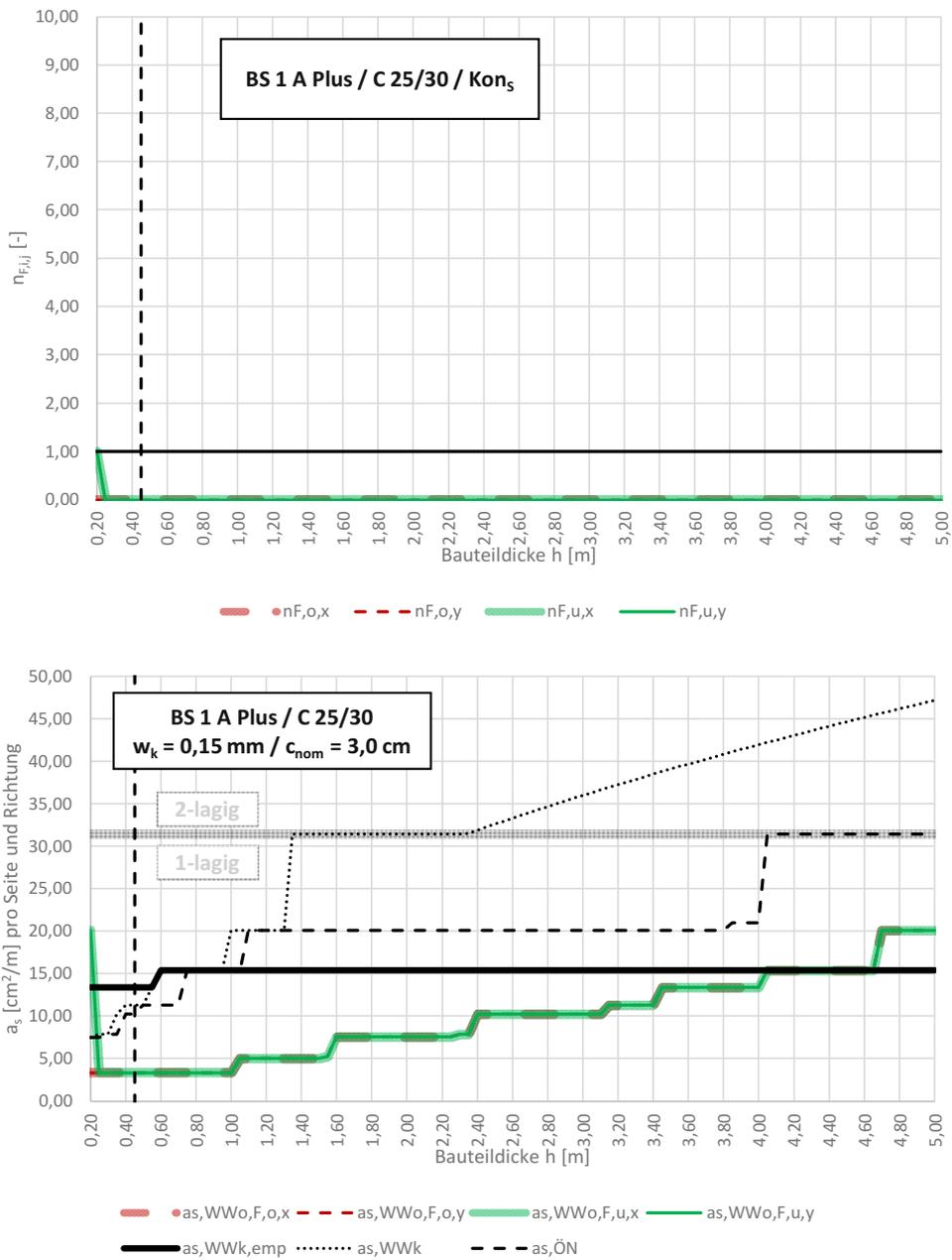
w_{zul}	c_{nom}	f_{yk}	E_s
[mm]	[cm]	[N/mm ²]	[N/mm ²]
0,15	3,00	550,00	200.000



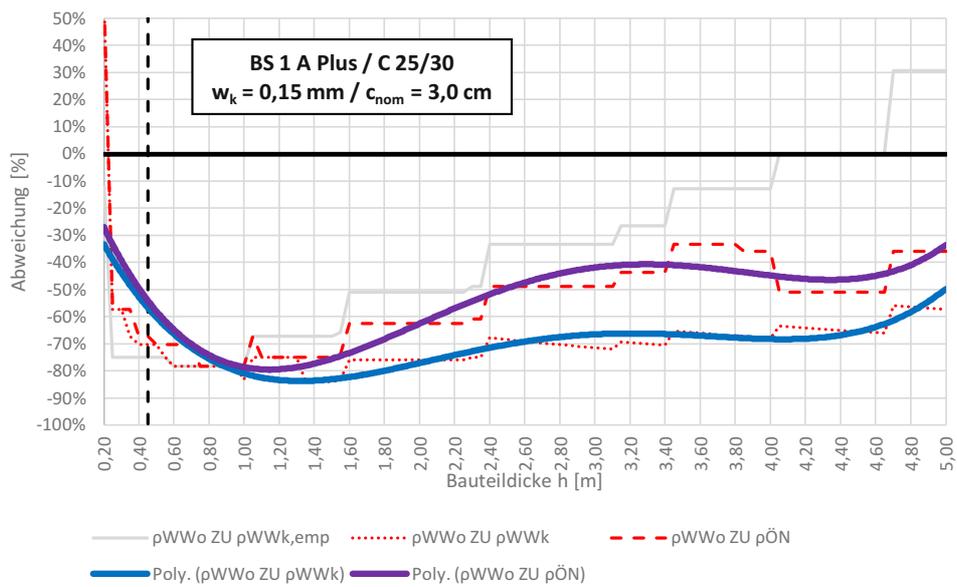
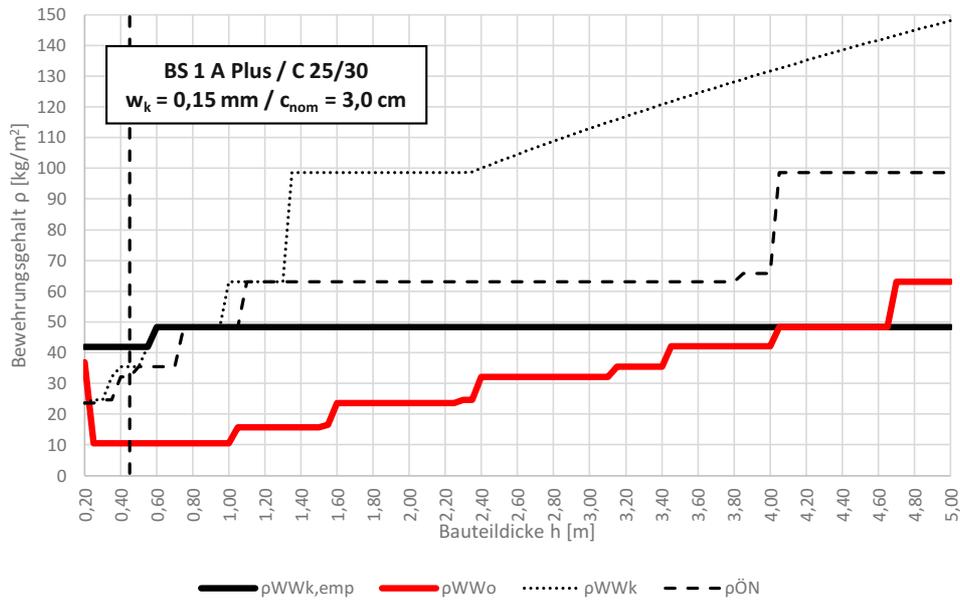
Vergleich der Mindestbewehrung für zentrischen Zwang (Frührissbildung) nach öbv-RL "Weiße Wannen 2018" mit dem Rissbreitennachweis nach ÖNorm und Merkblatt "Weiße Wanne optimiert 2018" & SCHLICKE (2014)



Vergleich der Mindestbewehrung für zentrischen Zwang (Frührissbildung) nach öbv-RL "Weiße Wannen 2018" mit dem Rissbreitennachweis nach ÖNorm und Merkblatt "Weiße Wanne optimiert 2018" & SCHLICKE (2014)



Vergleich der Mindestbewehrung für zentrischen Zwang (Frührissbildung) nach öbv-RL "Weiße Wannen 2018" mit dem Rissbreitennachweis nach ÖNorm und Merkblatt "Weiße Wanne optimiert 2018" & SCHLICKE (2014)

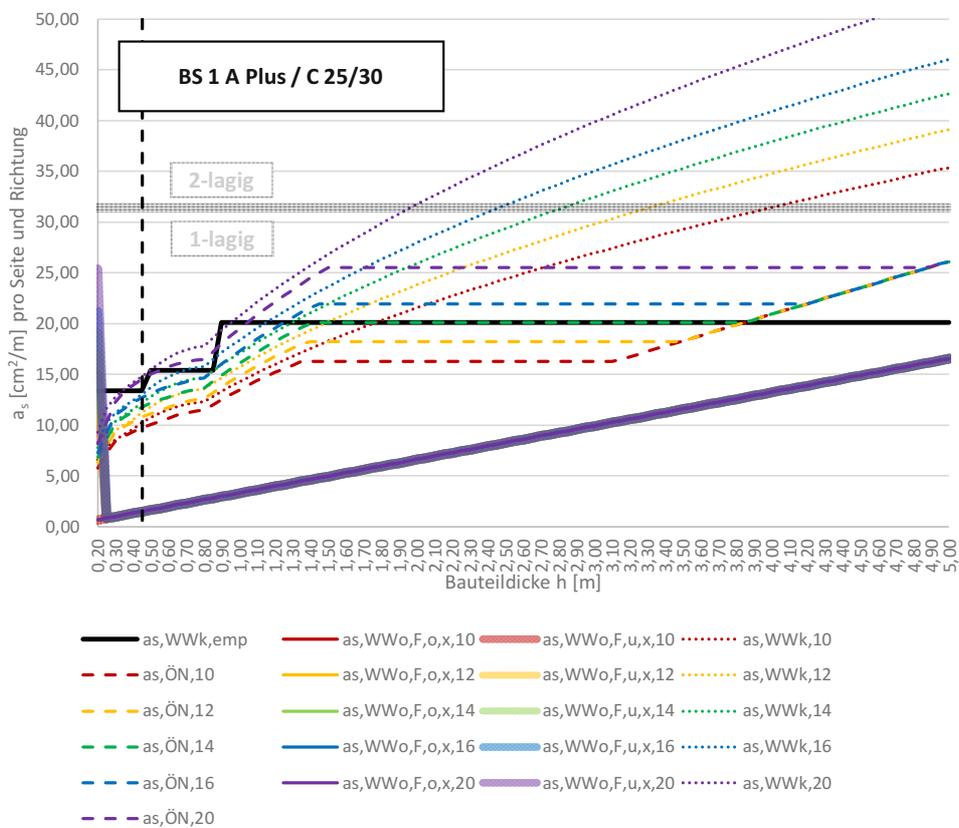


Vergleich der Mindestbewehrung für zentrischen Zwang (Frührissbildung) nach öbv-RL "Weiße Wannen 2018" mit dem Rissbreitennachweis nach ÖNorm und Merkblatt "Weiße Wanne optimiert 2018" & SCHLICKE (2014)

E_B	γ_c	f_{ck}	f_{ctm}	E_{cm}	Q_{max}	S_c	m_{BM}	α_T	NB
[N/mm ²]	[kN/m ³]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[J/g]	[kJ/(°Cm ³)]	[kg/m ³]	[1/K]	[36h/72h]
100,00	25,00	25,51	2,60	31.622,08	300,52	2.400,00	315,00	0,000010	72,00
(ÖN, bezogen auf f_{ck} :		25,00	2,56	31.475,81					
(ÖN, bezogen auf f_{ctm} :		25,51	2,60	31.622,08					
(ÖN, bezogen auf E_{cm} :		25,51	2,60	31.622,08					

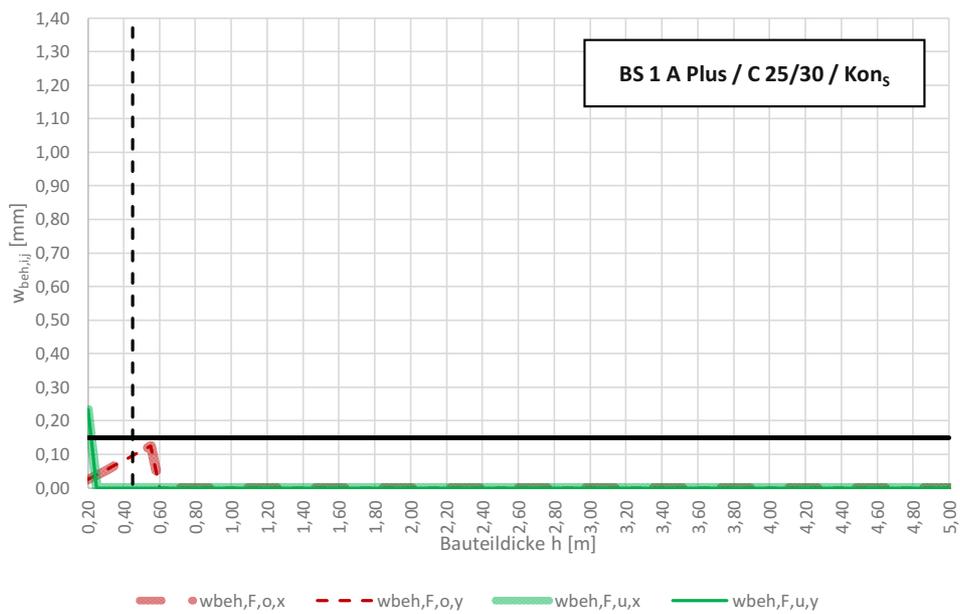
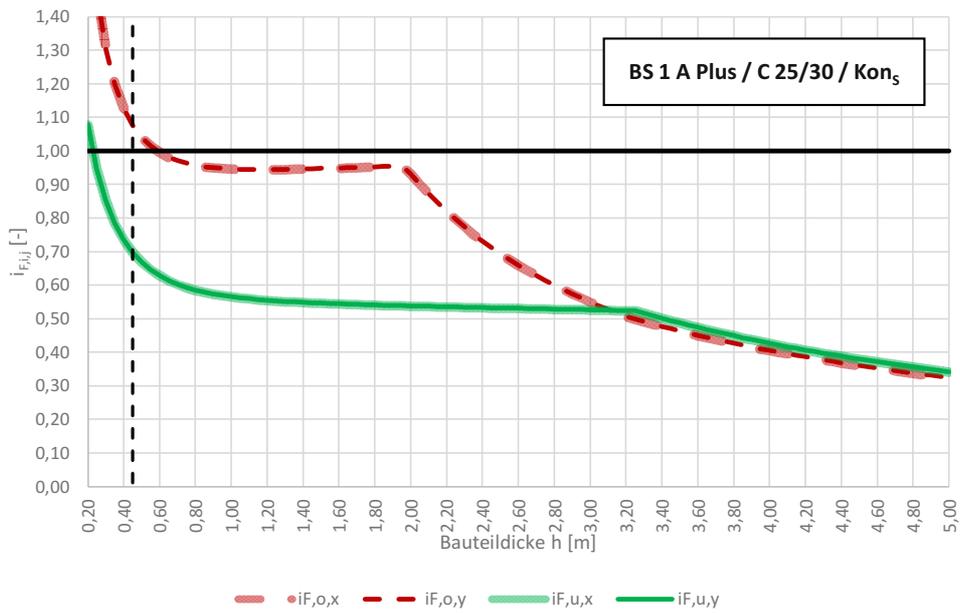
$\Delta T_{Q,max}$	ΔT_{nom}	$\Delta T_{a,var}$	$L_{F,x}$	$L_{F,y}$	$L_{F,x,eff}$	$L_{F,y,eff}$	$A_{B,eff,x}$	$A_{B,eff,y}$
[°C]	[°C]	[°C]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m ²]	[m ²]
39,44	5,00	10,00	15,00	15,00	7,50	7,50	105,00	105,00

w_{zul}	c_{nom}	f_{yk}	E_s
[mm]	[cm]	[N/mm ²]	[N/mm ²]
0,15	4,00	550,00	200.000

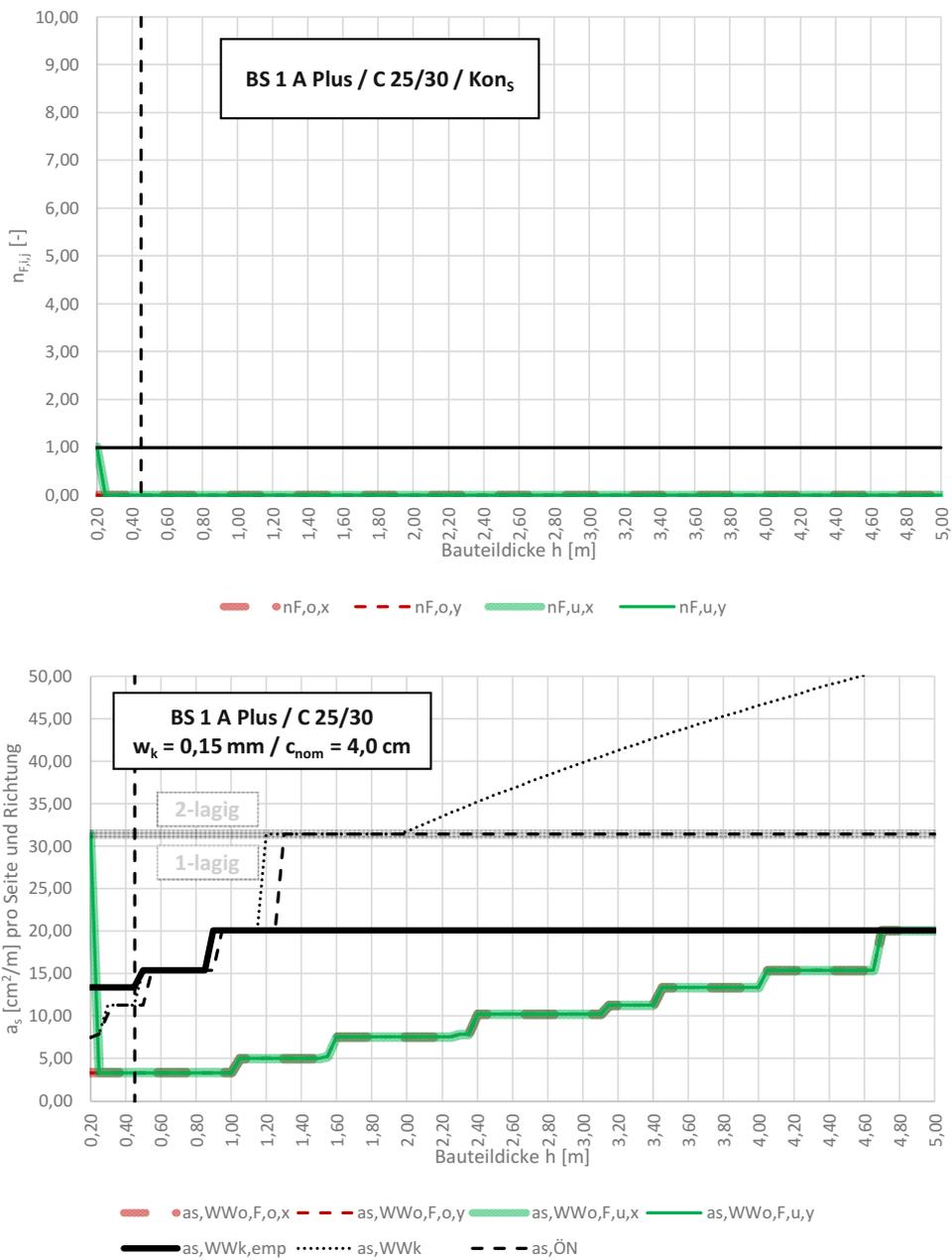


Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

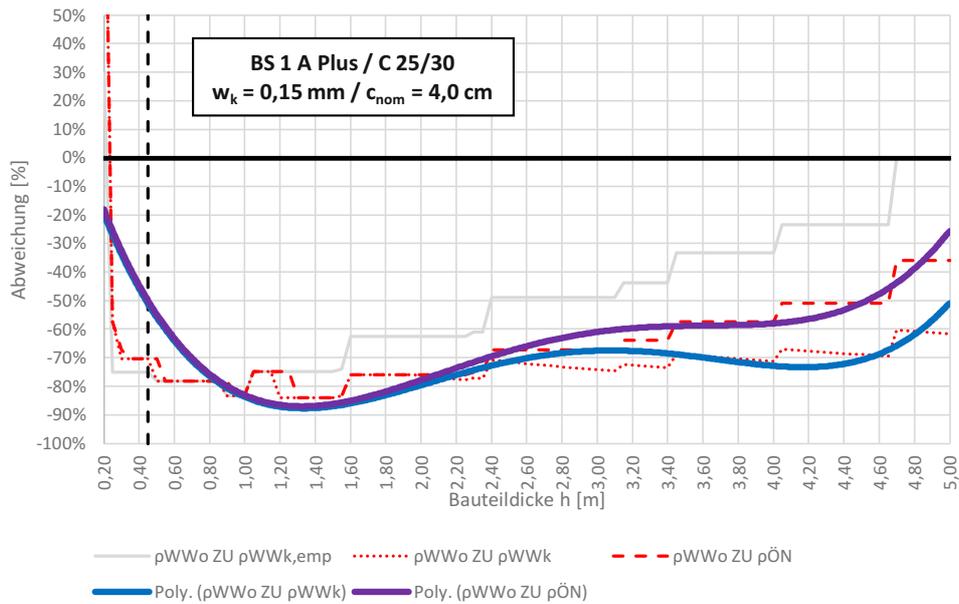
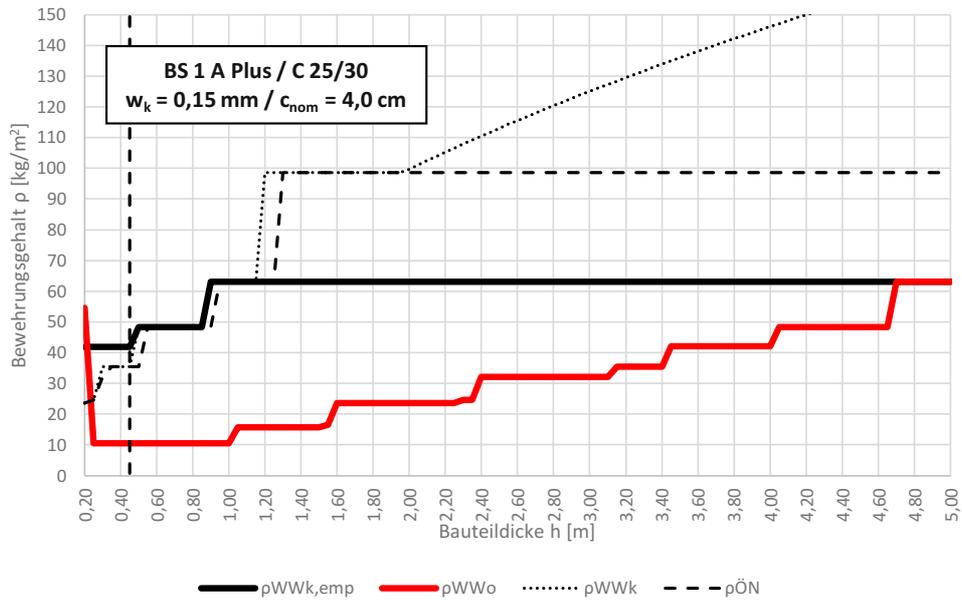
Vergleich der Mindestbewehrung für zentrischen Zwang (Frührissbildung) nach öbv-RL "Weiße Wannen 2018" mit dem Rissbreitennachweis nach ÖNorm und Merkblatt "Weiße Wanne optimiert 2018" & SCHLICKE (2014)



Vergleich der Mindestbewehrung für zentrischen Zwang (Frührissbildung) nach öbv-RL "Weiße Wannen 2018" mit dem Rissbreitennachweis nach ÖNorm und Merkblatt "Weiße Wanne optimiert 2018" & SCHLICKE (2014)



Vergleich der Mindestbewehrung für zentrischen Zwang (Frührissbildung) nach öbv-RL "Weiße Wannen 2018" mit dem Rissbreitennachweis nach ÖNorm und Merkblatt "Weiße Wanne optimiert 2018" & SCHLICKE (2014)

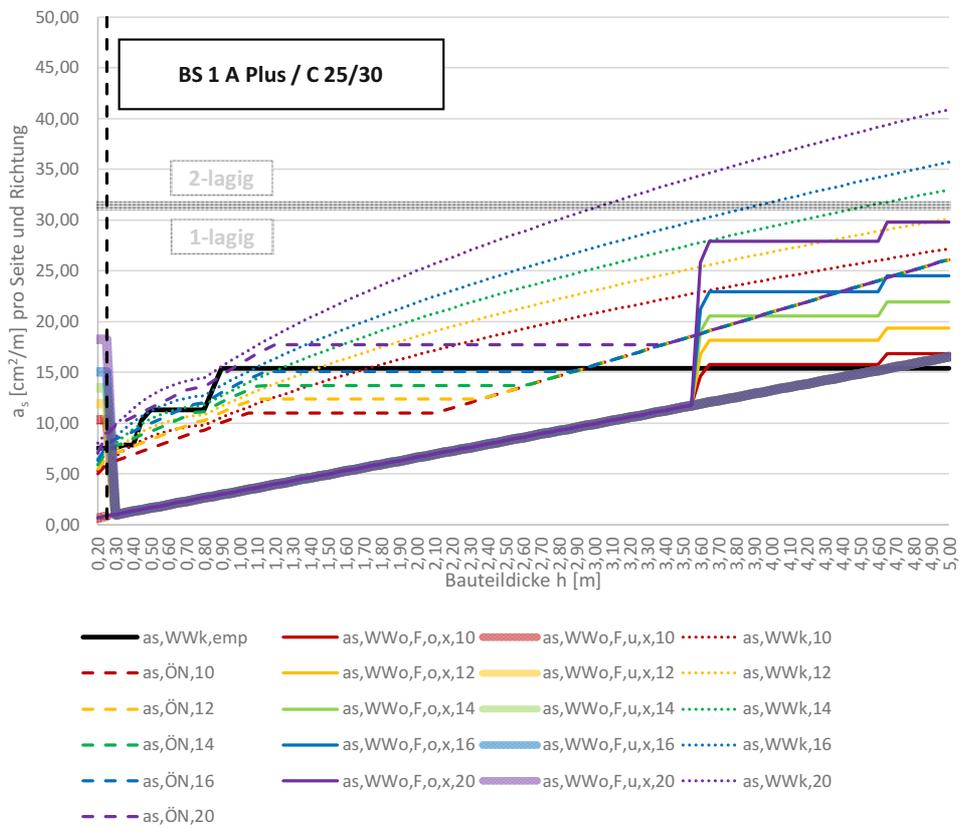


Vergleich der Mindestbewehrung für zentrischen Zwang (Frührissbildung) nach öbv-RL "Weiße Wannen 2018" mit dem Rissbreitennachweis nach ÖNorm und Merkblatt "Weiße Wanne optimiert 2018" & SCHLICKE (2014)

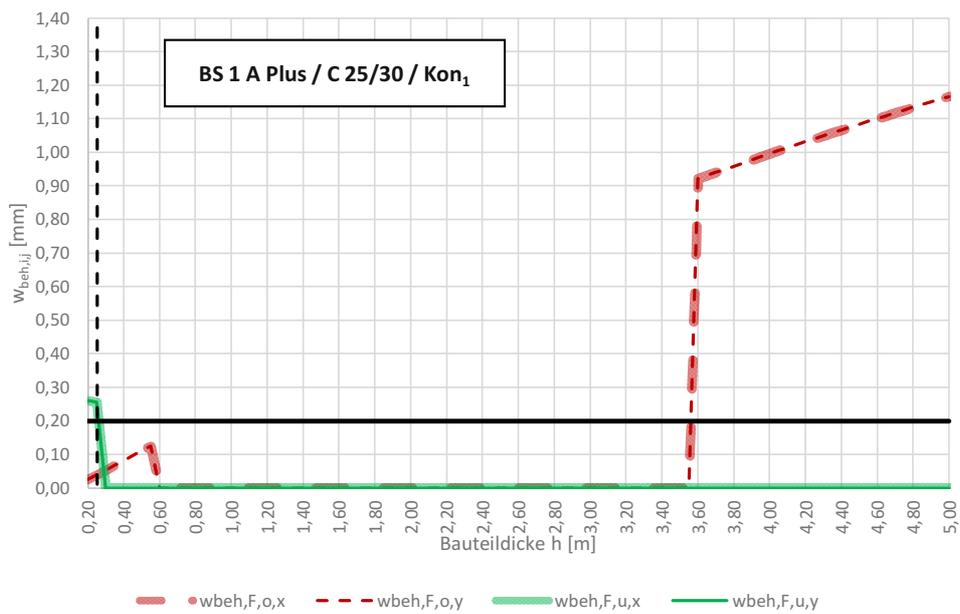
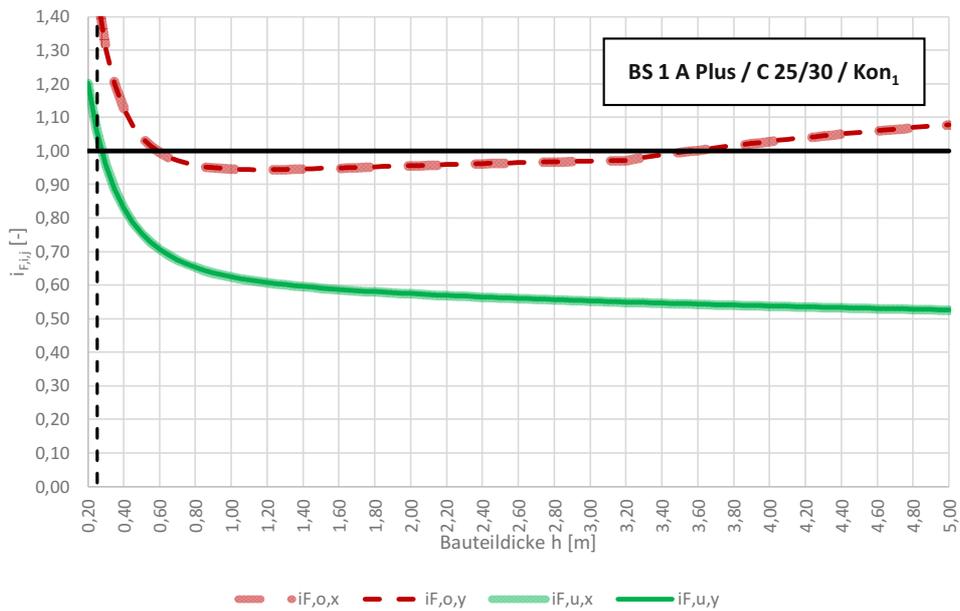
E_B	γ_c	f_{ck}	f_{ctm}	E_{cm}	Q_{max}	S_c	m_{BM}	α_T	NB
[N/mm ²]	[kN/m ³]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[J/g]	[kJ/(°Cm ³)]	[kg/m ³]	[1/K]	[36h/72h]
100,00	25,00	25,51	2,60	31.622,08	300,52	2.400,00	315,00	0,000010	72,00
(ÖN, bezogen auf f_{ck} :		25,00	2,56	31.475,81)					
(ÖN, bezogen auf f_{ctm} :		25,51	2,60	31.622,08)					
(ÖN, bezogen auf E_{cm} :		25,51	2,60	31.622,08)					

$\Delta T_{Q,max}$	ΔT_{nom}	$\Delta T_{a,var}$	$L_{F,x}$	$L_{F,y}$	$L_{F,x,eff}$	$L_{F,y,eff}$	$A_{B,eff,x}$	$A_{B,eff,y}$
[°C]	[°C]	[°C]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m ²]	[m ²]
39,44	5,00	10,00	30,00	30,00	15,00	15,00	420,00	420,00

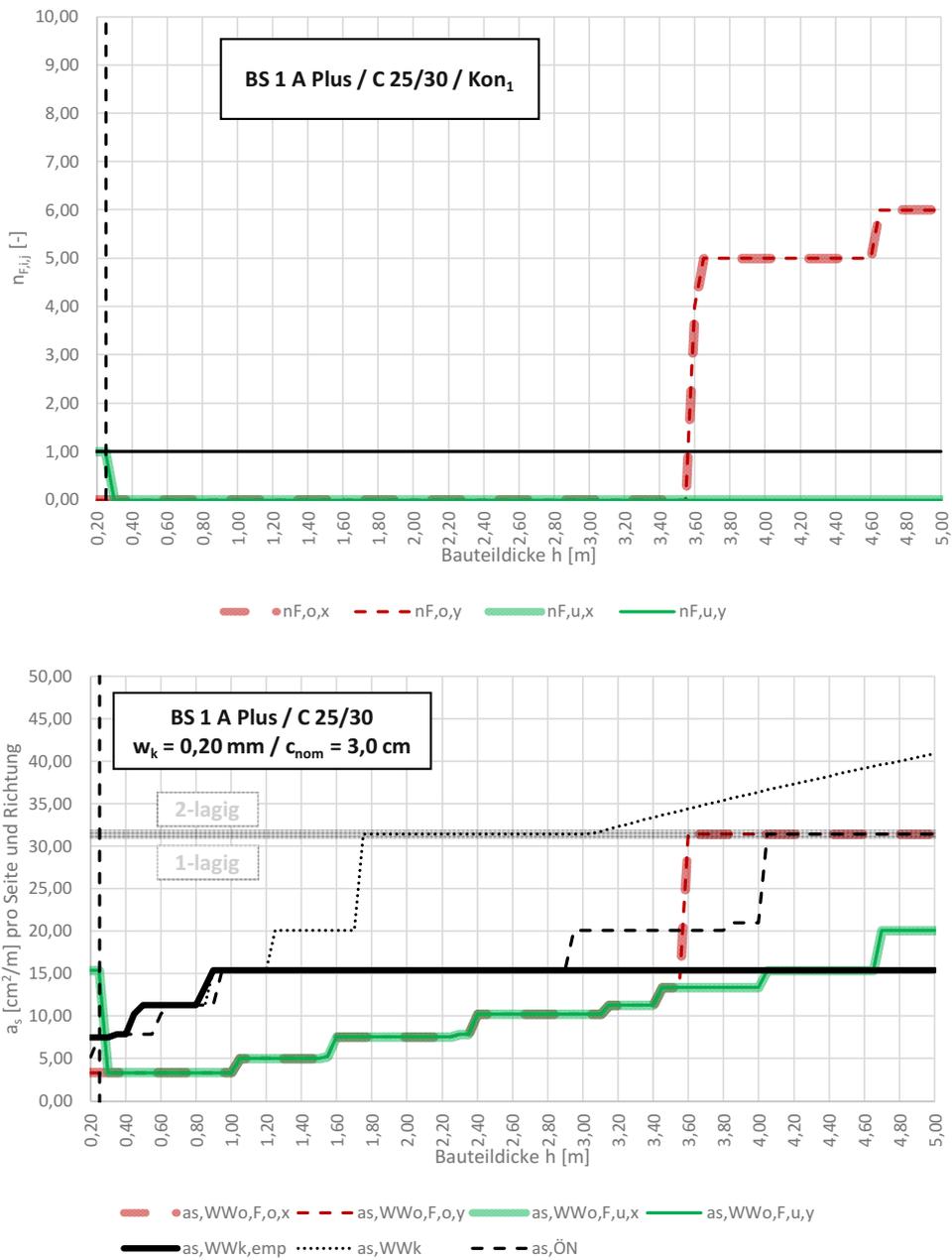
w_{zul}	c_{nom}	f_{yk}	E_s
[mm]	[cm]	[N/mm ²]	[N/mm ²]
0,20	3,00	550,00	200.000



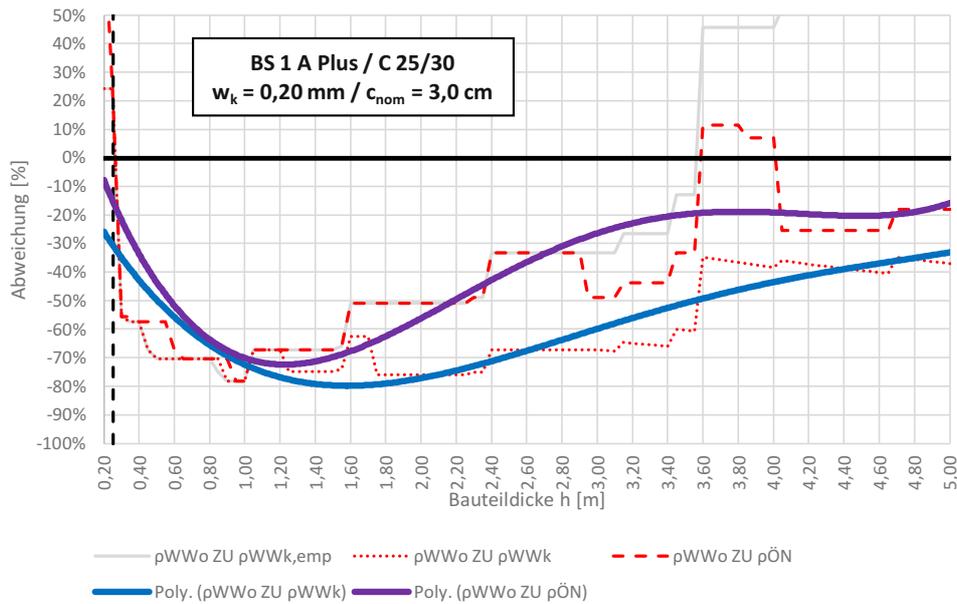
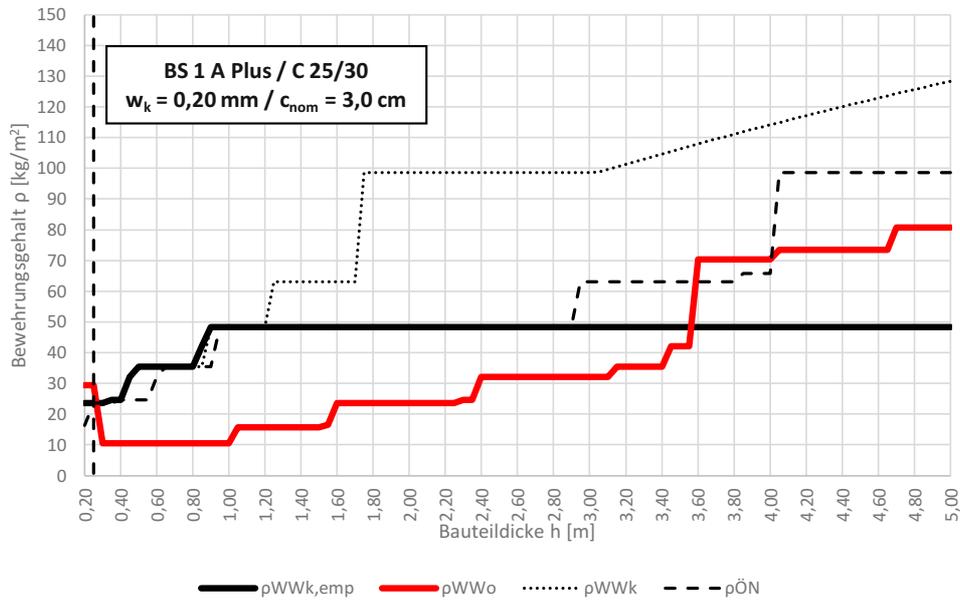
Vergleich der Mindestbewehrung für zentrischen Zwang (Frührissbildung) nach öbv-RL "Weiße Wannen 2018" mit dem Rissbreitennachweis nach ÖNorm und Merkblatt "Weiße Wanne optimiert 2018" & SCHLICKE (2014)



Vergleich der Mindestbewehrung für zentrischen Zwang (Frührissbildung) nach öbv-RL "Weiße Wannen 2018" mit dem Rissbreitennachweis nach ÖNorm und Merkblatt "Weiße Wanne optimiert 2018" & SCHLICKE (2014)



Vergleich der Mindestbewehrung für zentrischen Zwang (Frührissbildung) nach öbv-RL "Weiße Wannen 2018" mit dem Rissbreitennachweis nach ÖNorm und Merkblatt "Weiße Wanne optimiert 2018" & SCHLICKE (2014)

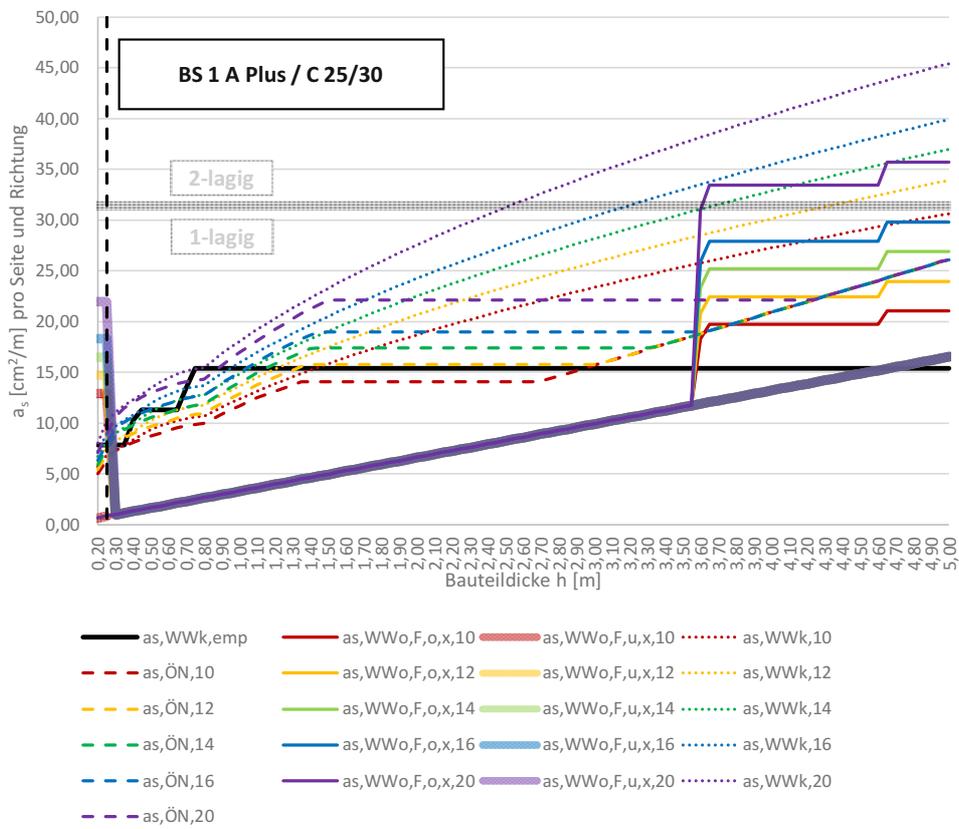


Vergleich der Mindestbewehrung für zentrischen Zwang (Frührissbildung) nach öbv-RL "Weiße Wannen 2018" mit dem Rissbreitennachweis nach ÖNorm und Merkblatt "Weiße Wanne optimiert 2018" & SCHLICKE (2014)

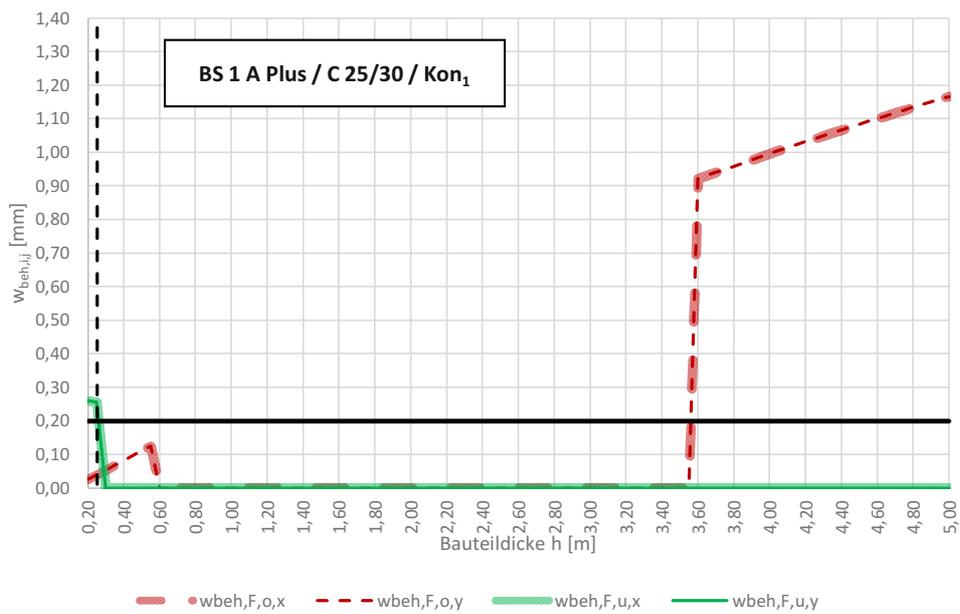
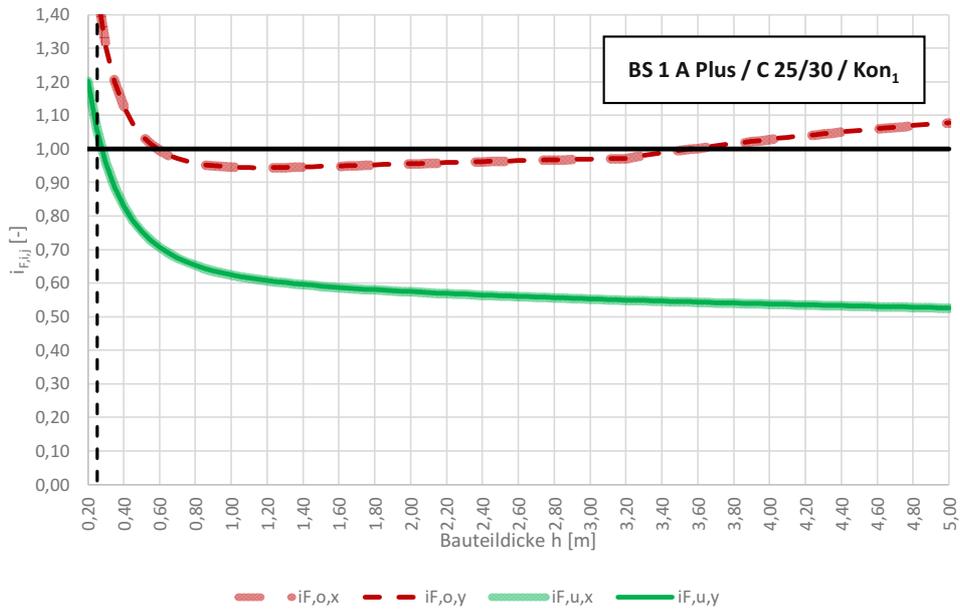
E_B	γ_c	f_{ck}	f_{ctm}	E_{cm}	Q_{max}	S_c	m_{BM}	α_T	NB
[N/mm ²]	[kN/m ³]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[J/g]	[kJ/(°Cm ³)]	[kg/m ³]	[1/K]	[36h/72h]
100,00	25,00	25,51	2,60	31.622,08	300,52	2.400,00	315,00	0,000010	72,00
(ÖN, bezogen auf f_{ck} :		25,00	2,56	31.475,81)					
(ÖN, bezogen auf f_{ctm} :		25,51	2,60	31.622,08)					
(ÖN, bezogen auf E_{cm} :		25,51	2,60	31.622,08)					

$\Delta T_{Q,max}$	ΔT_{nom}	$\Delta T_{a,var}$	$L_{F,x}$	$L_{F,y}$	$L_{F,x,eff}$	$L_{F,y,eff}$	$A_{B,eff,x}$	$A_{B,eff,y}$
[°C]	[°C]	[°C]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m ²]	[m ²]
39,44	5,00	10,00	30,00	30,00	15,00	15,00	420,00	420,00

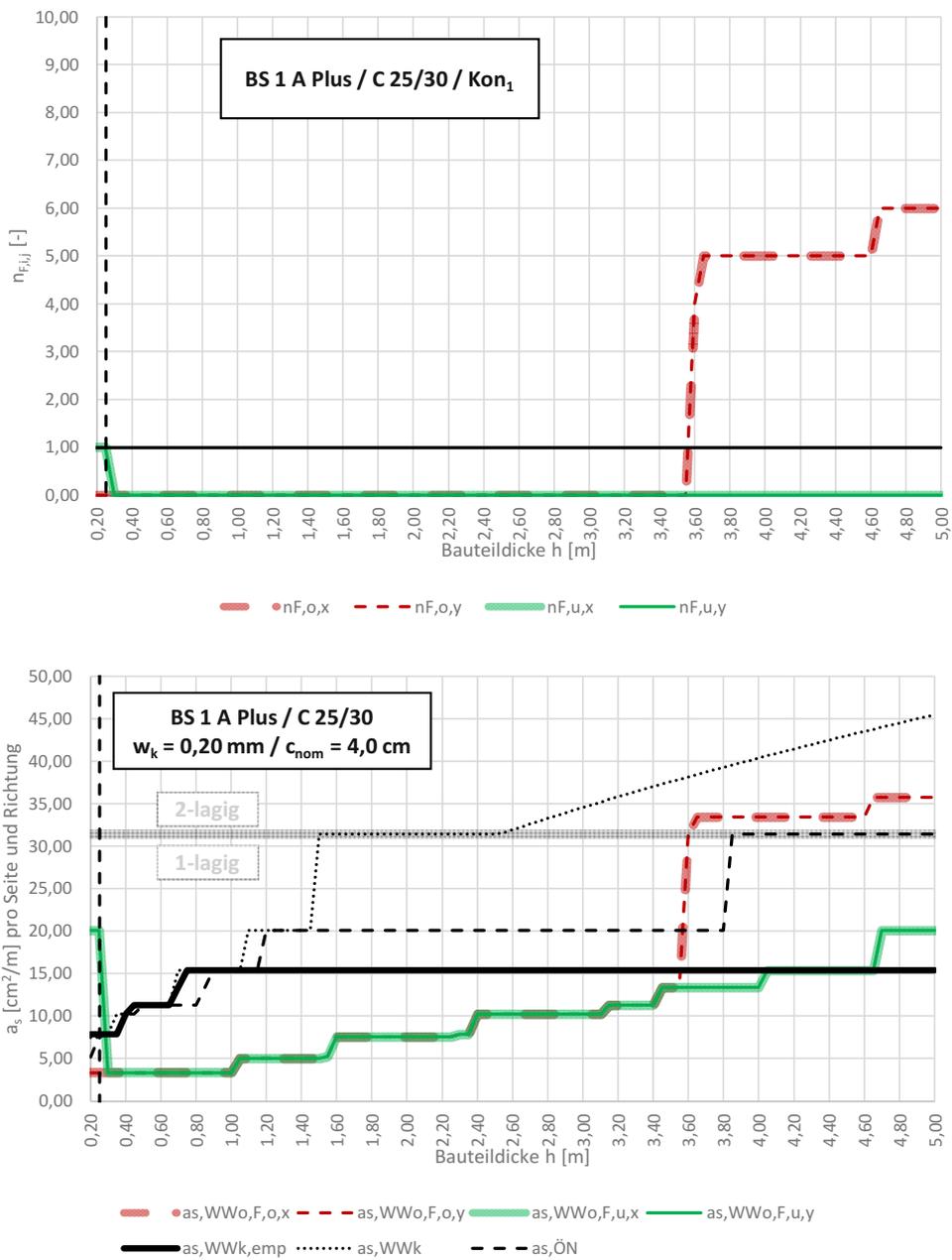
w_{zul}	c_{nom}	f_{yk}	E_s
[mm]	[cm]	[N/mm ²]	[N/mm ²]
0,20	4,00	550,00	200.000



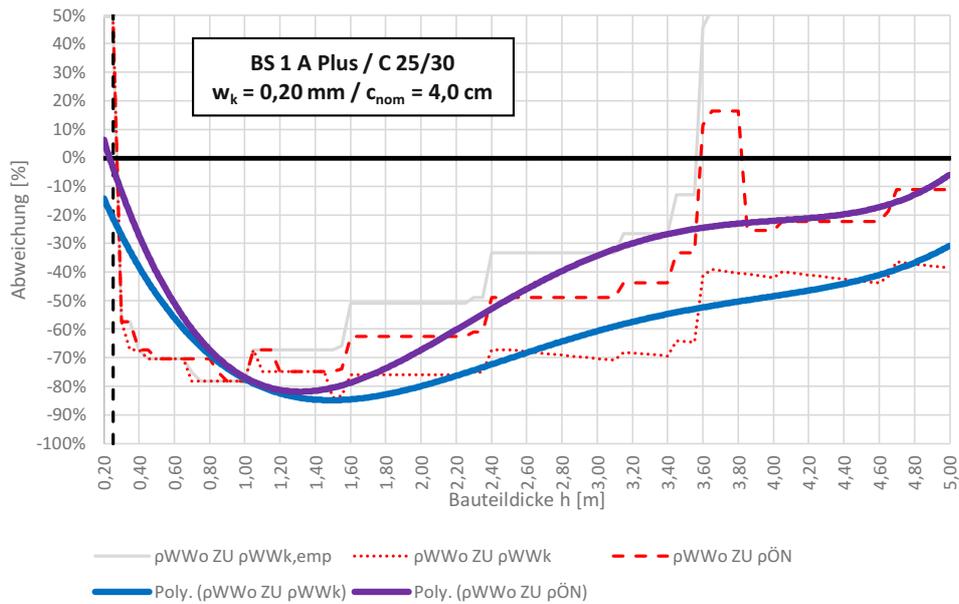
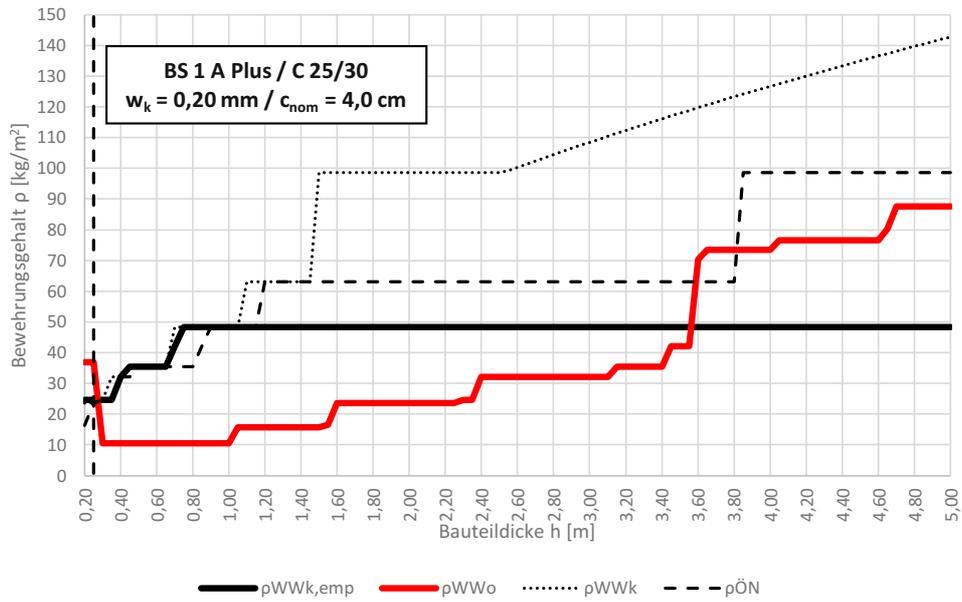
Vergleich der Mindestbewehrung für zentrischen Zwang (Frührissbildung) nach öbv-RL "Weiße Wannen 2018" mit dem Rissbreitennachweis nach ÖNorm und Merkblatt "Weiße Wanne optimiert 2018" & SCHLICKE (2014)



Vergleich der Mindestbewehrung für zentrischen Zwang (Frührissbildung) nach öbv-RL "Weiße Wannen 2018" mit dem Rissbreitennachweis nach ÖNorm und Merkblatt "Weiße Wanne optimiert 2018" & SCHLICKE (2014)



Vergleich der Mindestbewehrung für zentrischen Zwang (Frührissbildung) nach öbv-RL "Weiße Wannen 2018" mit dem Rissbreitennachweis nach ÖNorm und Merkblatt "Weiße Wanne optimiert 2018" & SCHLICKE (2014)

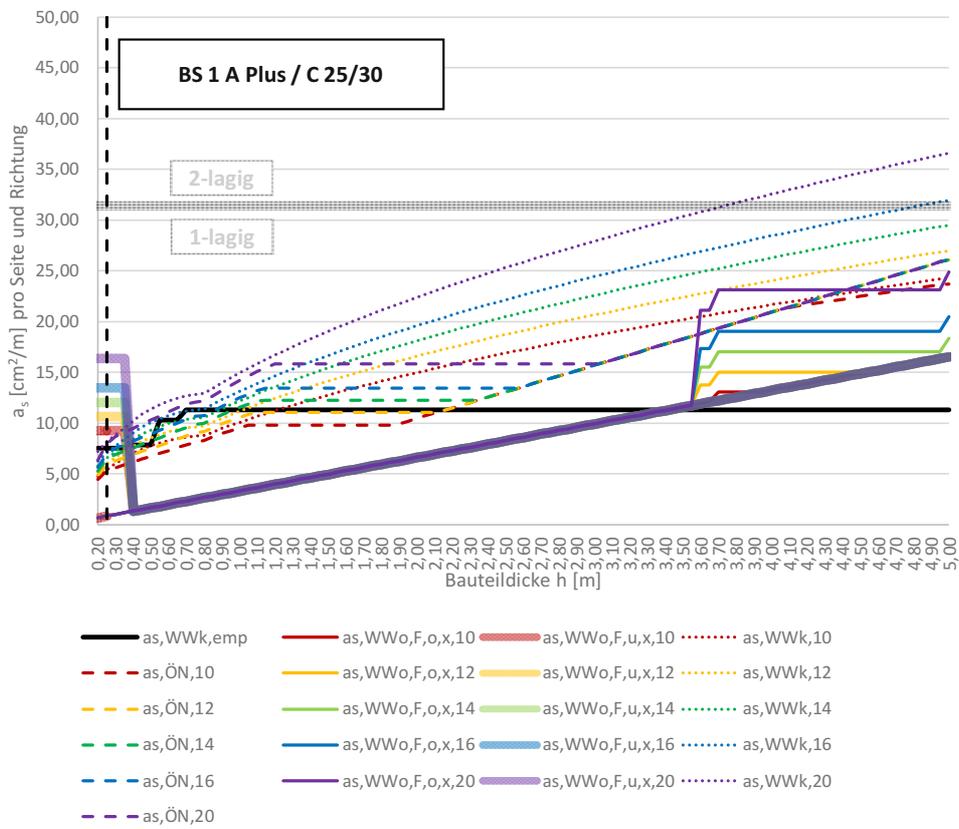


Vergleich der Mindestbewehrung für zentrischen Zwang (Frührissbildung) nach öbv-RL "Weiße Wannen 2018" mit dem Rissbreitennachweis nach ÖNorm und Merkblatt "Weiße Wanne optimiert 2018" & SCHLICKE (2014)

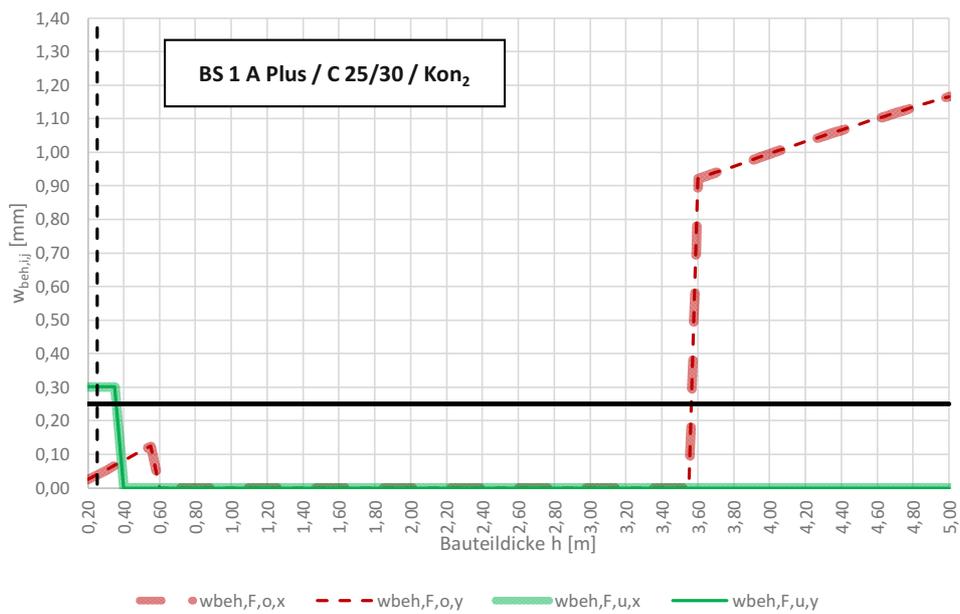
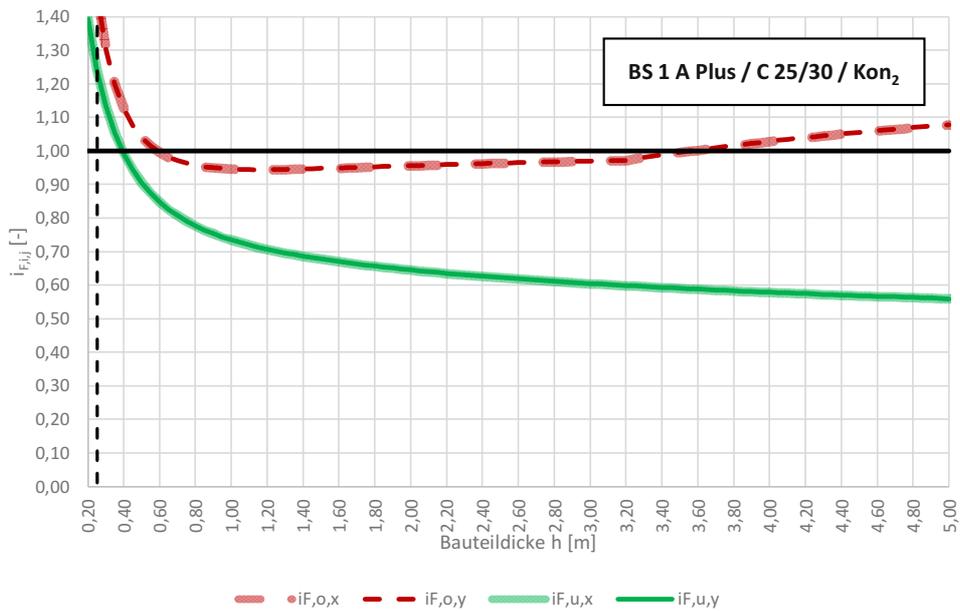
E_B	γ_c	f_{ck}	f_{ctm}	E_{cm}	Q_{max}	S_c	m_{BM}	α_T	NB
[N/mm ²]	[kN/m ³]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[J/g]	[kJ/(°Cm ³)]	[kg/m ³]	[1/K]	[36h/72h]
100,00	25,00	25,51	2,60	31.622,08	300,52	2.400,00	315,00	0,000010	72,00
(ÖN, bezogen auf f_{ck} :		25,00	2,56	31.475,81)					
(ÖN, bezogen auf f_{ctm} :		25,51	2,60	31.622,08)					
(ÖN, bezogen auf E_{cm} :		25,51	2,60	31.622,08)					

$\Delta T_{Q,max}$	ΔT_{nom}	$\Delta T_{a,var}$	$L_{F,x}$	$L_{F,y}$	$L_{F,x,eff}$	$L_{F,y,eff}$	$A_{B,eff,x}$	$A_{B,eff,y}$
[°C]	[°C]	[°C]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m ²]	[m ²]
39,44	5,00	10,00	60,00	60,00	30,00	30,00	1.680,00	1.680,00

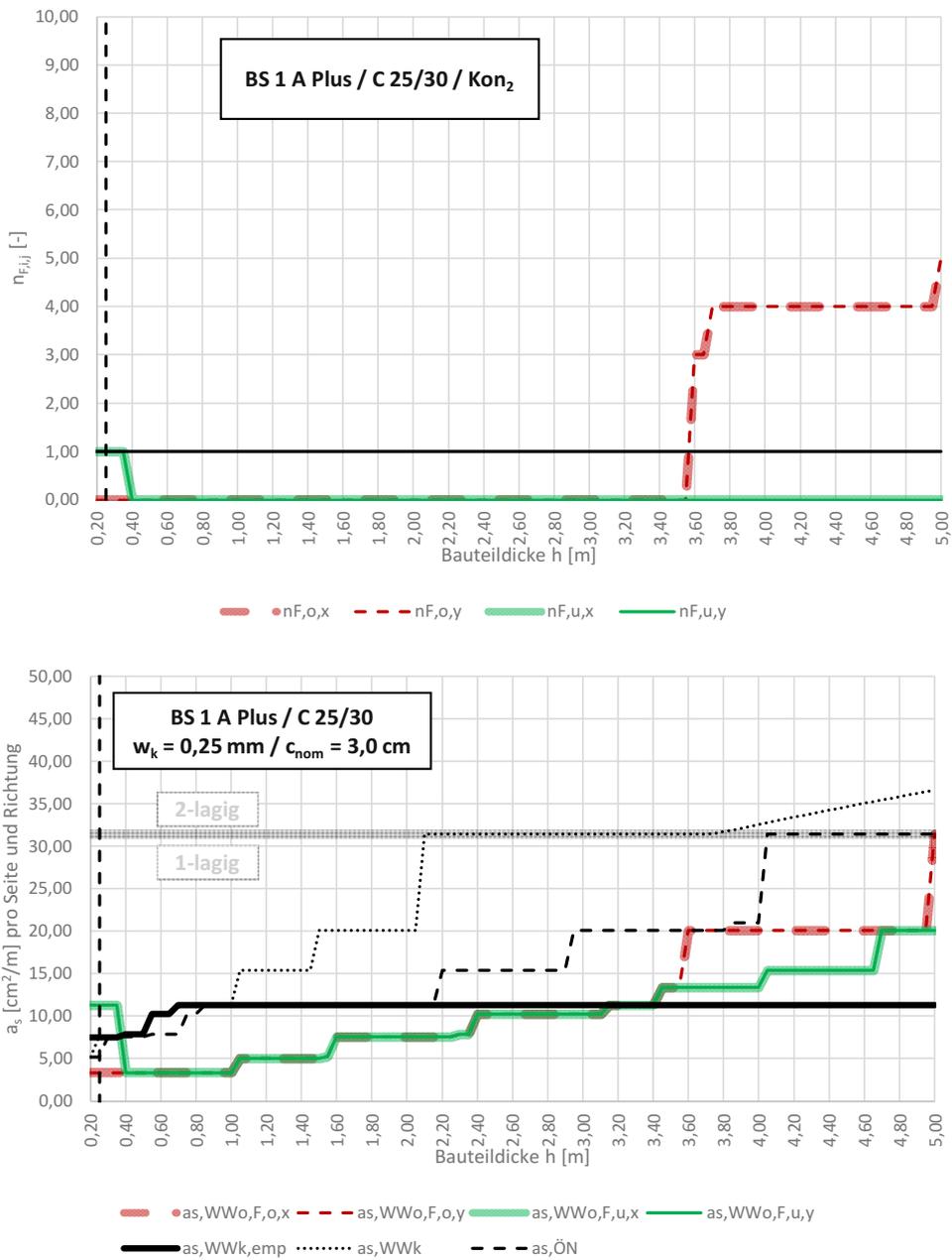
w_{zul}	c_{nom}	f_{yk}	E_s
[mm]	[cm]	[N/mm ²]	[N/mm ²]
0,25	3,00	550,00	200.000



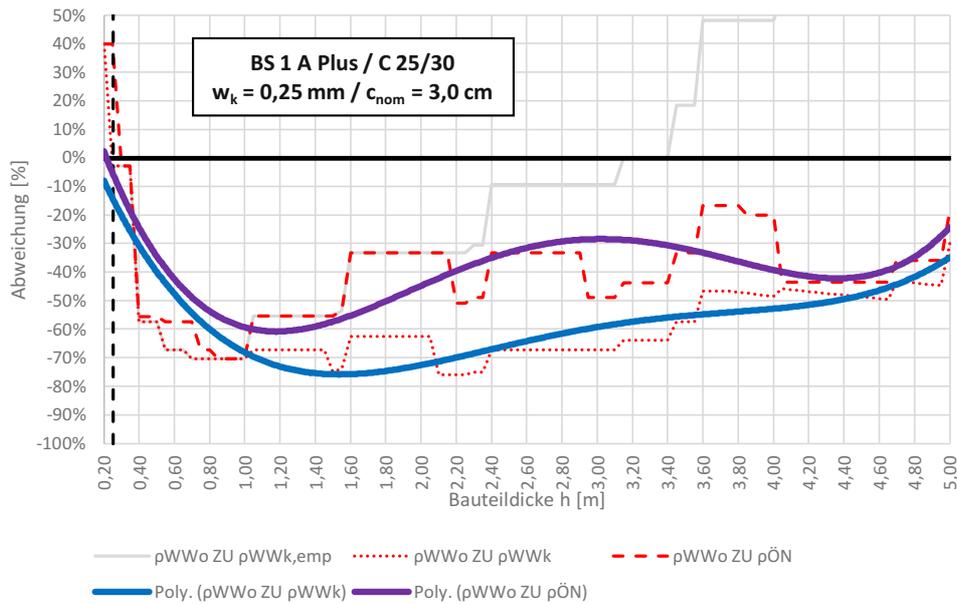
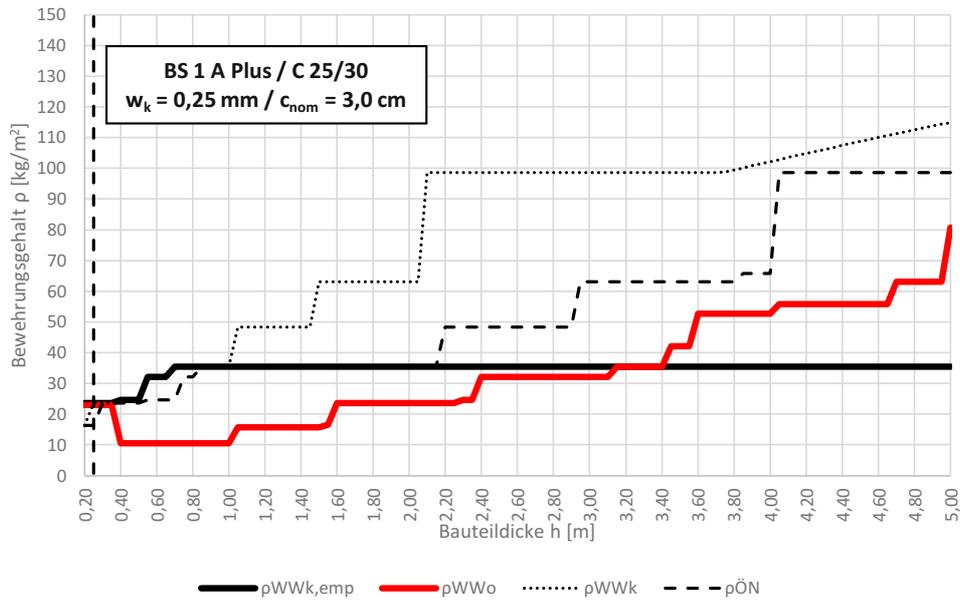
Vergleich der Mindestbewehrung für zentrischen Zwang (Frührissbildung) nach öbv-RL "Weiße Wannen 2018" mit dem Rissbreitennachweis nach ÖNorm und Merkblatt "Weiße Wanne optimiert 2018" & SCHLICKE (2014)



Vergleich der Mindestbewehrung für zentrischen Zwang (Frührissbildung) nach öbv-RL "Weiße Wannen 2018" mit dem Rissbreitennachweis nach ÖNorm und Merkblatt "Weiße Wanne optimiert 2018" & SCHLICKE (2014)



Vergleich der Mindestbewehrung für zentrischen Zwang (Frührissbildung) nach öbv-RL "Weiße Wannen 2018" mit dem Rissbreitennachweis nach ÖNorm und Merkblatt "Weiße Wanne optimiert 2018" & SCHLICKE (2014)

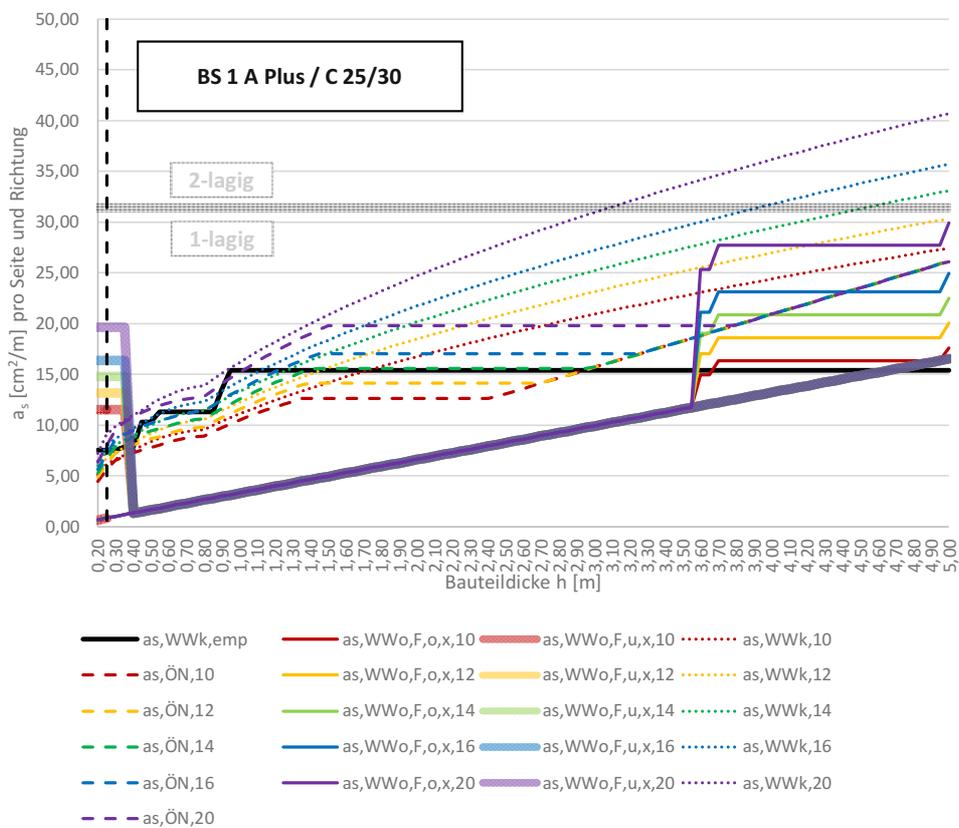


Vergleich der Mindestbewehrung für zentrischen Zwang (Frührissbildung) nach öbv-RL "Weiße Wannen 2018" mit dem Rissbreitennachweis nach ÖNorm und Merkblatt "Weiße Wanne optimiert 2018" & SCHLICKE (2014)

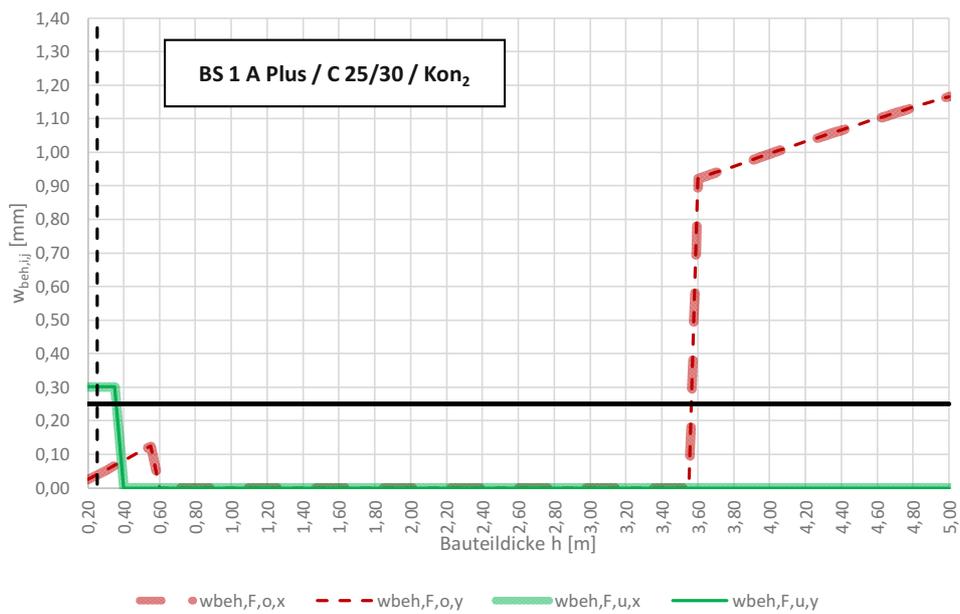
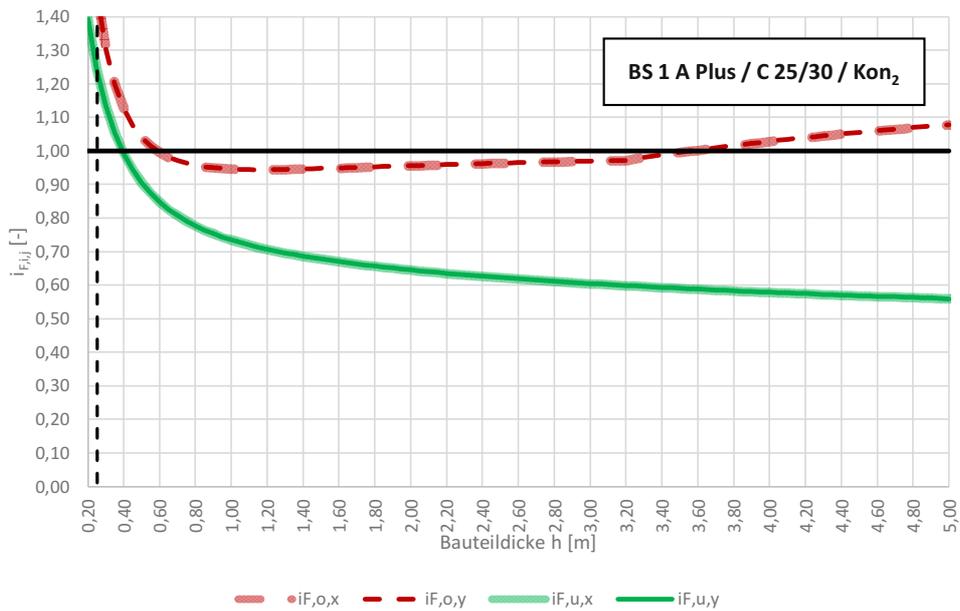
E_B	γ_c	f_{ck}	f_{ctm}	E_{cm}	Q_{max}	S_c	m_{BM}	α_T	NB
[N/mm ²]	[kN/m ³]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[J/g]	[kJ/(°Cm ³)]	[kg/m ³]	[1/K]	[36h/72h]
100,00	25,00	25,51	2,60	31.622,08	300,52	2.400,00	315,00	0,000010	72,00
(ÖN, bezogen auf f_{ck} :		25,00	2,56	31.475,81)					
(ÖN, bezogen auf f_{ctm} :		25,51	2,60	31.622,08)					
(ÖN, bezogen auf E_{cm} :		25,51	2,60	31.622,08)					

$\Delta T_{Q,max}$	ΔT_{nom}	$\Delta T_{a,var}$	$L_{F,x}$	$L_{F,y}$	$L_{F,x,eff}$	$L_{F,y,eff}$	$A_{B,eff,x}$	$A_{B,eff,y}$
[°C]	[°C]	[°C]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m ²]	[m ²]
39,44	5,00	10,00	60,00	60,00	30,00	30,00	1.680,00	1.680,00

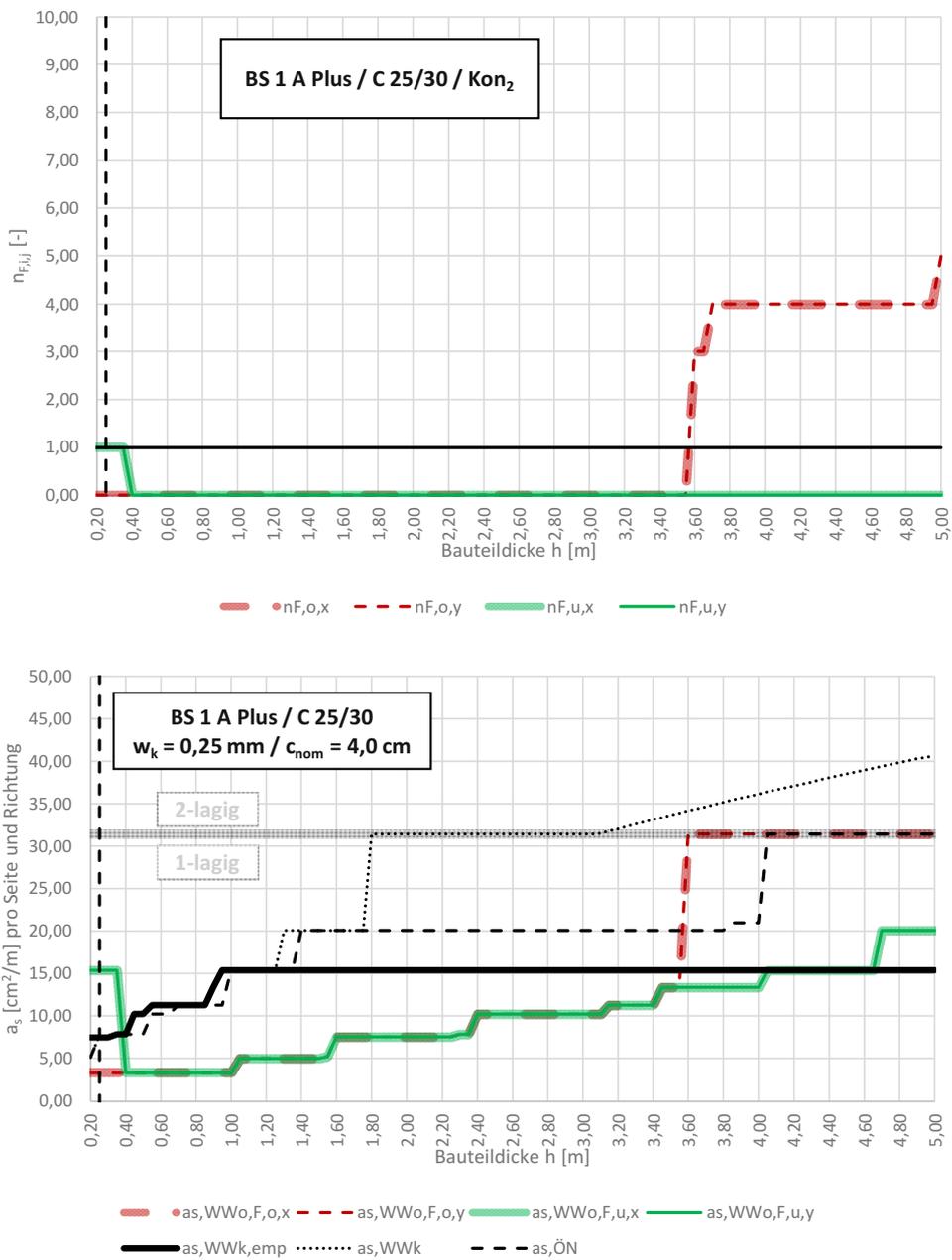
w_{zul}	c_{nom}	f_{yk}	E_s
[mm]	[cm]	[N/mm ²]	[N/mm ²]
0,25	4,00	550,00	200.000



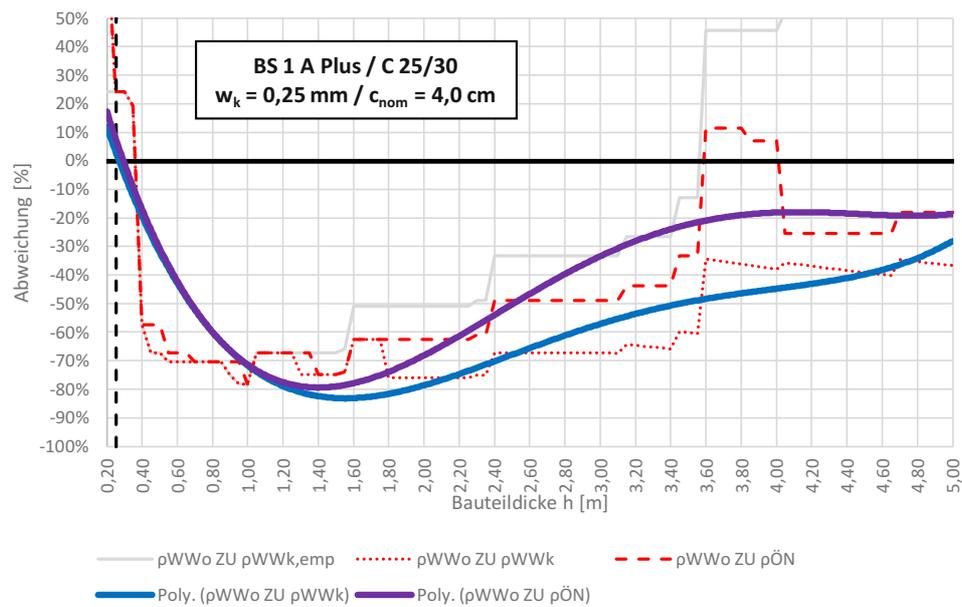
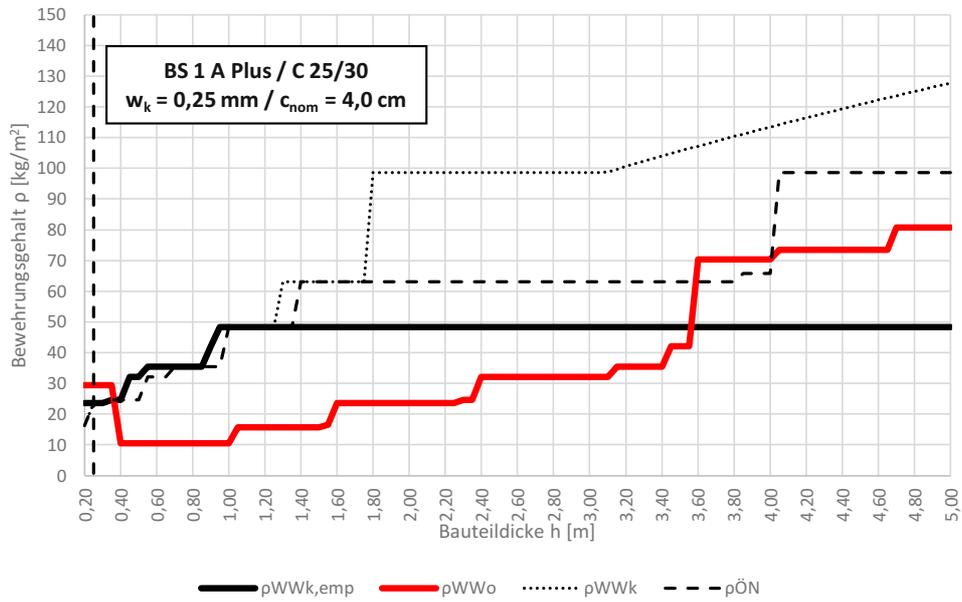
Vergleich der Mindestbewehrung für zentrischen Zwang (Frührissbildung) nach öbv-RL "Weiße Wannen 2018" mit dem Rissbreitennachweis nach ÖNorm und Merkblatt "Weiße Wanne optimiert 2018" & SCHLICKE (2014)



Vergleich der Mindestbewehrung für zentrischen Zwang (Frührissbildung) nach öbv-RL "Weiße Wannen 2018" mit dem Rissbreitennachweis nach ÖNorm und Merkblatt "Weiße Wanne optimiert 2018" & SCHLICKE (2014)



Vergleich der Mindestbewehrung für zentrischen Zwang (Frührissbildung) nach öbv-RL "Weiße Wannen 2018" mit dem Rissbreitennachweis nach ÖNorm und Merkblatt "Weiße Wanne optimiert 2018" & SCHLICKE (2014)

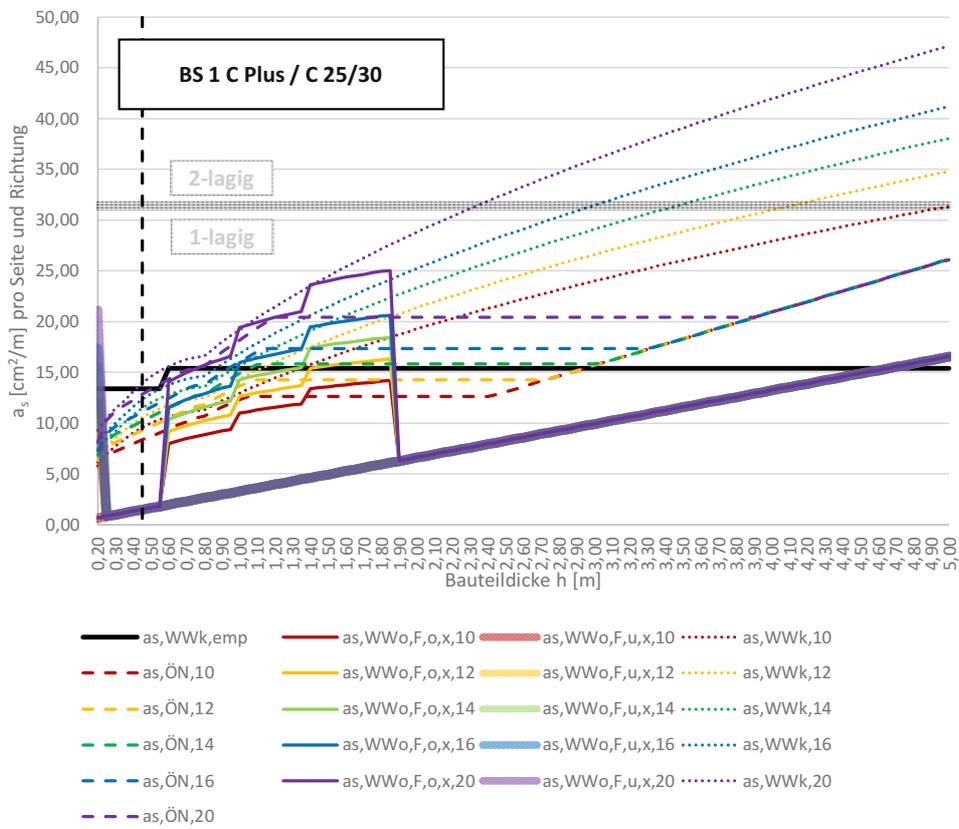


Vergleich der Mindestbewehrung für zentrischen Zwang (Frührissbildung) nach öbv-RL "Weiße Wannen 2018" mit dem Rissbreitennachweis nach ÖNorm und Merkblatt "Weiße Wanne optimiert 2018" & SCHLICKE (2014)

E_B	γ_c	f_{ck}	f_{ctm}	E_{cm}	Q_{max}	S_c	m_{BM}	α_T	NB
[N/mm ²]	[kN/m ³]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[J/g]	[kJ/(°Cm ³)]	[kg/m ³]	[1/K]	[36h/72h]
100,00	25,00	25,51	2,60	31.622,08	300,52	2.400,00	360,00	0,000010	72,00
(ÖN, bezogen auf f_{ck} :		25,00	2,56	31.475,81)					
(ÖN, bezogen auf f_{ctm} :		25,51	2,60	31.622,08)					
(ÖN, bezogen auf E_{cm} :		25,51	2,60	31.622,08)					

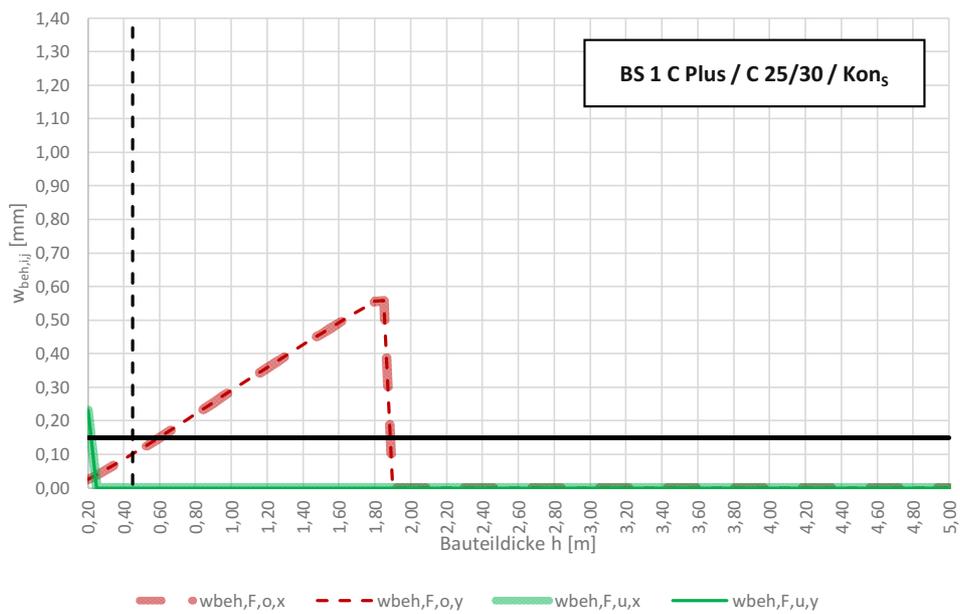
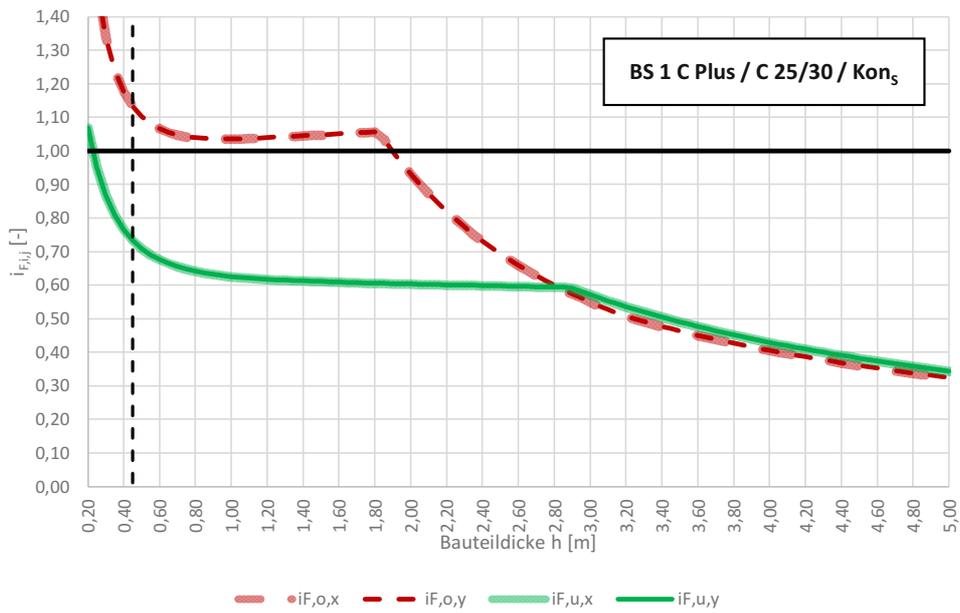
$\Delta T_{Q,max}$	ΔT_{nom}	$\Delta T_{a,var}$	$L_{F,x}$	$L_{F,y}$	$L_{F,x,eff}$	$L_{F,y,eff}$	$A_{B,eff,x}$	$A_{B,eff,y}$
[°C]	[°C]	[°C]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m ²]	[m ²]
45,08	5,00	10,00	15,00	15,00	7,50	7,50	105,00	105,00

w_{zul}	c_{nom}	f_{yk}	E_s
[mm]	[cm]	[N/mm ²]	[N/mm ²]
0,15	3,00	550,00	200.000

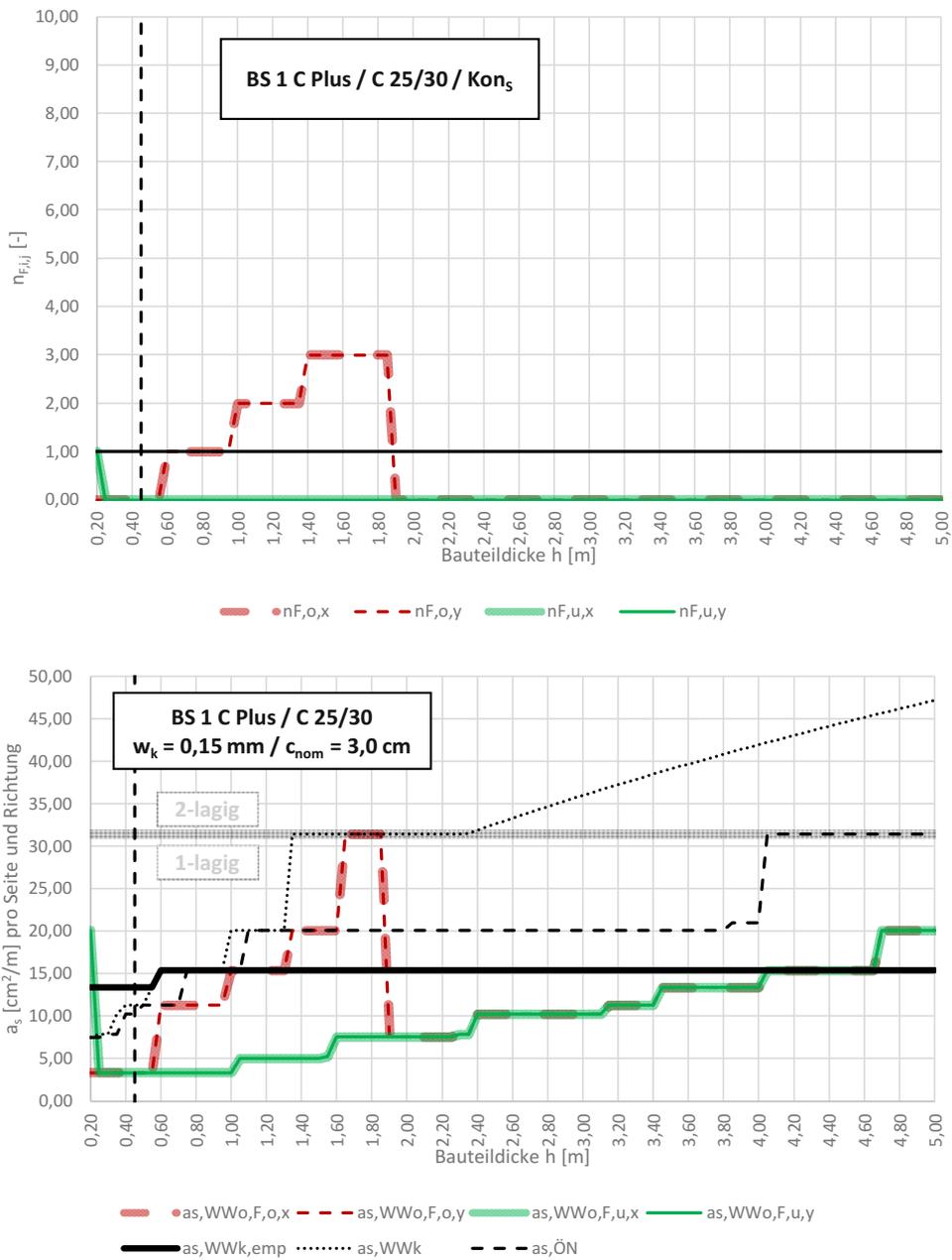


Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar. The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

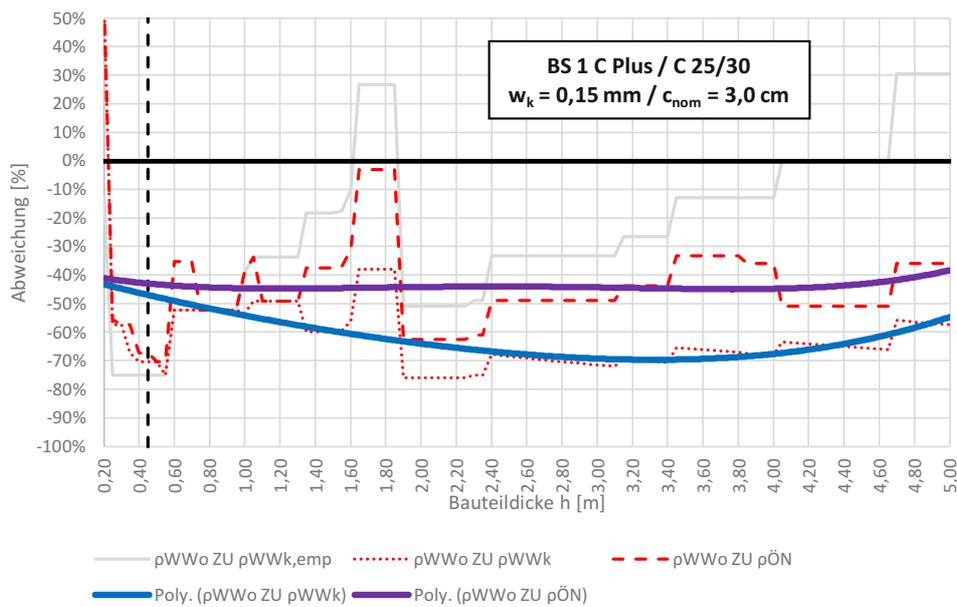
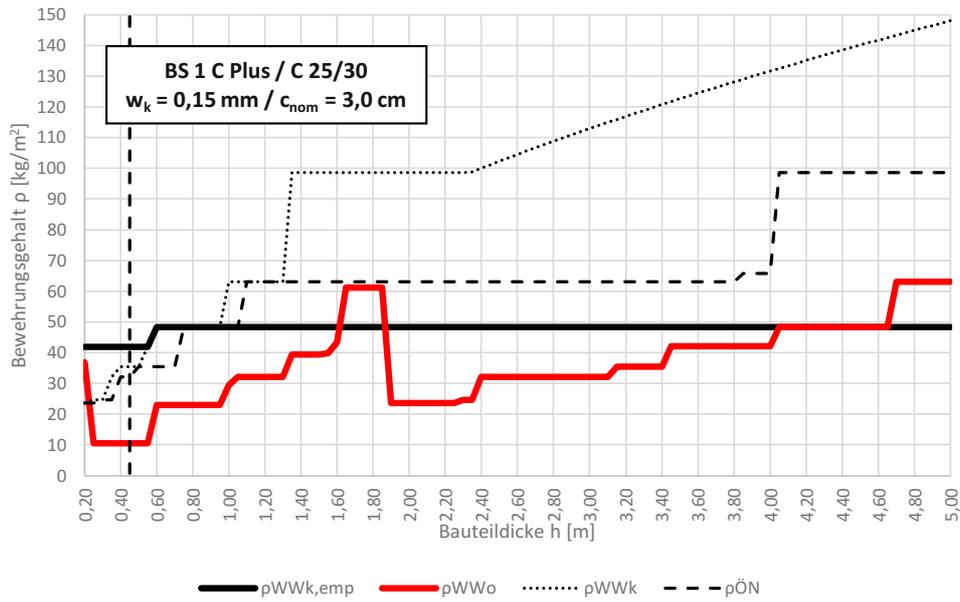
Vergleich der Mindestbewehrung für zentrischen Zwang (Frührissbildung) nach öbv-RL "Weiße Wannen 2018" mit dem Rissbreitennachweis nach ÖNorm und Merkblatt "Weiße Wanne optimiert 2018" & SCHLICKE (2014)



Vergleich der Mindestbewehrung für zentrischen Zwang (Frührissbildung) nach öbv-RL "Weiße Wannen 2018" mit dem Rissbreitennachweis nach ÖNorm und Merkblatt "Weiße Wanne optimiert 2018" & SCHLICKE (2014)



Vergleich der Mindestbewehrung für zentrischen Zwang (Frührissbildung) nach öbv-RL "Weiße Wannen 2018" mit dem Rissbreitennachweis nach ÖNorm und Merkblatt "Weiße Wanne optimiert 2018" & SCHLICKE (2014)

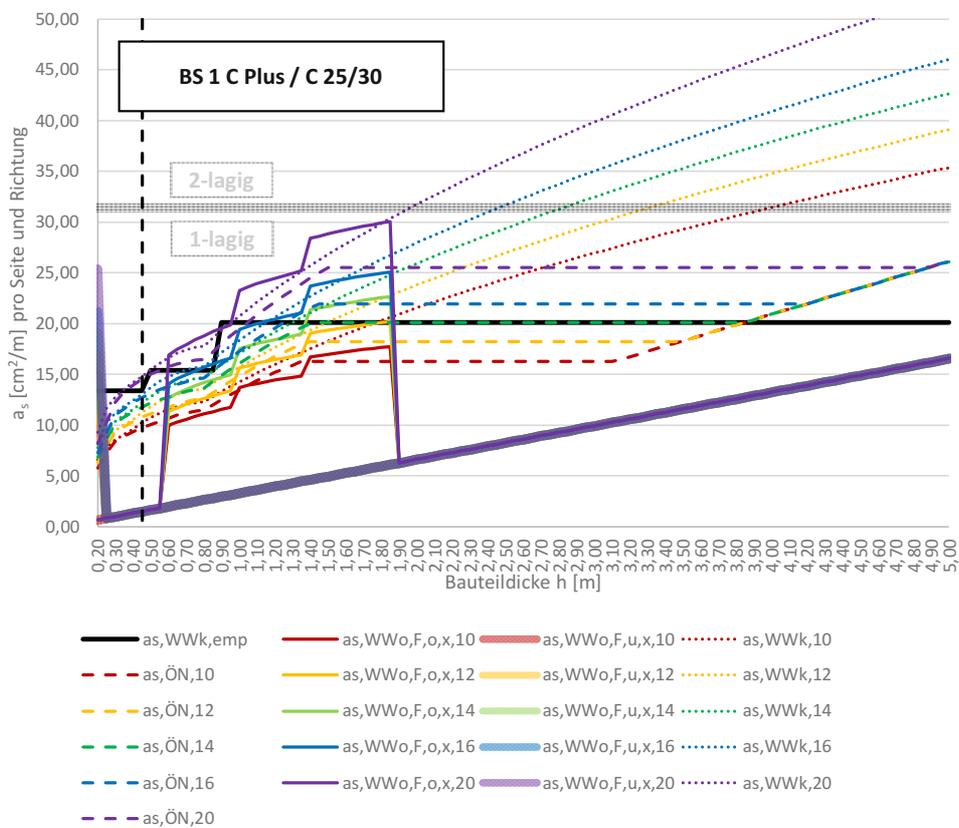


Vergleich der Mindestbewehrung für zentrischen Zwang (Frührissbildung) nach öbv-RL "Weiße Wannen 2018" mit dem Rissbreitennachweis nach ÖNorm und Merkblatt "Weiße Wanne optimiert 2018" & SCHLICKE (2014)

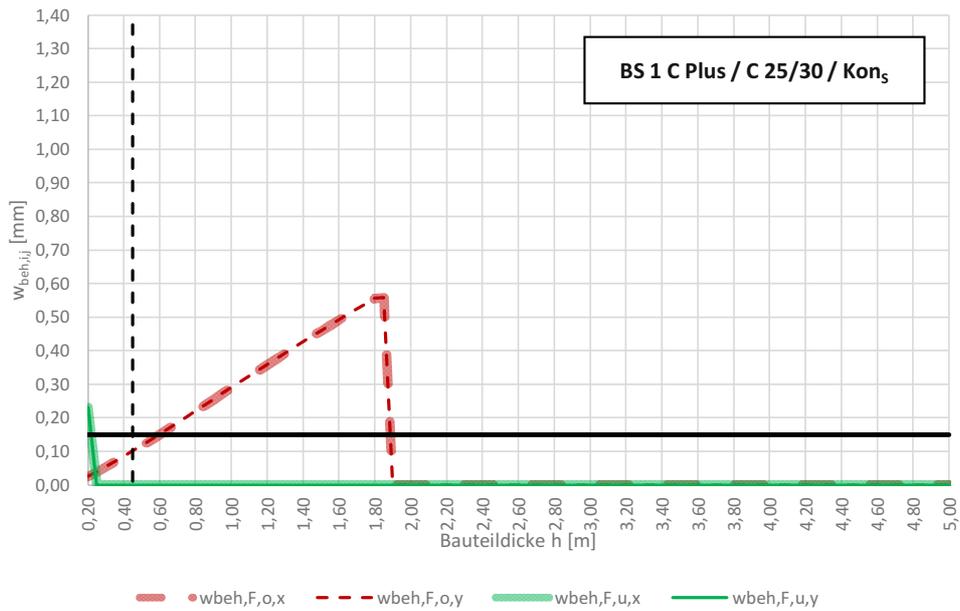
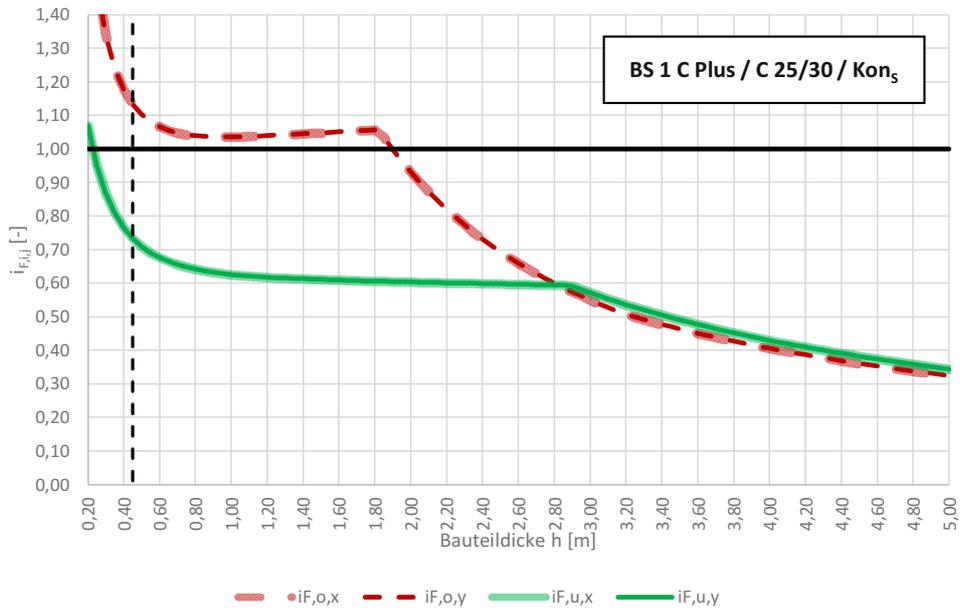
E_B	γ_c	f_{ck}	f_{ctm}	E_{cm}	Q_{max}	S_c	m_{BM}	α_T	NB
[N/mm ²]	[kN/m ³]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[J/g]	[kJ/(°Cm ³)]	[kg/m ³]	[1/K]	[36h/72h]
100,00	25,00	25,51	2,60	31.622,08	300,52	2.400,00	360,00	0,000010	72,00
(ÖN, bezogen auf f_{ck} :		25,00	2,56	31.475,81)					
(ÖN, bezogen auf f_{ctm} :		25,51	2,60	31.622,08)					
(ÖN, bezogen auf E_{cm} :		25,51	2,60	31.622,08)					

$\Delta T_{Q,max}$	ΔT_{nom}	$\Delta T_{a,var}$	$L_{F,x}$	$L_{F,y}$	$L_{F,x,eff}$	$L_{F,y,eff}$	$A_{B,eff,x}$	$A_{B,eff,y}$
[°C]	[°C]	[°C]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m ²]	[m ²]
45,08	5,00	10,00	15,00	15,00	7,50	7,50	105,00	105,00

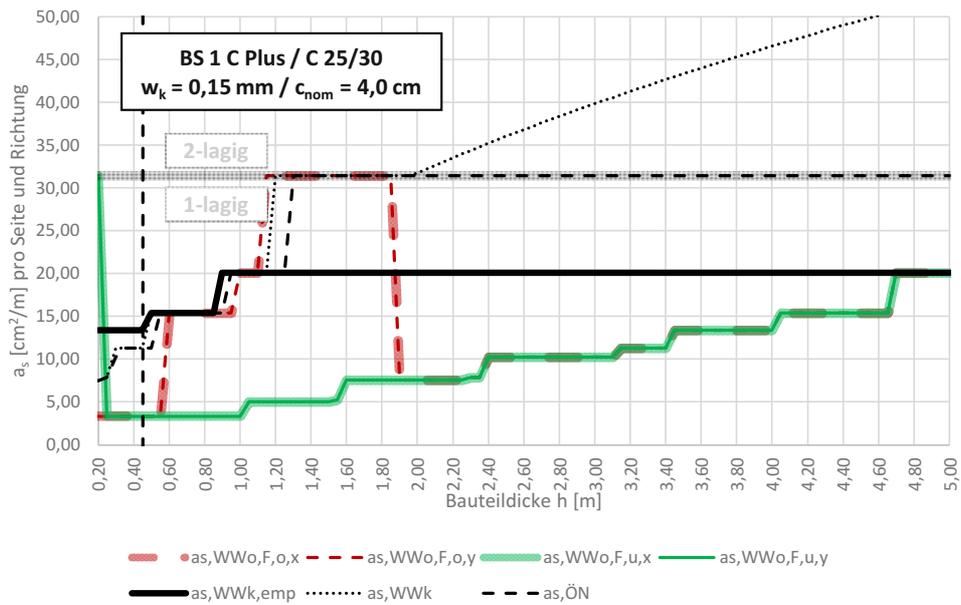
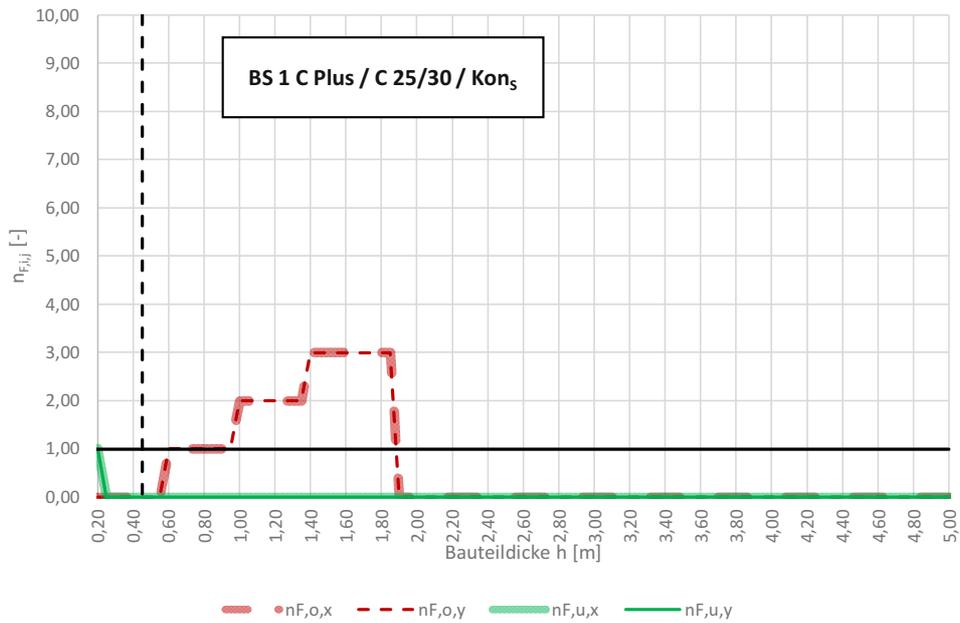
w_{zul}	c_{nom}	f_{yk}	E_s
[mm]	[cm]	[N/mm ²]	[N/mm ²]
0,15	4,00	550,00	200.000



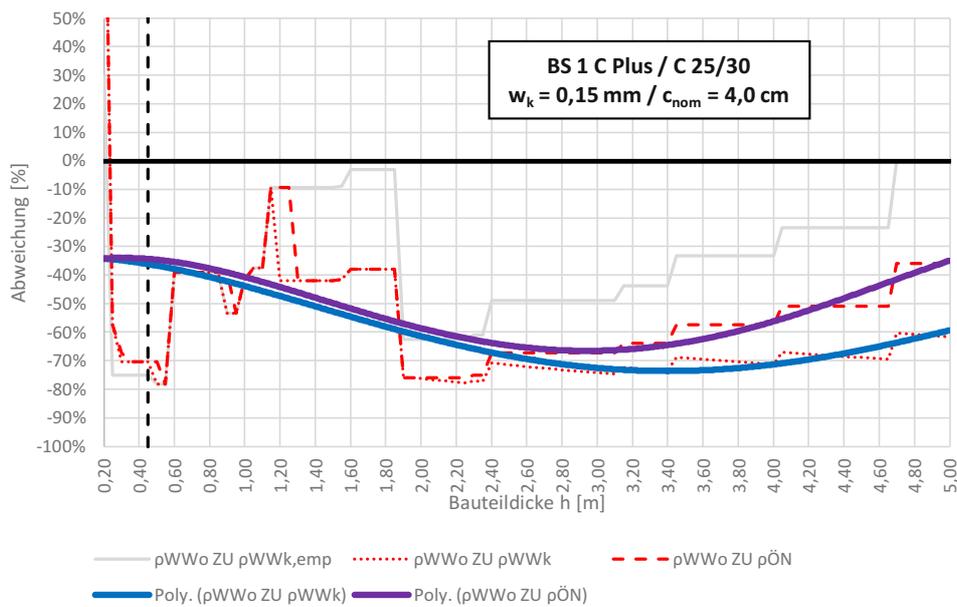
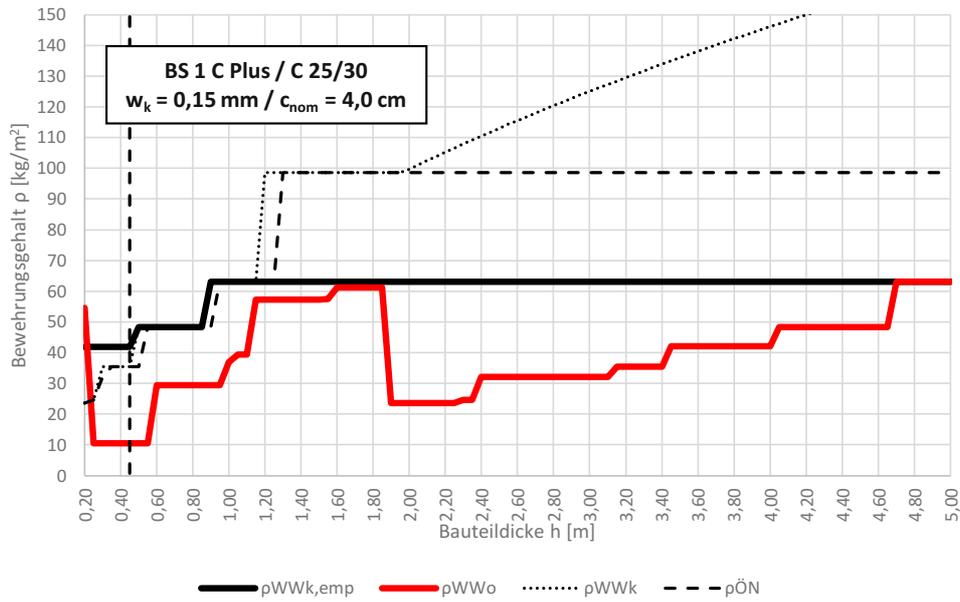
Vergleich der Mindestbewehrung für zentrischen Zwang (Frührissbildung) nach öbv-RL "Weiße Wannen 2018" mit dem Rissbreitennachweis nach ÖNorm und Merkblatt "Weiße Wanne optimiert 2018" & SCHLICKE (2014)



Vergleich der Mindestbewehrung für zentrischen Zwang (Frührissbildung) nach öbv-RL "Weiße Wannen 2018" mit dem Rissbreitennachweis nach ÖNorm und Merkblatt "Weiße Wanne optimiert 2018" & SCHLICKE (2014)



Vergleich der Mindestbewehrung für zentrischen Zwang (Frührissbildung) nach öbv-RL "Weiße Wannen 2018" mit dem Rissbreitennachweis nach ÖNorm und Merkblatt "Weiße Wanne optimiert 2018" & SCHLICKE (2014)

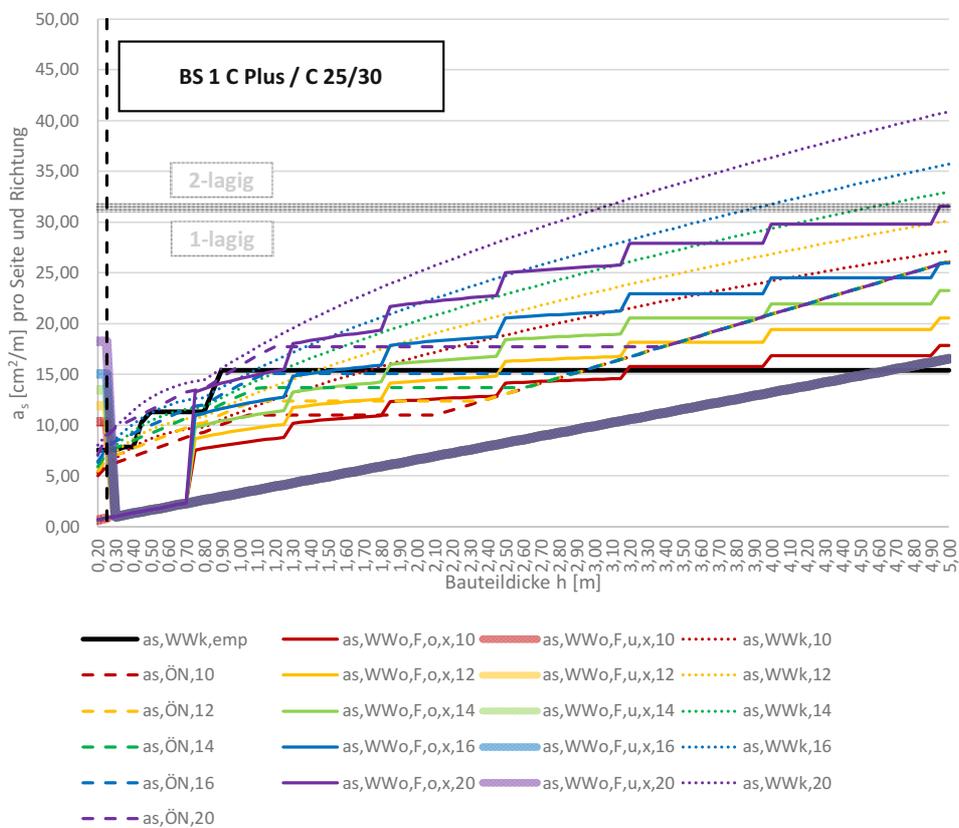


Vergleich der Mindestbewehrung für zentrischen Zwang (Frührissbildung) nach öbv-RL "Weiße Wannen 2018" mit dem Rissbreitennachweis nach ÖNorm und Merkblatt "Weiße Wanne optimiert 2018" & SCHLICKE (2014)

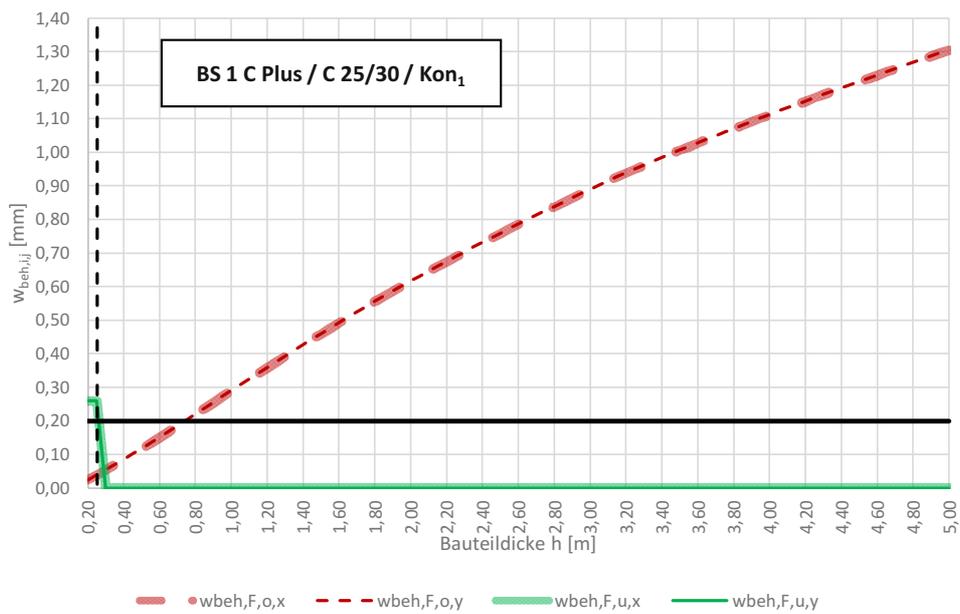
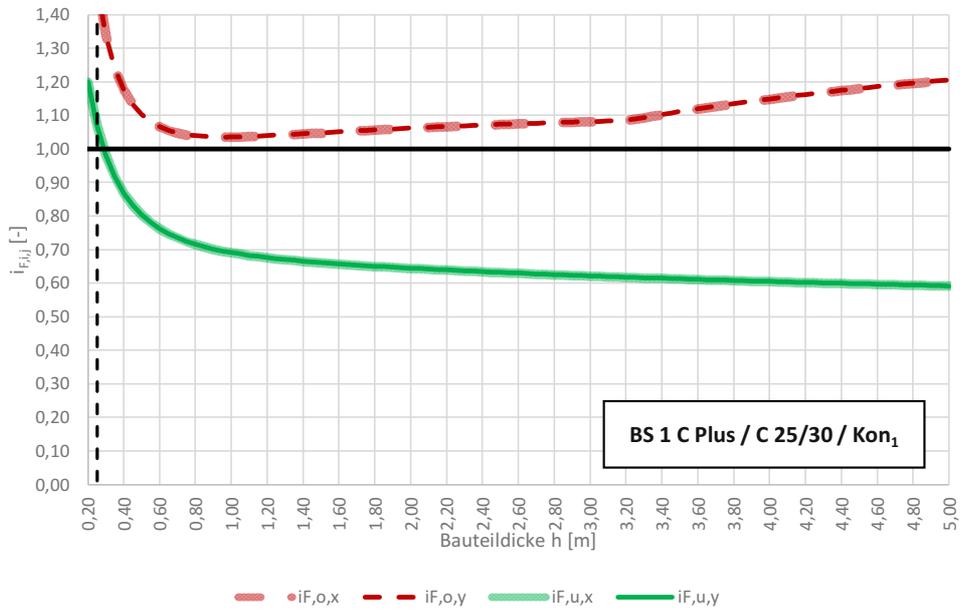
E_B	γ_c	f_{ck}	f_{ctm}	E_{cm}	Q_{max}	S_c	m_{BM}	α_T	NB
[N/mm ²]	[kN/m ³]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[J/g]	[kJ/(°Cm ³)]	[kg/m ³]	[1/K]	[36h/72h]
100,00	25,00	25,51	2,60	31.622,08	300,52	2.400,00	360,00	0,000010	72,00
(ÖN, bezogen auf f_{ck} :		25,00	2,56	31.475,81)					
(ÖN, bezogen auf f_{ctm} :		25,51	2,60	31.622,08)					
(ÖN, bezogen auf E_{cm} :		25,51	2,60	31.622,08)					

$\Delta T_{Q,max}$	ΔT_{nom}	$\Delta T_{a,var}$	$L_{F,x}$	$L_{F,y}$	$L_{F,x,eff}$	$L_{F,y,eff}$	$A_{B,eff,x}$	$A_{B,eff,y}$
[°C]	[°C]	[°C]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m ²]	[m ²]
45,08	5,00	10,00	30,00	30,00	15,00	15,00	420,00	420,00

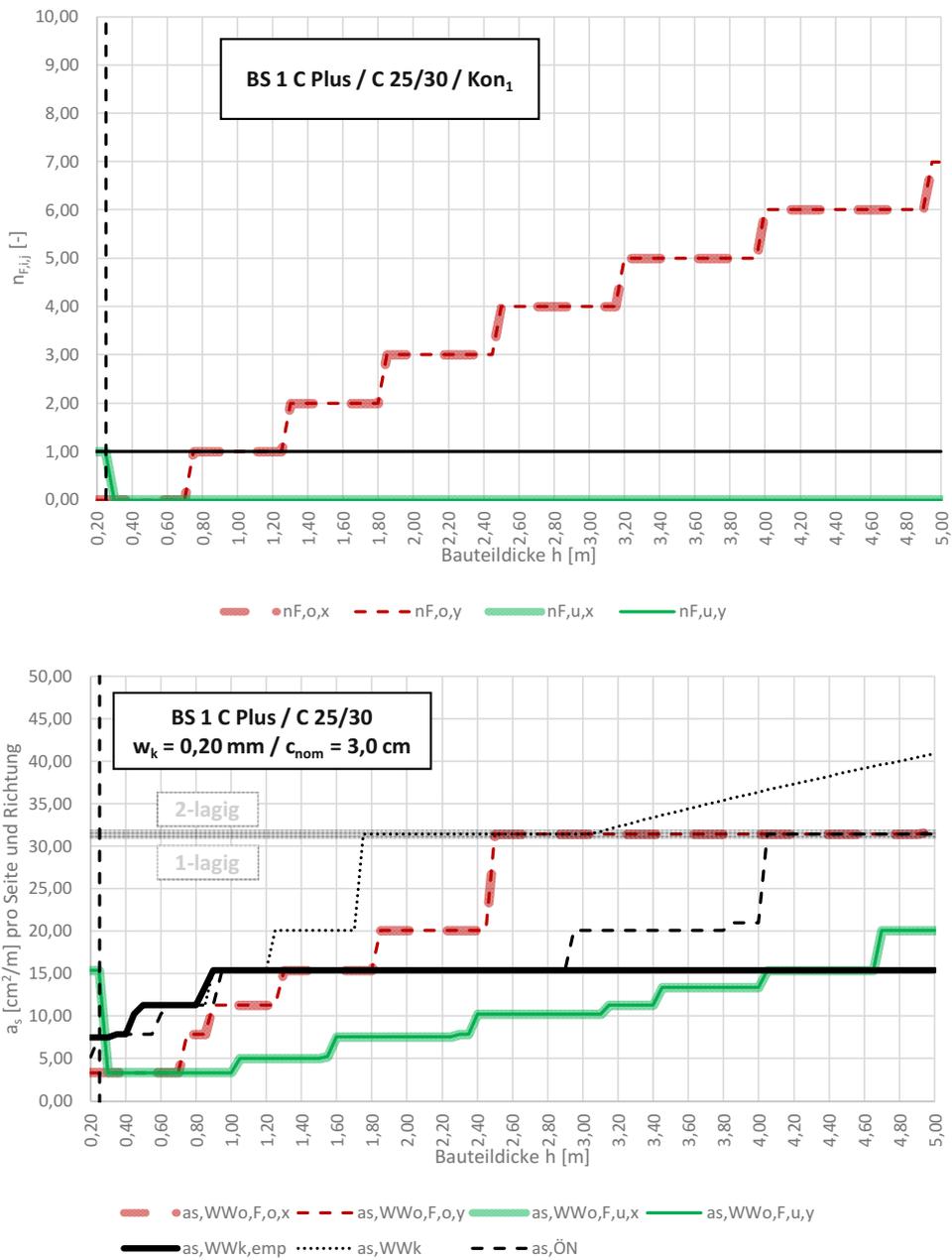
w_{zul}	c_{nom}	f_{yk}	E_s
[mm]	[cm]	[N/mm ²]	[N/mm ²]
0,20	3,00	550,00	200.000



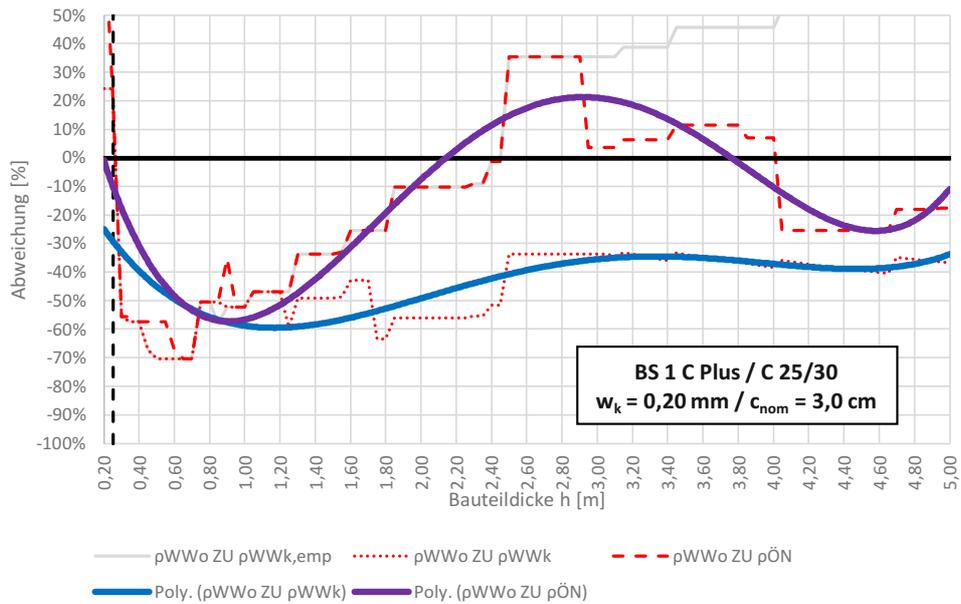
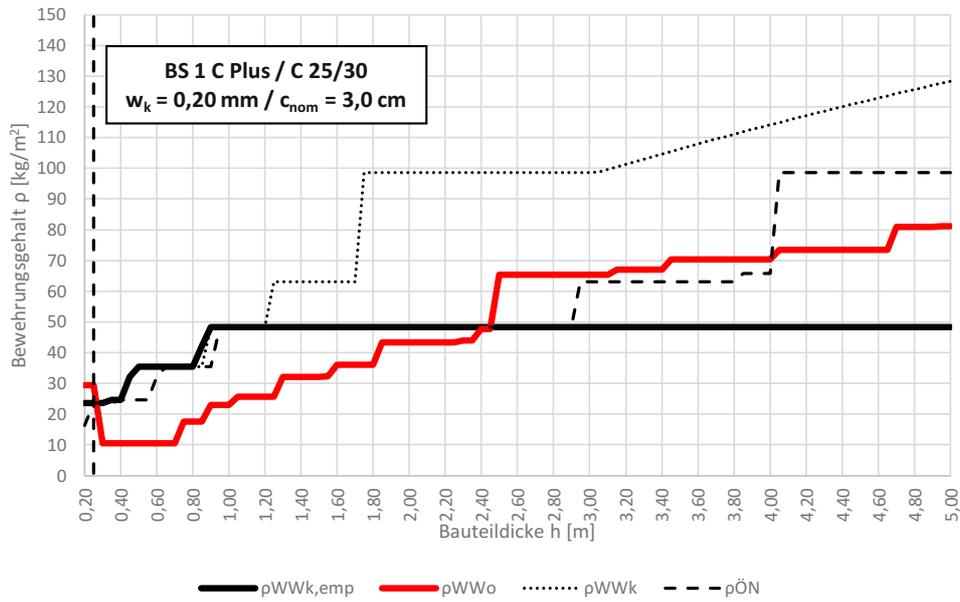
Vergleich der Mindestbewehrung für zentrischen Zwang (Frührissbildung) nach öbv-RL "Weiße Wannen 2018" mit dem Rissbreitennachweis nach ÖNorm und Merkblatt "Weiße Wanne optimiert 2018" & SCHLICKE (2014)



Vergleich der Mindestbewehrung für zentrischen Zwang (Frührissbildung) nach öbv-RL "Weiße Wannen 2018" mit dem Rissbreitennachweis nach ÖNorm und Merkblatt "Weiße Wanne optimiert 2018" & SCHLICKE (2014)



Vergleich der Mindestbewehrung für zentrischen Zwang (Frührissbildung) nach öbv-RL "Weiße Wannen 2018" mit dem Rissbreitennachweis nach ÖNorm und Merkblatt "Weiße Wanne optimiert 2018" & SCHLICKE (2014)

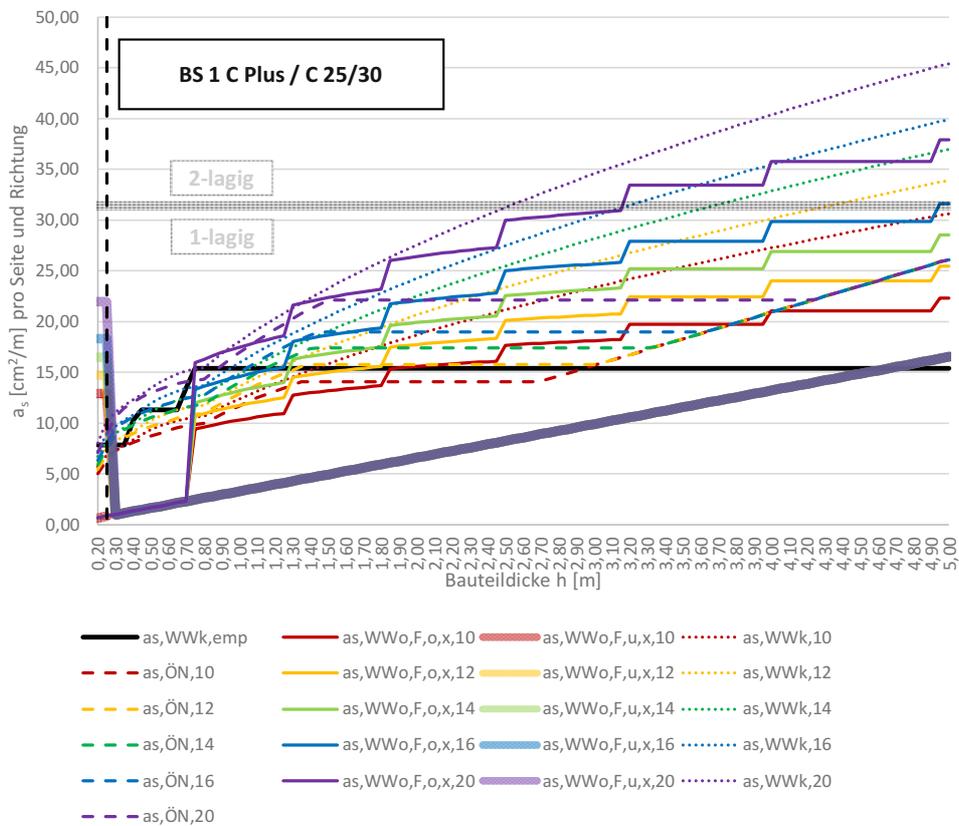


Vergleich der Mindestbewehrung für zentrischen Zwang (Frührissbildung) nach öbv-RL "Weiße Wannen 2018" mit dem Rissbreitennachweis nach ÖNorm und Merkblatt "Weiße Wanne optimiert 2018" & SCHLICKE (2014)

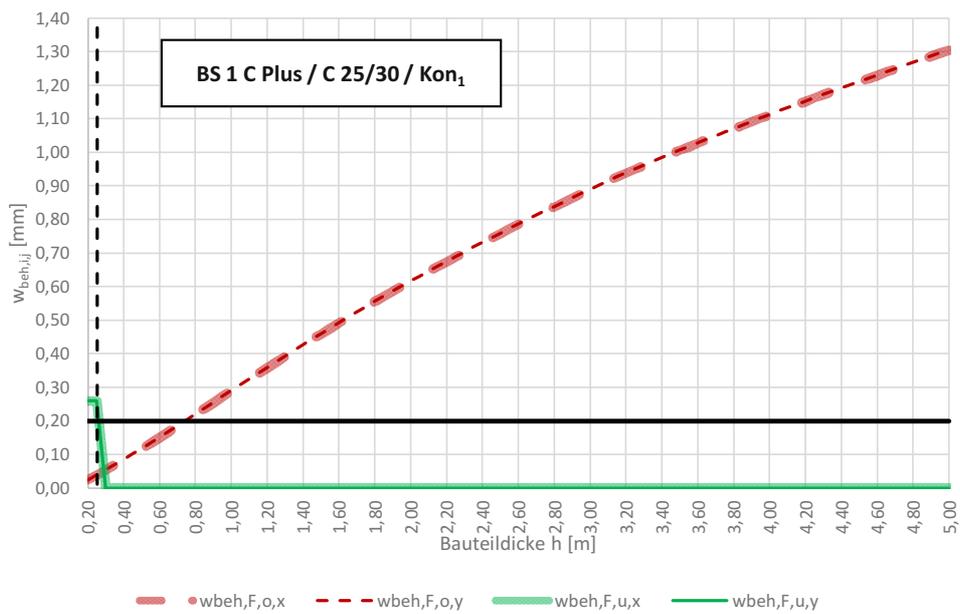
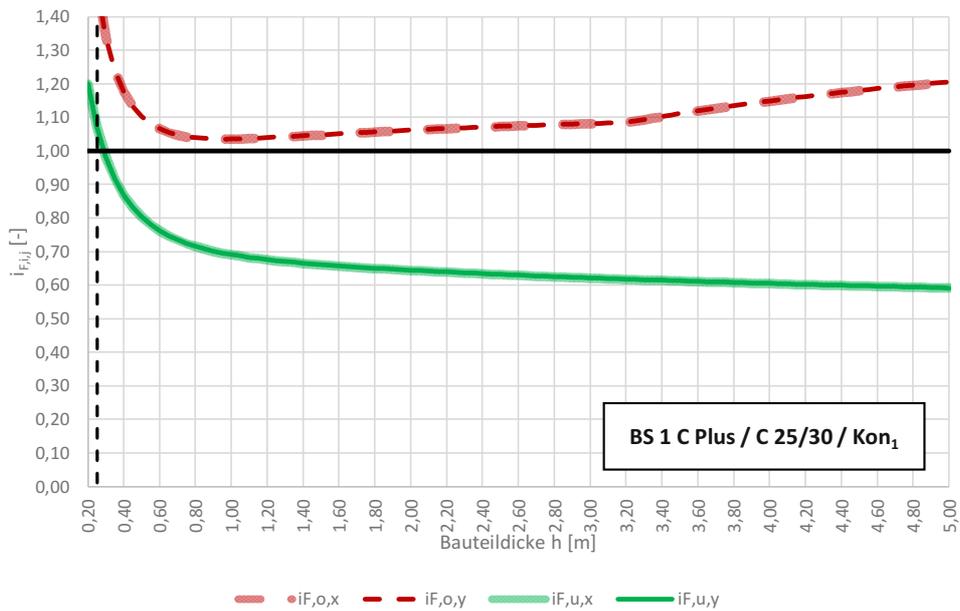
E_B	γ_c	f_{ck}	f_{ctm}	E_{cm}	Q_{max}	S_c	m_{BM}	α_T	NB
[N/mm ²]	[kN/m ³]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[J/g]	[kJ/(°Cm ³)]	[kg/m ³]	[1/K]	[36h/72h]
100,00	25,00	25,51	2,60	31.622,08	300,52	2.400,00	360,00	0,000010	72,00
(ÖN, bezogen auf f_{ck} :		25,00	2,56	31.475,81)					
(ÖN, bezogen auf f_{ctm} :		25,51	2,60	31.622,08)					
(ÖN, bezogen auf E_{cm} :		25,51	2,60	31.622,08)					

$\Delta T_{Q,max}$	ΔT_{nom}	$\Delta T_{a,var}$	$L_{F,x}$	$L_{F,y}$	$L_{F,x,eff}$	$L_{F,y,eff}$	$A_{B,eff,x}$	$A_{B,eff,y}$
[°C]	[°C]	[°C]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m ²]	[m ²]
45,08	5,00	10,00	30,00	30,00	15,00	15,00	420,00	420,00

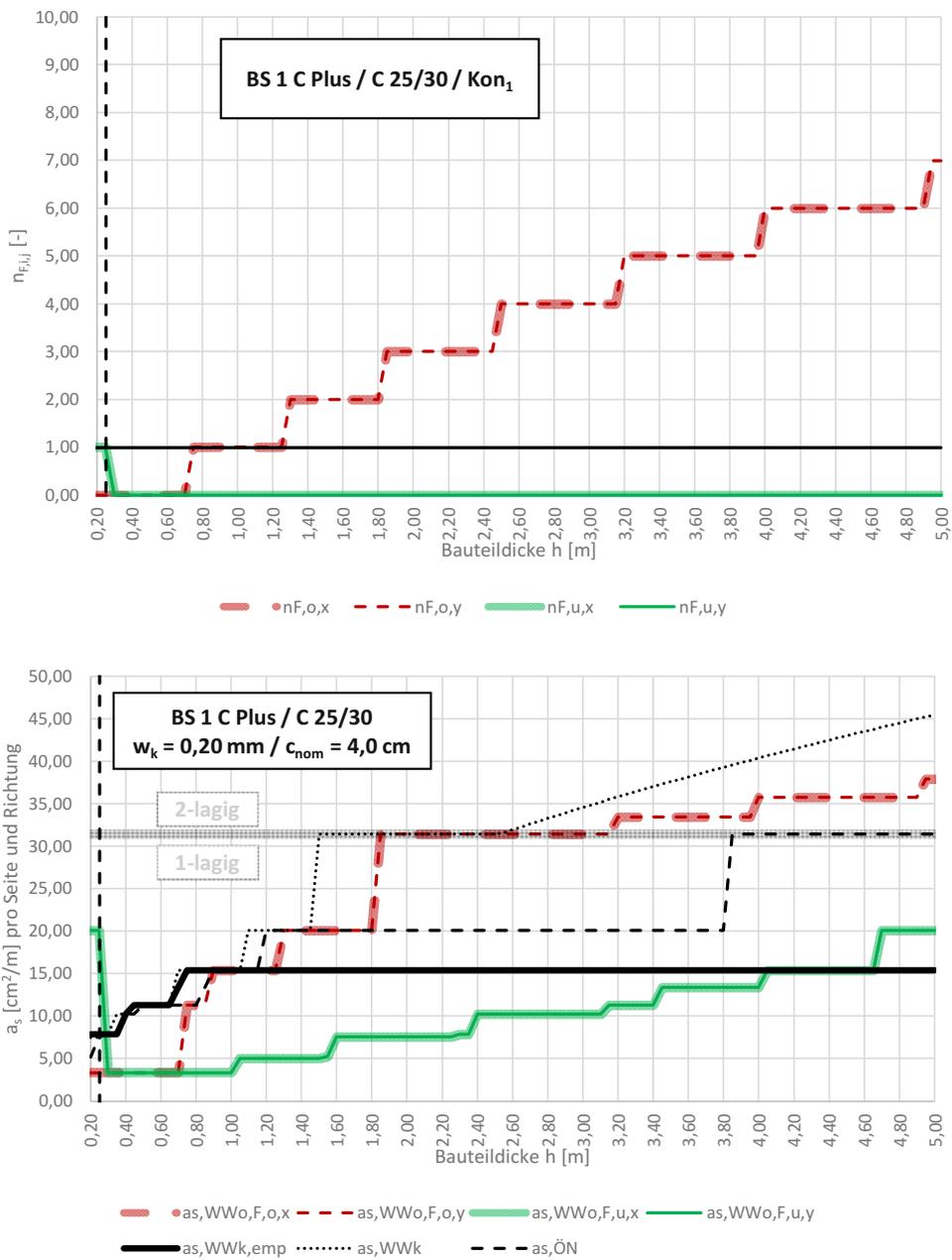
w_{zul}	c_{nom}	f_{yk}	E_s
[mm]	[cm]	[N/mm ²]	[N/mm ²]
0,20	4,00	550,00	200.000



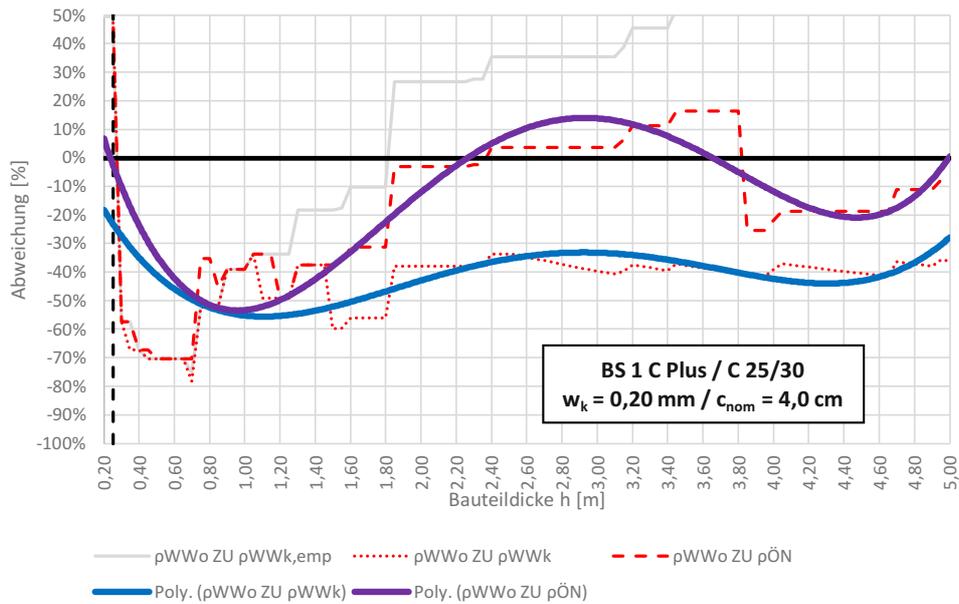
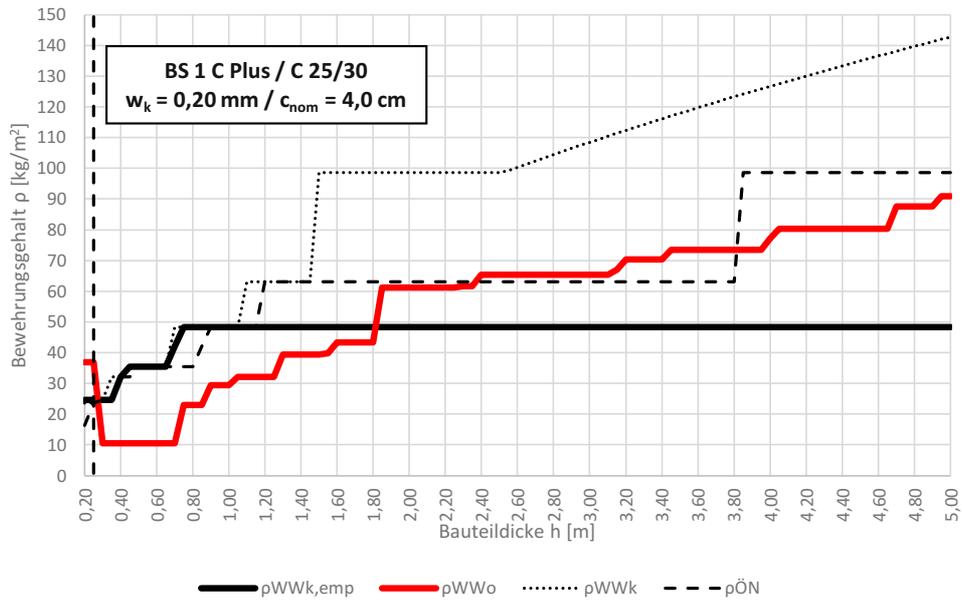
Vergleich der Mindestbewehrung für zentrischen Zwang (Frührissbildung) nach öbv-RL "Weiße Wannen 2018" mit dem Rissbreitennachweis nach ÖNorm und Merkblatt "Weiße Wanne optimiert 2018" & SCHLICKE (2014)



Vergleich der Mindestbewehrung für zentrischen Zwang (Frührissbildung) nach öbv-RL "Weiße Wannen 2018" mit dem Rissbreitennachweis nach ÖNorm und Merkblatt "Weiße Wanne optimiert 2018" & SCHLICKE (2014)



Vergleich der Mindestbewehrung für zentrischen Zwang (Frührissbildung) nach öbv-RL "Weiße Wannen 2018" mit dem Rissbreitennachweis nach ÖNorm und Merkblatt "Weiße Wanne optimiert 2018" & SCHLICKE (2014)

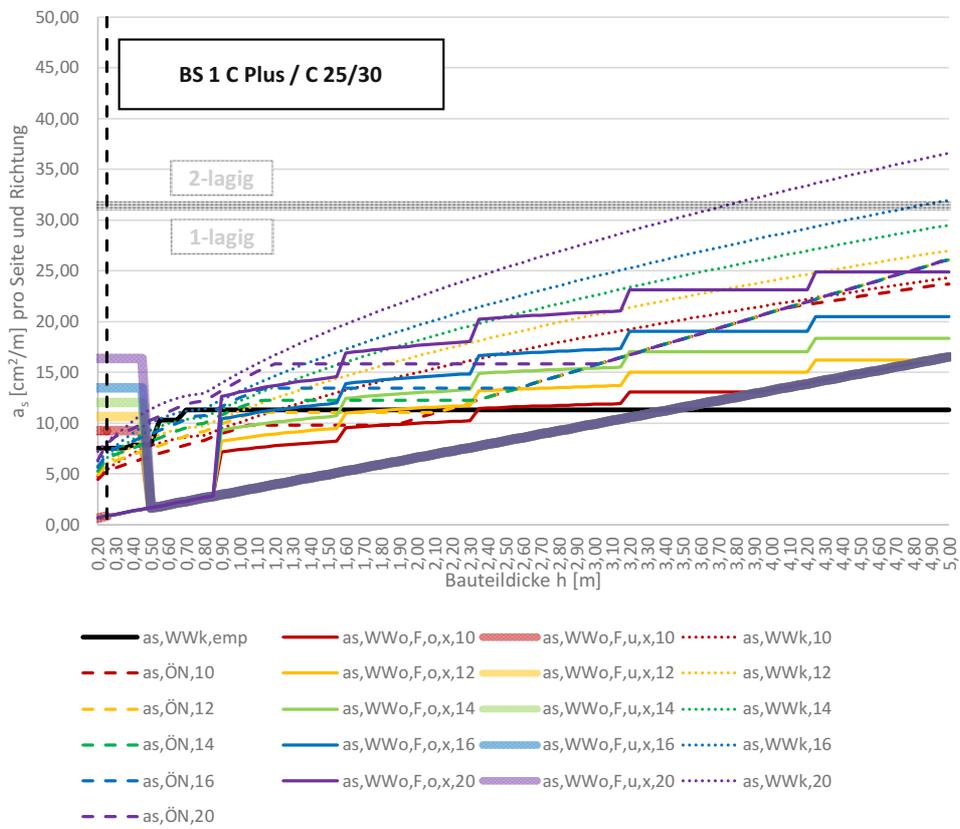


Vergleich der Mindestbewehrung für zentrischen Zwang (Frührissbildung) nach öbv-RL "Weiße Wannen 2018" mit dem Rissbreitennachweis nach ÖNorm und Merkblatt "Weiße Wanne optimiert 2018" & SCHLICKE (2014)

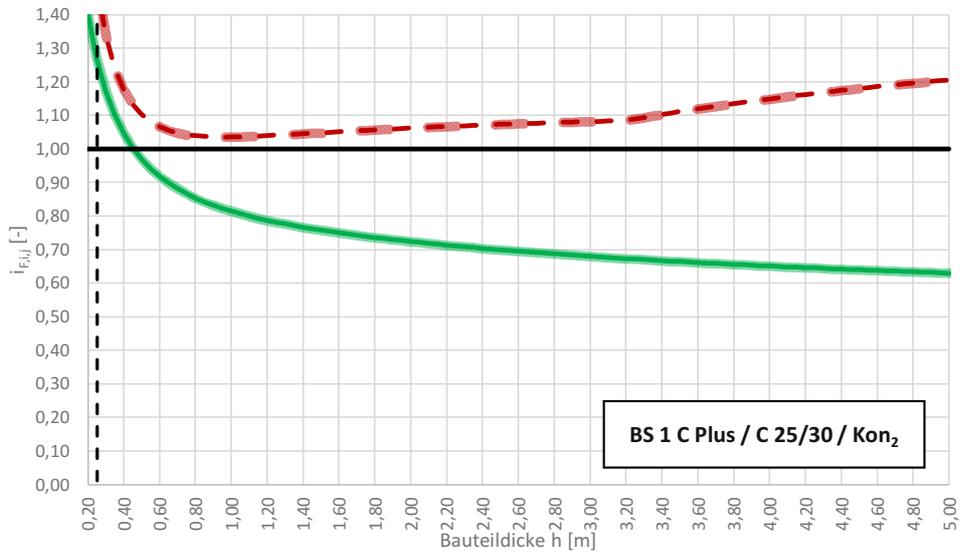
E_B	γ_c	f_{ck}	f_{ctm}	E_{cm}	Q_{max}	S_c	m_{BM}	α_T	NB
[N/mm ²]	[kN/m ³]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[J/g]	[kJ/(°Cm ³)]	[kg/m ³]	[1/K]	[36h/72h]
100,00	25,00	25,51	2,60	31.622,08	300,52	2.400,00	360,00	0,000010	72,00
(ÖN, bezogen auf f_{ck} :		25,00	2,56	31.475,81)					
(ÖN, bezogen auf f_{ctm} :		25,51	2,60	31.622,08)					
(ÖN, bezogen auf E_{cm} :		25,51	2,60	31.622,08)					

$\Delta T_{Q,max}$	ΔT_{nom}	$\Delta T_{a,var}$	$L_{F,x}$	$L_{F,y}$	$L_{F,x,eff}$	$L_{F,y,eff}$	$A_{B,eff,x}$	$A_{B,eff,y}$
[°C]	[°C]	[°C]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m ²]	[m ²]
45,08	5,00	10,00	60,00	60,00	30,00	30,00	1.680,00	1.680,00

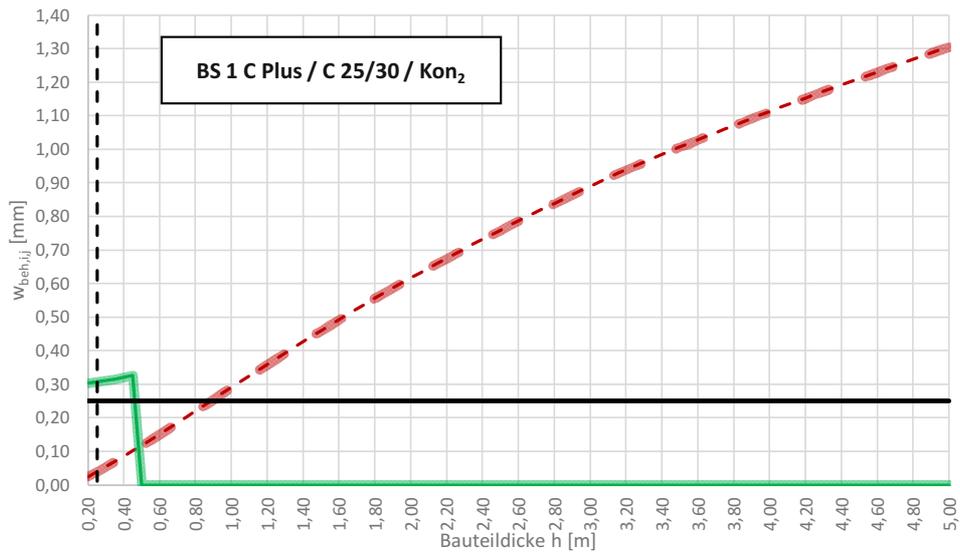
w_{zul}	c_{nom}	f_{yk}	E_s
[mm]	[cm]	[N/mm ²]	[N/mm ²]
0,25	3,00	550,00	200.000



Vergleich der Mindestbewehrung für zentrischen Zwang (Frührissbildung) nach öbv-RL "Weiße Wannen 2018" mit dem Rissbreitennachweis nach ÖNorm und Merkblatt "Weiße Wanne optimiert 2018" & SCHLICKE (2014)

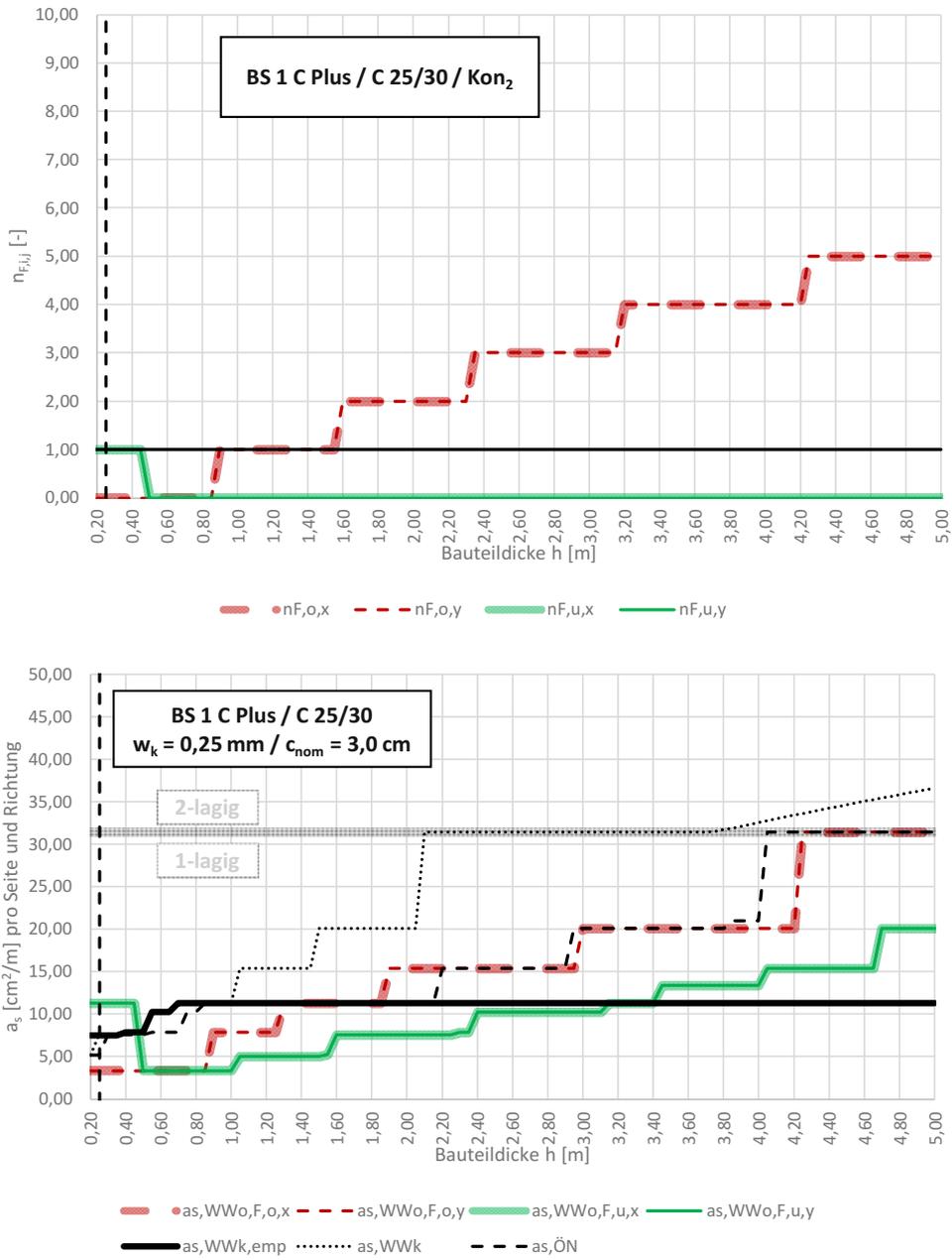


● iF,o,x - - iF,o,y — iF,u,x - - iF,u,y

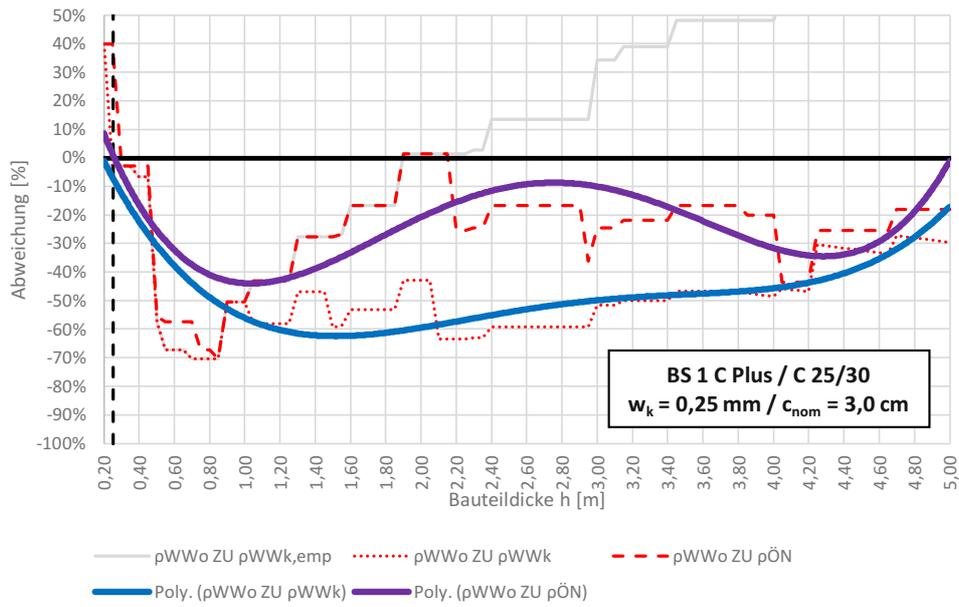
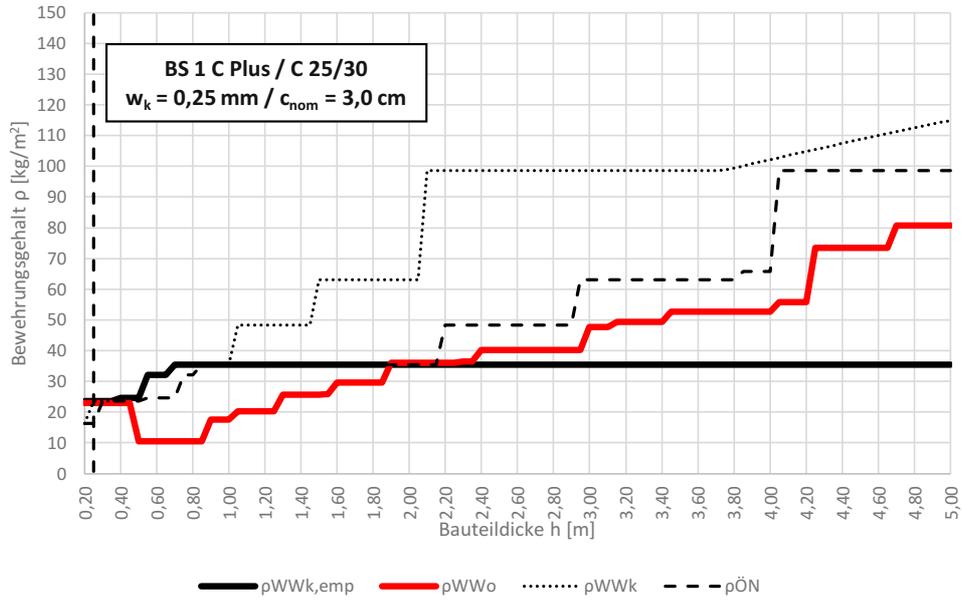


● wbeh,F,o,x - - wbeh,F,o,y — wbeh,F,u,x - - wbeh,F,u,y

Vergleich der Mindestbewehrung für zentrischen Zwang (Frührissbildung) nach öbv-RL "Weiße Wannen 2018" mit dem Rissbreitennachweis nach ÖNorm und Merkblatt "Weiße Wanne optimiert 2018" & SCHLICKE (2014)



Vergleich der Mindestbewehrung für zentrischen Zwang (Frührissbildung) nach öbv-RL "Weiße Wannen 2018" mit dem Rissbreitennachweis nach ÖNorm und Merkblatt "Weiße Wanne optimiert 2018" & SCHLICKE (2014)

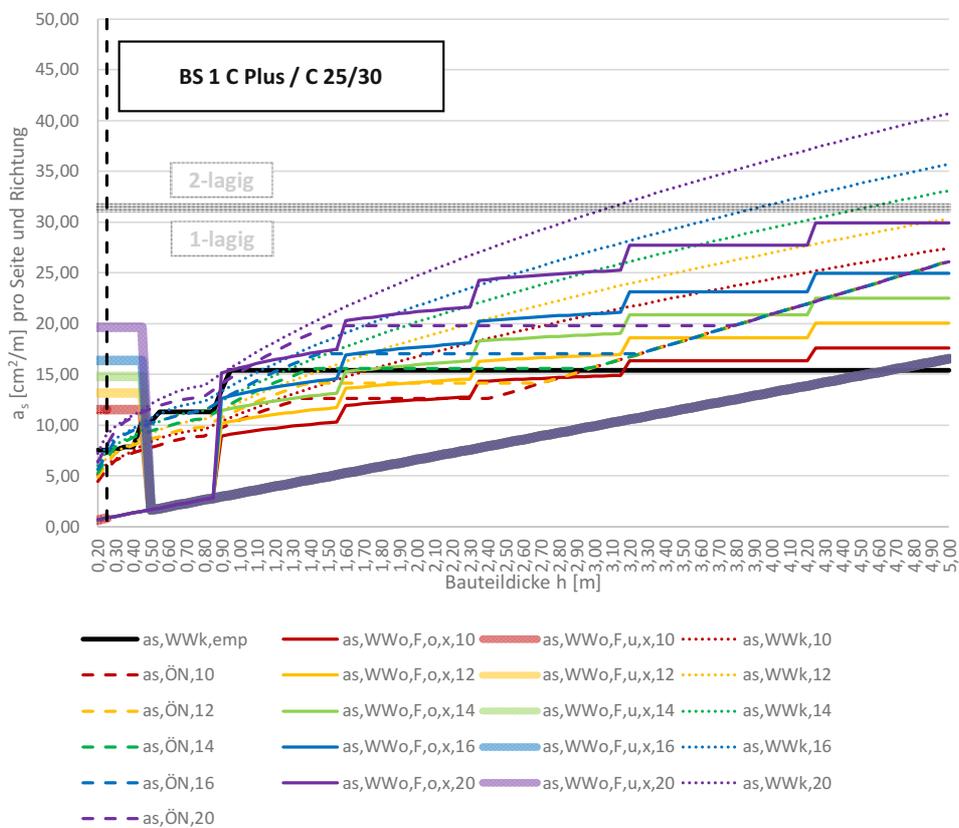


Vergleich der Mindestbewehrung für zentrischen Zwang (Frührissbildung) nach öbv-RL "Weiße Wannen 2018" mit dem Rissbreitennachweis nach ÖNorm und Merkblatt "Weiße Wanne optimiert 2018" & SCHLICKE (2014)

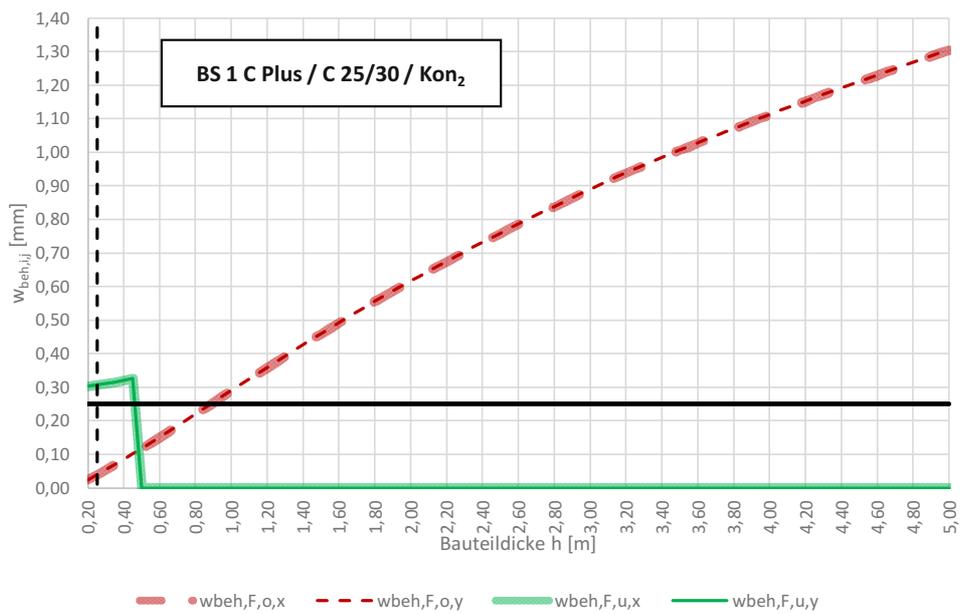
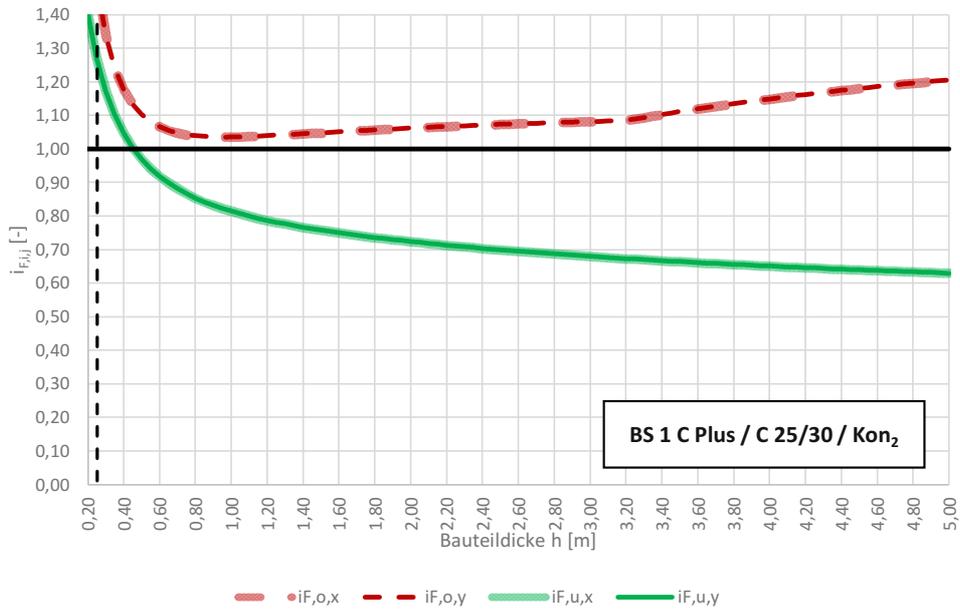
E_B	γ_c	f_{ck}	f_{ctm}	E_{cm}	Q_{max}	S_c	m_{BM}	α_T	NB
[N/mm ²]	[kN/m ³]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[J/g]	[kJ/(°Cm ³)]	[kg/m ³]	[1/K]	[36h/72h]
100,00	25,00	25,51	2,60	31.622,08	300,52	2.400,00	360,00	0,000010	72,00
(ÖN, bezogen auf f_{ck} :		25,00	2,56	31.475,81)					
(ÖN, bezogen auf f_{ctm} :		25,51	2,60	31.622,08)					
(ÖN, bezogen auf E_{cm} :		25,51	2,60	31.622,08)					

$\Delta T_{Q,max}$	ΔT_{nom}	$\Delta T_{a,var}$	$L_{F,x}$	$L_{F,y}$	$L_{F,x,eff}$	$L_{F,y,eff}$	$A_{B,eff,x}$	$A_{B,eff,y}$
[°C]	[°C]	[°C]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m ²]	[m ²]
45,08	5,00	10,00	60,00	60,00	30,00	30,00	1.680,00	1.680,00

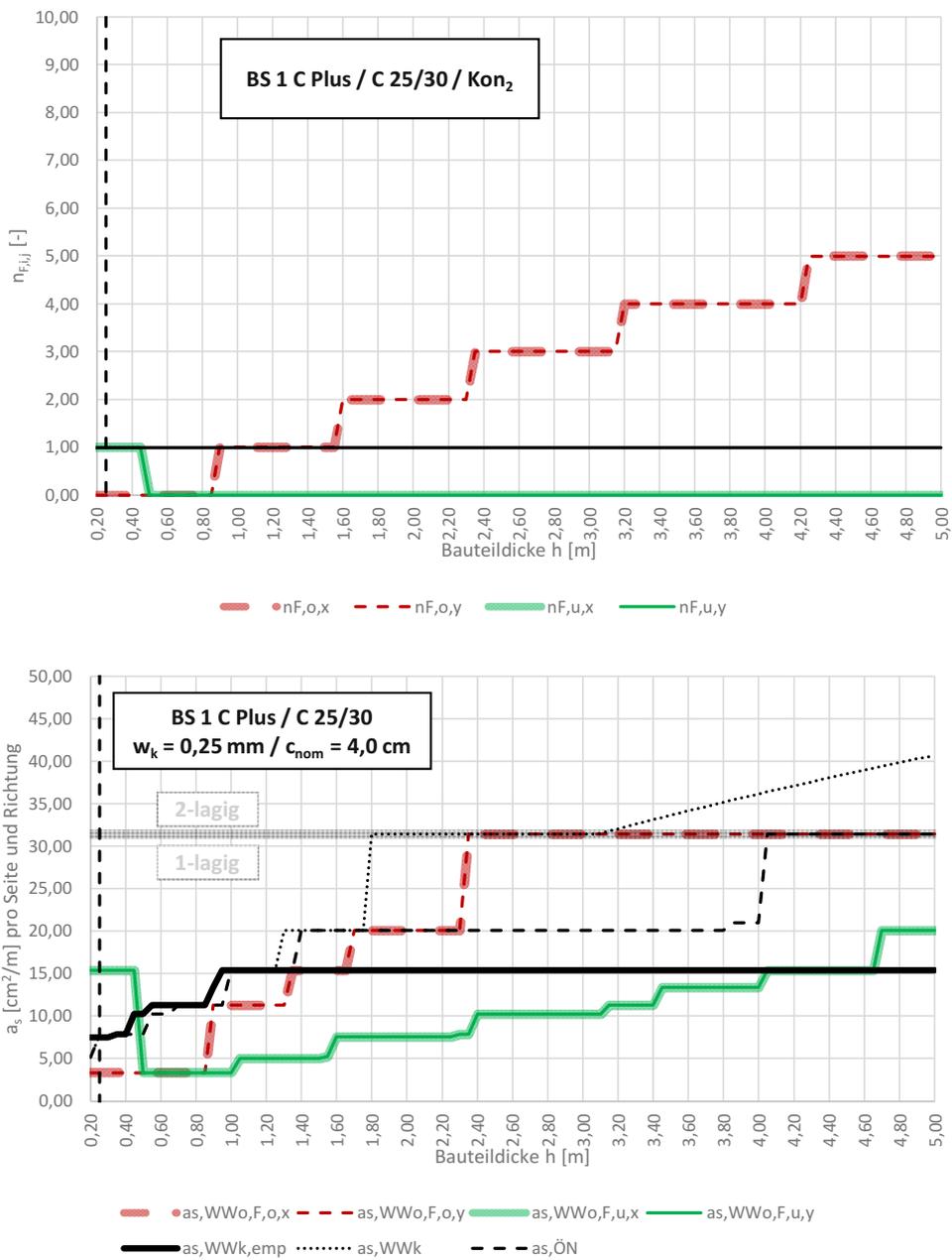
w_{zul}	c_{nom}	f_{yk}	E_s
[mm]	[cm]	[N/mm ²]	[N/mm ²]
0,25	4,00	550,00	200.000



Vergleich der Mindestbewehrung für zentrischen Zwang (Frührissbildung) nach öbv-RL "Weiße Wannen 2018" mit dem Rissbreitennachweis nach ÖNorm und Merkblatt "Weiße Wanne optimiert 2018" & SCHLICKE (2014)



Vergleich der Mindestbewehrung für zentrischen Zwang (Frührissbildung) nach öbv-RL "Weiße Wannen 2018" mit dem Rissbreitennachweis nach ÖNorm und Merkblatt "Weiße Wanne optimiert 2018" & SCHLICKE (2014)



Vergleich der Mindestbewehrung für zentrischen Zwang (Frührissbildung) nach öbv-RL "Weiße Wannen 2018" mit dem Rissbreitennachweis nach ÖNorm und Merkblatt "Weiße Wanne optimiert 2018" & SCHLICKE (2014)

