

BAWMerkblatt

**Rissbreitenbegrenzung für Zwang
in massiven Wasserbauwerken (MRZ)**

Ausgabe 2019

GELBDRUCK

BAW-Merkblätter, -Empfehlungen und -Richtlinien Herausgeber

Bundesanstalt für Wasserbau (BAW)
Kußmaulstraße 17
76187 Karlsruhe

Postfach 21 02 53
76152 Karlsruhe

Tel.: 0721 9726-0
Fax: 0721 9726-4540

info@baw.de
www.baw.de

Verfasser

Abteilung Bautechnik, Referat Massivbau B1, Bundesanstalt für Wasserbau (BAW)

Übersetzung, Nachdruck – auch auszugsweise – nur mit Genehmigung des Herausgebers: © BAW 2019

Inhaltsverzeichnis	Seite
Anwendungsbereich	1
Begriffsdefinitionen	2
Symbolverzeichnis	3
1 Einführung	6
1.1 Wesen der Zwangsbeanspruchung	6
1.2 Besonderheit von Wasserbauwerken	7
1.3 Übertragbarkeit des Eurocode 2 (EC 2)	8
1.4 Bisherige Erfahrung mit der fugenlosen Bauweise	8
2 Theoretische Grundlagen	10
2.1 Verformungseinwirkungen	10
2.1.1 Allgemeines	10
2.1.2 Verformungen infolge der Betonerhärtung	10
2.1.3 Einfluss der klimatischen Temperatureinwirkungen	11
2.1.4 Einfluss der Boden-Bauwerk-Interaktion	13
2.2 Zwangskraft im frühen und späten Betonalter	13
2.2.1 Zwangskraft im frühen Betonalter - Erhärtungszeitraum	13
2.2.2 Zwangskraft im späten Betonalter - Nutzungszeitraum	14
2.3 Rissprozess in massigen Bauteilen	14
2.4 Zwangsbeanspruchung und geometrisches Rissbild für typische Bauteile	15
2.4.1 Bodenplatte	15
2.4.2 Wand auf Fundament	18
2.5 Zwangskraftabbau bei Rissbildung	20
2.6 Einfluss der Bewehrung auf die Rissverteilung	20
2.7 Mindestbewehrung zur Einhaltung des Rissbreitenkriteriums	21
3 Bemessung	22
3.1 Allgemeines Bemessungskonzept	22
3.2 Baustoffkennwerte des Betons	22
3.3 Bodenplatte	23
3.3.1 Untere Bewehrungslage	23
3.3.2 Obere Bewehrungslage	25
3.4 Wände	26
3.5 Grundlaufdecke	29
4 Konstruktive Ausbildung und qualitative Maßnahmen	30
4.1 Oberflächenbewehrung	30
4.2 Qualitative Maßnahmen bei Planung und Herstellung	30
4.2.1 Bauteilgeometrie, Bauabschnitte und Betonierfolge	30
4.2.2 Betontechnologie	30
4.2.3 Herstellungszeitraum	31
4.2.4 Nachbehandlung	31
5 Beispiel: Mindestbewehrung für eine fugenlose Schifffahrtsschleuse	32

5.1	Mindestbewehrung für die Bodenplatte in Längsrichtung – BA I	35
5.2	Mindestbewehrung für den unteren Kammerwandabschnitt – BA II	36
5.3	Mindestbewehrung für den oberen Kammerwandabschnitt – BA III	38
	Literatur	41

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Rechenwerte der linearen Wärmeausdehnungskoeffizienten α_T des Betons in Abhängigkeit der Zuschlagsart (Krauß 2001)	23
------------	--	----

Bildverzeichnis

Bild 1:	Gleichgewicht und Verformungskompatibilität in einem teilweise behinderten Stab unter Temperaturverkürzung	6
Bild 2:	Rissbild in massigen Bauteilen; Primärriss und Sekundärrisse in der effektiven Zone unter zentrischem Zwang	7
Bild 3:	Saisonale Temperatureinwirkungen für Wasserbehälter mit $0,8 \leq bW, hPl \leq 10$ m nach (Turner 2017)	12
Bild 4:	Saisonale Temperatureinwirkungen für Sparbecken mit $0,8 \leq bW, hPl \leq 10$ m nach (Turner 2017)	12
Bild 5:	Saisonale Temperatureinwirkungen für Stützmauern mit $0,8 \leq bW \leq 10$ m nach (Turner 2017)	12
Bild 6:	Saisonale Temperatureinwirkungen für Bodenplatten mit $0,8 \leq hPl \leq 10$ m nach (Turner 2017)	12
Bild 7:	Erhärtingsbedingte Betontemperatur und resultierende Zwangsspannung im Herstellungszeitraum	13
Bild 8:	Zwangskraft und Rissbildung in massigen Bauteilen mit randnaher Bewehrung	14
Bild 9:	Kritische Zeitpunkte während des Erhärtingszeitraums in einer Bodenplatte, vgl. (Schlicke und Tue 2016a)	15
Bild 10:	Rissbildung in einer Bodenplatte in Abhängigkeit der Behinderungssituation, vgl. (Schlicke und Tue 2016a)	16
Bild 11:	Schematische Darstellung der Spannungsgeschichte bei einer reinen Biegebeanspruchung an der Ober- und Unterseite von Bodenplatten	17
Bild 12:	Verformungskompatibilität von Wänden bzw. Wandabschnitten auf Fundamenten nach (Schlicke und Tue 2016a); a) Gleichgewicht und innere Zwangsschnittgrößen, b) Eigengewichtsaktivierung	18

Bild 13:	Einfluss des zusätzlichen Eigengewichts am freien Rand einer Wand, vgl. (Schlicke und Tue 2017); a) Wandecke, b) Überstand	18
Bild 14:	Längsansicht der Wand: Abstand der Primärrisse bei Wänden mit langer Bauabschnittslänge ($LBA \geq 3,5 \cdot hW$); a) Erhärungszeitraum, b) Nutzungszeitraum	19
Bild 15:	Vorgehensweise für die Bemessung der unteren Bewehrungslage der Bodenplatte	24
Bild 16:	Vorgehensweise für die Bemessung der oberen Bewehrungslage der Bodenplatte	26
Bild 17:	Lage der Querschnittsfaser j in Bezug auf die relevanten Schwerpunkte des Bauwerks	27
Bild 18:	Vorgehensweise für Wandquerschnitte	28
Bild 19:	Saisonale Temperatureinwirkungen für die Grundlaufdecke	29
Bild 20:	Randbedingungen, Geometrie und Querschnittswerte der Schifffahrtsschleuse	32
Bild 21:	Lage der Querschnittsfaser in Bezug auf die relevanten Schwerpunkte in den einzelnen Bauphasen	33
Bild 22:	Skizze der anzuordnenden horizontalen Längsbewehrung	40
Bild 23:	Längsansicht: Abstand der Primärrisse bei Wänden mit kurzer Bauabschnittslänge ($LBA < 3,5 \cdot hW$); a) Primärrisse (Anrisse) im Erhärungszeitraum, b) Primärrisse (Trennrisse) im Nutzungszeitraum	45

Anlagenverzeichnis

Anlage A:	Analytische Spannungsermittlung im Wandquerschnitt	43
Anlage B:	Abstand der Primärrisse bei Wänden ohne Trennrisse im Erhärungszeitraum	45

Vorbemerkung

Anwendungsbereich

Das Merkblatt gilt für Wasserbauwerke und deren Bauteile aus Stahlbeton. Definitionsgemäß gilt das beschriebene Berechnungsverfahren für massige, ständig durchfeuchtete Bauteile mit einer kleinsten Bauteilabmessung von $h \geq 80$ cm. Für alle Betonfestigkeiten in diesem Merkblatt werden die 56-Tage-Festigkeiten angenommen.

Dieses Merkblatt zielt nicht auf eine Vermeidung von Rissen sondern auf eine Begrenzung der Rissbreite ab. Der Nachweis der Rissbreitenbegrenzung wird in der quasi-ständigen Bemessungssituation geführt. Aufgrund der Streuung der betrachteten Einwirkungs- und Widerstandsgrößen können daher zeitweise oder vereinzelt größere Risse auftreten.

Mit diesem Merkblatt wird das BAW-Merkblatt „Rissbreitenbegrenzung für frühen Zwang in massiven Wasserbauwerken“ (MFZ) Ausgabe 2011 abgelöst.

GELBDRUCK

Begriffsdefinitionen

massiges Bauteil	randnah bewehrtes Bauteil mit einer kleinsten Abmessung von nicht weniger als 80 cm
Trennriss	entsteht durch eine vorwiegend zentrische Zwangsbeanspruchung und erfasst die gesamte Querschnittshöhe des betrachteten Bauteils
Biegeriss	entsteht durch vorwiegende Biegebeanspruchung und erfasst die Zugzone des betrachteten Querschnitts
Schalendriss	entsteht durch Eigenspannungen im Randbereich des Querschnitts; diese dürfen bei der Ermittlung der Mindestbewehrung vernachlässigt werden
Primärriss	Trenn- oder Biegeriss der bei Verformungseinwirkungen in einem geometrisch vorgegebenen Abstand ohne Einfluss der Bewehrung entsteht
Sekundärriss	entsteht im Umfeld eines Primärrisses zum Erreichen der Verformungskompatibilität
Rissbreite	<p>Der hier verwendete Begriff Rissbreite ist gleichzusetzen mit dem Rechenwert der Rissbreite nach DIN EN 1992-1-1 (DIN EN 1992-1-1). Zur Vorhersage ob im Beton Risse entstehen können, benötigt man ein Risskriterium bzw. Rissbreitenkriterium w_k. Die rechnerische Größe, das Rissbreitenkriterium, ist zur Begrenzung der Rissbreite an der Bauteiloberfläche gedacht. Durch die Streuung der Eingangsparameter sind gelegentliche Überschreitungen der Rissbreite im Bauwerk statistisch zu erwarten.</p> <p>Hinweis: Rechenwerte der Rissbreite sind nicht direkt messbar. Sie sind fiktive Werte und sollen nicht explizite Einhaltung bestimmter, am Bauteil nachmessbarer Grenzwerte von Rissbreiten sicherstellen. Vielmehr sollen diese das Auftreten breiter Einzelrisse verhindern.</p>
Erhärtsungszeitraum Abkürzung (EZ)	Zeitraum, in dem das Bauteil maßgeblich durch Abbindewärme (Hydratation) erhebliche Verformungseinwirkungen erfährt. Die entstehenden Zwangsspannungen werden durch die Massigkeit des Bauteils und der in diesem Zeitraum entstehenden Steifigkeit des Betons beeinflusst. Dieser Zeitraum endet mit dem Ausgleich der Temperatur zwischen Bauteil und Umgebung. Für die Ermittlung der Zwangsbeanspruchung kann dieser Zeitraum mit 56 Tagen zugrunde gelegt werden.
Nutzungszeitraum Abkürzung (NZ)	Zeitraum, der sich direkt an den Erhärtsungszeitraum anschließt, hier sind maßgeblich klimatische Randbedingungen für die eingetragene Zwangsbeanspruchung verantwortlich. Für die Ermittlung der Zwangsbeanspruchung kann der Zeitpunkt 56 Tage nach der Herstellung als Beginn des Nutzungszeitraums betrachtet werden.
Oberflächenbewehrung	eine Bewehrung, die angeordnet wird, wenn rechnerisch keine Bewehrung zur Rissbreitenbegrenzung erforderlich ist und lediglich die Robustheit der Oberflächzone sichergestellt werden muss

Symbolverzeichnis

Symbol	Bezeichnung
a	allgemeiner Behinderungsgrad, drückt das Verhältnis aus spannungswirksamer Dehnung und Gesamtdehnung aus
a_M	Behinderungsgrad bei Biegezwang
a_N	Behinderungsgrad bei zentrischem Zwang
$a_{s,erf}$	erforderliche Mindestbewehrung je Bezugslänge b
b	betrachtete Breite, i.d.R. 1m
b_F	Breite des behindernden Bauteils (F undament)
$b_{F,eff}$	effektive (aktivierbare) Breite des behindernden Bauteils (F undament)
b_{Gl}	Breite des G rundlaufs
b_W	Breite der Wand
c_{nom}	Nominalwert der Betondeckung
d_1	Randabstand des Bewehrungsschwerpunkts der betrachteten Lage
d_s	Durchmesser der Bewehrungsstäbe der betrachteten Lage
e_z	Abstand der Schwerpunkte von Wand und behinderndem Bauteil
f_{ck}	charakteristischer Wert der Betondruckfestigkeit im Alter von 56 Tagen
f_{ctm}	Mittelwert der zentrischen Betonzugfestigkeit im Alter von 56 Tagen
f_{yk}	charakteristische Streckgrenze der Bewehrung
$h_{c,eff}$	Höhe der effektiven Zugzone der Bewehrung
h_{cr}	Höhe des primären Risses in einer Wand
h_F	Höhe des behindernden Bauteils (F undament)
h_G	Höhe des G esamtbauwerks
h_{Gl}	Höhe der G rundlaufdecke
h_{pl}	Dicke der Boden p latte
h_W	Höhe des betrachteten W andabschnitts
k_0	Basisfaktor zur Ermittlung der äquivalenten Temperaturdifferenz
k_t	Faktor zur Berücksichtigung der mittleren Betondehnung innerhalb l_{es}
k_{BD}	Beiwert zur Berücksichtigung der elastischen B etondehnung zwischen den Rissen
k_F	Steifigkeit der behindernden Bauteile
k_{FK}	Faktor zur Berücksichtigung der B etonfestigkeits k lasse
k_{JZ}	Faktor zur Berücksichtigung des B etonagezeitpunkts (J ahreszeit – Sommer oder Winter)
l_{cr}	effektive Länge als Abstand der Primärrisse (cr = crack)
$l_{cr,pl}$	effektive Länge einer Boden p latte
$l_{cr,W}$	effektive Länge eines W andabschnitts
$l_{cr,W}^{unten}$	effektive Länge eines W andabschnitts bei kurzer Bauabschnittslänge; Anrisse von der Unterseite des Wandabschnitts
$l_{cr,W}^{oben}$	effektive Länge eines W andabschnitts bei kurzer Bauabschnittslänge; Rissabstand im oberen Wandabschnittsbereich
l_{es}	Einleitungslänge, innerhalb der die Verbundkraft zwischen Bewehrung und Beton eingeleitet wird
n	Anzahl der Sekundärrisspaare
w	Rissbreite
w_k	Rissbreiten k riterium
w^P	Rissbreite des P rimärrisses

w_{beh}	behinderte Verformung
x	Abstand des freien Rands der Wand zum gedachten Verformungsruhepunkt in Längsrichtung
z_B	Koordinate in Bezug auf den Schwerpunkt des Bauabschnitts (alle bisher vorhandenen Bauabschnitte und der neu hinzukommende Wandabschnitt)
z_G	Koordinate in Bezug auf den Schwerpunkt des Gesamtbauwerks
z_W	Koordinate in Bezug auf den Schwerpunkt des neu hinzukommenden Wandabschnitts
A_c	Querschnittsfläche eines allgemeinen Stahlbetonquerschnitts
$A_{c,\text{eff}}$	Fläche der Effektivzone der Bewehrung
A_{zus}	Querschnittsfläche des zusätzlich am freien Rand der Wand aktivierten Eigengewichts
A_B	Querschnittsfläche des Bauabschnitts (alle bisher vorhandenen Bauabschnitte und der neu hinzukommende Wandabschnitt)
A_F	Querschnittsfläche des behindernden Bauteils (Fundament und vorhergehende Wandabschnitte)
$A_{F,\text{eff}}$	effektive (aktivierbare) Querschnittsfläche des behindernden Bauteils (Fundament und vorhergehende Wandabschnitte)
A_G	Querschnittsfläche des Gesamtbauwerks
A_W	Querschnittsfläche des neu hinzukommenden Wandabschnitts
$A_{s,\text{erf}}$	erforderliche Mindestbewehrung
E_{cm}	Mittelwert des Elastizitätsmodul des Betons im Alter von 56 Tagen, je nach Bauteil auch mit E_F , E_W bezeichnet
E_s	Elastizitätsmodul des Bewehrungsstahls
I_B	ideelles Trägheitsmoment des Bauabschnitts (alle bisher vorhandenen Bauabschnitte und der neu hinzukommende Wandabschnitt)
I_F	ideelles Trägheitsmoment des behindernden Bauteils (Fundament und vorhergehende Wandabschnitte)
$I_{F,\text{eff}}$	effektives (aktivierbares) ideelles Trägheitsmoment des behindernden Bauteils (Fundament und vorhergehende Wandabschnitte)
I_G	ideelles Trägheitsmoment des Gesamtbauwerks
I_W	ideelles Trägheitsmoment des neu hinzukommenden Wandabschnitts
L	Länge des betrachteten Bauteils bzw. des Bauabschnitts
$L_{\text{eff,max}}$	maximal aktivierbare Bauteillänge
L_{BA}	Länge des Bauabschnitts
M_g	äußeres Moment infolge Eigengewichtsaktivierung
M_W	Moment im neu hinzukommenden Wandabschnitt infolge Querschnittskompatibilität
N_W	Normalkraft im neu hinzukommenden Wandabschnitt infolge Querschnittskompatibilität
α_e	Verhältnis des Elastizitätsmoduls des Bewehrungsstahls zum Elastizitätsmodul des Betons
α_T	Wärmeausdehnungskoeffizient des Betons
γ_c	Wichte des Betons
ρ_s	Bewehrungsgrad
$\rho_{s,\text{eff}}$	$\rho_{s,\text{eff}} = A_s / 2 \cdot A_{c,\text{eff}}$ Bewehrungsgrad der effektiven Zugzone
σ_{Zw}	Zwangsspannung im Beton ohne Rissbildung
σ_{Zw}^{II}	Zwangsspannung im Beton nach der Rissbildung
Δl	Längenänderung am gezwängten System
ΔL	Überstand des vorhergehenden Bauabschnitts am freien Rand der Wand (zusätzlich aktivierbares Eigengewicht in Längsrichtung)

ΔT	Temperaturänderung (allgemein)
$\Delta T_{\text{adiab},7\text{d}}$	adiabatische Temperaturerhöhung des Betons nach sieben Tagen
ΔT_{nom}	Vorhaltemaß zur Berücksichtigung des Unterschieds zwischen Frischbetontemperatur und mittlerer Tagestemperatur der Umgebungsluft bzw. mittlere Temperatur des behinderten Bauteils
ΔT_{My}	linear veränderlicher Temperaturanteil entlang der y-Achse
$\Delta T_{\text{My,Wand}}$	horizontaler, linear veränderlicher Temperaturanteil einer Wand
ΔT_{Mz}	linear veränderlicher Temperaturanteil entlang der z-Achse
$\Delta T_{\text{Mz,eq},0}$	linear veränderliche äquivalente Temperatureinwirkung im Erhärungszeitraum
$\Delta T_{\text{Mz,G},1}$	vertikaler, linear veränderlicher Temperaturanteil des Gesamtbauwerks im Nutzungszeitraum
$\Delta T_{\text{Mz,Sohle}}$	vertikaler, linear veränderlicher Temperaturanteil der Bodenplatte
ΔT_{N}	gleichförmiger Temperaturanteil
$\Delta T_{\text{N,eq},0}$	gleichmäßige äquivalente Temperatureinwirkung im Erhärungszeitraum
$\Delta T_{\text{N,G}1}$	gleichmäßige Temperatureinwirkung im Nutzungszeitraum in der Grundlaufdecke
ΔT_{p}	Temperatureinwirkung zwischen angrenzenden Bauteilen
⊕	Zeichen steht für „ist zu kombinieren mit“

1 Einführung

1.1 Wesen der Zwangsbeanspruchung

Die Auswirkung einer Verformungseinwirkung bei Stahlbetonbauteilen kann mit dem in Bild 1 dargestellten Stab verdeutlicht werden.

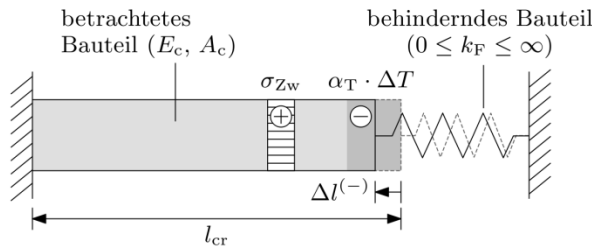


Bild 1: Gleichgewicht und Verformungskompatibilität in einem teilweise behinderten Stab unter Temperaturverkürzung

Hier wird die Behinderungssituation über die Federsteifigkeit k_F beschrieben. Der Zwangskraftaufbau bis zur Rissbildung kann wie folgt ermittelt werden:

$$\sigma_{zw} = -\alpha_T \cdot \Delta T \cdot E_c \cdot a \quad \text{mit } a = \left(1 + \frac{E_c \cdot A_c}{k_F \cdot l_{cr}}\right)^{-1} \quad (1)$$

mit:

σ_{zw}	Zwangsspannung
α_T	Wärmeausdehnungskoeffizient des Betons
$\alpha_T \cdot \Delta T$	Einwirkung; hier: Temperaturdehnung des Bauteils
E_c	E-Modul des Betons
a	Behinderungsgrad: Verhältnis aus behinderter (spannungswirksamer) Dehnung und freier Dehnung am ungezwängten System
$\frac{E_c \cdot A_c}{l_{cr}}$	Federsteifigkeit des betrachteten Bauteils
A_c	Querschnittsfläche des Betonquerschnitts
l_{cr}	effektive Länge als Abstand der Primärrisse
k_F	Steifigkeit der behindernden Bauteile

Nach der Rissbildung ist die Rissbreite und somit auch die erforderliche Bewehrung entscheidend von der effektiven Länge l_{cr} abhängig. Die effektive Länge stellt hier den Rissabstand dar, der sich ohne Einfluss der Bewehrung lediglich anhand der Randbedingungen einstellt (siehe Abschnitt 2.3). Je kleiner die effektive Länge, umso größer ist der Zwangskraftabbau. Dies ist dadurch begründet, da ein Riss die Bauteilsteifigkeit nur in einem bestimmten Bereich, der Einleitungslänge der Bewehrung l_{es} reduziert. Auch bei vollständiger Behinderung kann die Summe der Rissbreiten und der Zwangsverformung im ungerissenen Bauteilbereich nicht größer sein als die Bauteilverkürzung aufgrund der Einwirkung. Man spricht in diesem Zusammenhang von der Verformungskompatibilität.

Allgemein können diese Zusammenhänge wie folgt beschrieben werden:

$$\alpha_T \cdot \Delta T \cdot l_{cr} = \Delta l - \sum W - \frac{\sigma_{Zw}^{II}}{E_c} \cdot (l_{cr} - \sum l_{es} \cdot (1 - k_t)) \quad \text{für } \Delta T < 0 \quad (2)$$

mit:

α_T	Wärmeausdehnungskoeffizient des Betons
ΔT	Temperaturänderung
l_{cr}	effektive Länge als Abstand der Primärrisse
Δl	Längenänderung am gezwängten System; für $a = 1$ folgt $\Delta l = 0$
$\sum W$	Summe der Rissbreiten
$\frac{\sigma_{Zw}^{II}}{E_c}$	elastische Dehnung des Betons
l_{es}	Einleitungslänge; Abstand vom Rissufer bis zur Stelle gleicher Dehnung zwischen Beton und Bewehrung
k_t	Faktor zur Berücksichtigung der mittleren Betondehnung innerhalb l_{es}

Zur Ermittlung der erforderlichen Mindestbewehrung sind die Größenordnung der effektiven Länge, die Größe der Verformungseinwirkung und des Behinderungsgrads von entscheidender Bedeutung.

Weiterhin spielt der Rissbildungsprozess in Betonbauteilen eine wichtige Rolle. Dazu ist von großem Interesse, ob sich der gesamte Betonquerschnitt am Rissbildungsprozess beteiligt, da sich die Rissbildung bei dünnen und massigen Bauteilen unterscheidet. Die Modellvorstellung differenziert im Hinblick auf den Dehnungsverlauf, die Erstrissbildung und abgeschlossene Rissbildung. Zusätzlich wird zwischen Primärriss und Sekundärrissbildung unterschieden. Primärrisse durchtrennen grundsätzlich den gesamten unter Zugspannung stehenden Querschnittsbereich, während Sekundärrisse nur die effektive Zugzone ($h_{c,eff}$) erfassen. In dünnen Bauteilen entspricht die effektive Zugzone dem Gesamtquerschnitt. Sekundärrisse breiten sich deshalb in dünnen Bauteilen wie Primärrisse über den gesamten Querschnitt aus. Im Gegensatz dazu wird in massigen Bauteilen aufgrund der Bewehrungskonzentration im Randbereich durch die effektive Zugzone ($h_{c,eff}$) nur ein Teil des Querschnitts aktiviert (siehe Bild 2). Diese Art der Rissbildung kann für alle Wasserbauwerke (Bauteile von Wasserbauwerken) angenommen werden.

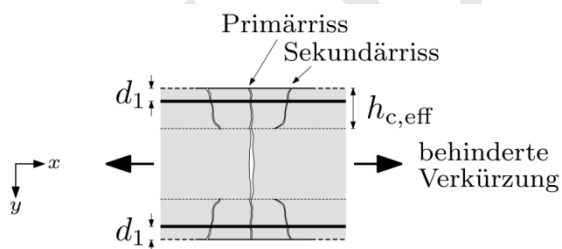


Bild 2: Rissbild in massigen Bauteilen; Primärriss und Sekundärrisse in der effektiven Zone unter zentrischem Zwang

Sinngemäß können die hier beschriebenen Zusammenhänge auf Bauteile mit überwiegender Biegebeanspruchung (d. h. Biegezwang) übertragen werden.

1.2 Besonderheit von Wasserbauwerken

In der Regel haben Wasserbauwerke Querschnitte, deren kleinste Bauteilabmessung $\geq 0,8$ m und deren Bewehrung in der Randzone angeordnet ist. Infolge der großen Bauteildicken und der im Wasserbau vorherrschenden Randbedingungen hat das Trocknungsschwinden untergeordneten Einfluss auf die

Bauteilverkürzung. Die großen Abmessungen der Bauteile führen außerdem zu einer Trägheit bei Tagesgangtemperaturschwankungen, insbesondere bei extremen Witterungsverhältnissen. Beide Effekte sind daher nur im Randbereich der Querschnitte von Bedeutung und werden von den Empfehlungen zur Bemessung der frühen und späten Zwangsbeanspruchung auf Grundlage der Verformungskompatibilität nicht berücksichtigt (Tue et al. 2018). Diese Effekte sollten daher mit einer Oberflächenbewehrung berücksichtigt werden, die dazu dient, die Dauerhaftigkeit sicherzustellen (siehe Abschnitt 4.1).

Der Lastabtrag bei Wasserbauwerken erfolgt in der Regel überwiegend über die Querrichtung des Bauwerks, sodass die Längsrichtung hauptsächlich durch Zwang beansprucht wird. Aus diesem Grund wurden bis Mitte der 1990er Jahre Raumfugen im Abstand von bis zu 15 m angeordnet. Dadurch konnte die Zwangsbeanspruchung in Längsrichtung reduziert werden und die Anordnung einer Mindestbewehrung zur Rissbreitenbeschränkung war ausreichend. Die Erfahrungen mit dieser Blockfugen-Bauweise haben gezeigt, dass Fugen immer eine Schwachstelle der Konstruktion darstellen und ein großes Schadenspotential innehaben. Sollten die Blockfugen undicht sein, so besteht durch das große hydraulische Gefälle die Gefahr der Bodenerosion im Hinterfüllungs- und Gründungsbereich.

1.3 Übertragbarkeit des Eurocode 2 (EC 2)

Das Bemessungskonzept des EC 2 (DIN EN 1992-1-1) für die Mindestbewehrung basiert auf der Annahme, dass die effektive Länge l_{cr} unendlich ist. Daher führt ein Einzelriss nicht zum nennenswerten Abbau der Zwangskraft. Die Aufgabe der Mindestbewehrung ist es, eine sukzessive Rissbildung zu ermöglichen, um die aufzunehmende Verformung auf mehrere Risse zu verteilen und somit die Rissbreite zu begrenzen. Da die Zugfestigkeit in einem Bauteil stark streut und die Rissbildung an den Stellen mit geringer Zugfestigkeit auftritt, ist es ausreichend, die Risskraft mit der mittleren Zugfestigkeit zu ermitteln.

Diese Annahme des EC 2 liegt vor allem für dicke Bauteile zu sehr auf der sicheren Seite, da zum einen die effektive Länge l_{cr} durch die geometrischen Randbedingungen begrenzt ist und somit die Bildung des Primärrisses mit einem deutlichen Abbau der Zwangskraft einhergeht. Zum anderen ist zur Bildung von Sekundärrissen nur ein Bruchteil der Risskraft des gesamten Querschnitts erforderlich. Insgesamt ist die von der Bewehrung aufzunehmende Zwangskraft dadurch kleiner als die Risskraft des gesamten Querschnitts.

Im EC 2 gibt es keine Empfehlung für die Überlagerung von frühem Zwang (Hydratation) und spätem Zwang (z. B. aufgrund von saisonalen Temperaturänderungen). Daher ist aufgrund der großen Bedeutung der Mindestbewehrung zur Aufnahme der Zwangsbeanspruchung für fugenlose Wasserbauwerke eine Bemessung nach EC 2 für Wasserbauwerke nicht zu empfehlen. Für Wasserbauwerke sind weitere Betrachtungen notwendig, die o. g. Punkte bei der Bemessung der Mindestbewehrung berücksichtigen.

1.4 Bisherige Erfahrung mit der fugenlosen Bauweise

Mit dem Bau des Bremer Weserwehres Anfang der 1990er Jahre wurde das erste fugenlose Verkehrswasserbauwerk mit Grundrissabmessungen von 180 x 37 m hergestellt. Ende des Jahrzehnts folgte der Neubau der Doppelsparschleuse Hohenwarthe bei Magdeburg. Aufgrund des wenig tragfähigen Baugrundes wäre es in diesem Fall bei einer fugenbehafteten Bauweise zu unterschiedlichen Setzungen der einzelnen Bauwerksblöcke gekommen, die mit Fugenbändern nicht mehr beherrschbar waren, sodass die Lösung dieser Problematik nur in einer fugenlosen 5,50 m dicken Sohlplatte bestand. Es folgten im ersten Jahrzehnt des 21. Jahrhunderts weitere Schleusenneubauten, wobei zur Erfahrungsgewinnung die Anzahl der Fugen im Bauwerk sukzessive reduziert wurde: von der fugenlosen Sohle, verlängerten Kammerwandblöcken (bis 45 m statt wie bisher üblich 15 m), über Kammerwände mit Fugenanordnungen nur im oberen Bereich bis hin zur gesamtmonolithischen Bauweise von Schleusenkammer, Sohle und Wänden, sowie den Häuptern. Inzwischen hat sich die

fugenlose Bauweise zur Regelbauweise entwickelt, wenn die Randbedingungen und das Setzungsverhalten des Bauwerkes es zulassen. Für Schleusen ist diese Konstruktionsausbildung gemäß DIN 19703 (DIN 19703) im Abschnitt 6 normativ festgelegt.

Diese Entwicklung wurde durch intensive Voruntersuchungen und Machbarkeitsstudien der BAW und planenden Ingenieurbüros begleitet. Weiterhin wurden bei einigen Neubauten Messungen in Betonbauwerken während der Herstellung und Überwachungsmessungen am fertigen Bauwerk im laufenden Betrieb durchgeführt und ausgewertet. Ergänzend dazu erfolgten an repräsentativen Betonoberflächen dieser Wasserbauwerke Risskartierungen. Diese zeigten, dass die gemessenen Rissbreiten überwiegend deutlich unter dem theoretischen Rechenwert der Rissbreite von 0,25 mm lagen. Bisher sind Schäden als Folge der fugenlosen Bauweise bzw. ungewöhnliche Rissbildungen oder Rissbewegungen nicht bekannt. Dies belegen die regelmäßig durchgeführten Bauwerksinspektionen der WSV.

Zusammenfassend betrachtet sind aufgrund dieser Bauweise robuste Wasserbauwerke entstanden, in denen Fugen als Schwachstellen reduziert bzw. ganz vermieden werden konnten. Dadurch kann die fugenlose Bauweise im Verkehrswasserbau als bewährte Bauweise betrachtet werden, die zur Erstellung robuster Wasserbauwerke beiträgt.

GELBDRUCK

2 Theoretische Grundlagen

2.1 Verformungseinwirkungen

2.1.1 Allgemeines

Generell sind bei der Ermittlung der Mindestbewehrung verschiedene Verformungseinwirkungen und Bemessungszeitpunkte zu betrachten. Zum einen kann das Betonbauteil im Erhärungszeitraum durch Hydrationswärme und Schwindverkürzungen erhebliche Verformungseinwirkungen erfahren. Daraus entstehen Zwangsspannungen. In diesem Zusammenhang spricht man von frühem Zwang. Zum anderen können aber auch im Nutzungszeitraum veränderliche klimatische Randbedingungen bei großflächigen Geometrien und die Boden-Bauwerk-Interaktion zu nennenswerten Zwangsbeanspruchungen führen. In diesem Zusammenhang spricht man von spätem Zwang. Wegen des geringen Einflusses des Schwindens und der geringen Steifigkeit des Baugrunds gegenüber der Bauwerkssteifigkeit führen die Einwirkungen im Nutzungszeitraum bei Wasserbauwerken hauptsächlich zu einer Biegebeanspruchung im Gesamtbauwerk. Die zugehörigen Dehnungen der einzelnen Bauteile können durch Annahme des Ebenbleibens des gesamten Querschnitts ermittelt werden. Über die Integration der Dehnung erhält man die anzusetzende Verformung zur Ermittlung der Mindestbewehrung des betrachteten Bauteils.

2.1.2 Verformungen infolge der Betonerhärtung

Für die Ermittlung der Verformungen infolge der Betonerhärtung wurde in (Schlicke 2016) eine umfangreiche Parameterstudie durchgeführt. In Abschnitt 3 dieses Merkblatts sind die anzusetzenden Verformungen zur Ermittlung der Mindestbewehrung bauteilspezifisch angegeben. Allgemein ist es erstrebenswert, den Temperaturunterschied zwischen Bauteil und Bauteilumgebung durch betontechnologische Maßnahmen möglichst gering zu halten. Nachfolgend sollen wesentliche Einflussfaktoren auf die Betonerhärtung zusammenfassend erläutert werden.

2.1.2.1 Einfluss der Betonrezeptur

Die erforderliche betontechnologische Vorgehensweise (Wahl der Betonrezeptur) zur Sicherstellung einer ausreichenden Dauerhaftigkeit des Betons einerseits, sowie der Reduzierung von Rissen bzw. Rissbreiten aus frühem Zwang andererseits sind zumindest teilweise konträr. Hierbei sind beispielsweise Zementarten, welche im Hinblick auf Dauerhaftigkeitsaspekte wie Frostwiderstand durchaus zweckmäßig sind, für die Minimierung der Hydrationswärmeentwicklung in vielen Fällen ungünstig. Aufgrund der geringen Wärmeleitfähigkeit von Beton ist der Einfluss der Betonrezeptur bei massigen Bauteilen größer als bei dünnen Bauteilen. Dabei können die vorherrschenden adiabatischen Verhältnisse in massigen Bauteilen den Hydrationsprozess gegenüber einer isothermen Lagerung beschleunigen, was als Selbstbeschleunigung bezeichnet wird (Braasch 2004). Daher sollte eine Betonrezeptur mit möglichst geringer Wärmeentwicklung verwendet werden. Dies kann durch eine geringere Zementmenge oder die Verwendung von Zementen mit geringerer Hydrationswärmeentwicklung (LH-Zement) erreicht werden.

2.1.2.2 Einfluss der Frischbetontemperatur und des Umgebungsklimas während des Erhärungszeitraums

Einen großen Einfluss auf die Zwangsbeanspruchung hat die Differenz zwischen Frischbetontemperatur und der mittleren Umgebungstemperatur sowie die Tagestemperaturschwankungen. Unter winterlichen Bedingungen findet die Betonerhärtung auf einem niedrigeren Temperaturniveau statt und erfährt somit die Vorteile einer verlangsamteten Hydrationsgeschwindigkeit und einer niedrigen Frischbetontemperatur. Dadurch sind beide Faktoren unter winterlichen Bedingungen für die Größe der Zwangsbeanspruchung als günstiger zu bewerten. Ein Winter-Szenario ist dann gegeben, wenn die Frischbetontemperatur 15 °C und die Bauteilumgebungstemperatur während der Hydrationsphase der ersten 28 Tage 10 °C nicht überschreitet.

2.1.2.3 Einfluss der Nachbehandlung

Die Betonqualität der Randzone ist ausschlaggebend für die Dauerhaftigkeit von Stahlbetonbauteilen (siehe (BMVBS 2012), (DIN EN 13670) Abschnitt 8.5 und (DAfStb 2010)). Aus diesem Grund ist bei massigen Bauteilen eine frühzeitig begonnene und ausreichend lange Nachbehandlung unbedingt erforderlich, da hierdurch die Mikrostruktur der Randzone verbessert und die Bildung von Oberflächenrissen infolge der Eigenspannung vermieden bzw. reduziert werden kann.

Entgegen der Annahmen vieler Literaturquellen deuten die in (Turner et al. 2016) durchgeführten Versuche darauf hin, dass die Größe der Zwangskraft durch eine thermische Nachbehandlung (Entfernung von Schalung und Dämmung zu unterschiedlichen Zeitpunkten bzw. wärmeerhaltende Nachbehandlung) kaum vermindert wird. Dennoch ist zur Sicherstellung der Dauerhaftigkeit bei dicken Bauteilen eine Nachbehandlung zur Vermeidung der Oberflächenrisse infolge Eigenspannung unbedingt erforderlich. Die Geschwindigkeit der Festigkeitsentwicklung beeinflusst maßgeblich die Nachbehandlungsdauer, daher ist dieser Einflussfaktor bei der Planung der Nachbehandlungsdauer besonders zu berücksichtigen. Regelungen zur Nachbehandlung enthält (BMVBS 2012).

2.1.3 Einfluss der klimatischen Temperatureinwirkungen

Die klimatischen Temperatureinwirkungen unterscheiden sich von anderen veränderlichen Einwirkungen durch ihre zyklischen Jahres- und Tagesgänge. Bei der Definition des quasi-ständigen Beanspruchungsniveaus sollte dies berücksichtigt werden, da eine Definition als zeitlicher Mittelwert nicht zielführend ist. In (Lichte 2004) und (Turner 2017) wird vorgeschlagen, den quasi-ständigen Wert aus den durchschnittlichen saisonalen Tagesextremwerten der Bauwerkstemperatur abzuleiten.

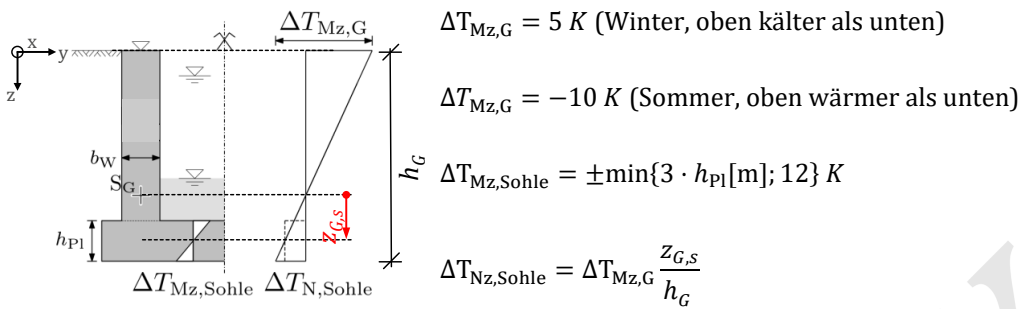
Die Temperaturfeldänderungen rufen ein Verformungsbestreben im Bauteil hervor. Das dem Verformungsbestreben zugrundeliegende Temperaturfeld kann entsprechend EC 1-1-5 (DIN EN 1991-1-5) in vier Anteile zerlegt werden: den gleichförmigen Temperaturanteil, zwei linear veränderliche Temperaturanteile und einen nichtlinearen Temperaturanteil. Der gleichförmige Temperaturanteil ΔT_N führt bei Dehnungsbehinderung zu einer Zwangsnormalkraft bzw. bei exzentrischer Behinderung zu Zwangsnormalkraft und -moment. Die linear veränderlichen Temperaturanteile ΔT_{My} und ΔT_{Mz} führen bei Verkrümmungsbehinderung zu Zwangsmomenten. Dabei führt ΔT_{My} zu einem Moment um die z-Achse und ΔT_{Mz} zu einem Moment um die y-Achse. Der nichtlinear verteilte Temperaturanteil ist bei Ebenbleiben des Querschnitts unabhängig von einer äußeren Verformungsbehinderung immer voll spannungswirksam. Bei gegliederten Querschnitten kann dieser zu bemessungsrelevanten Zwangsschnittgrößen am Teilquerschnitt führen.

In (Turner 2017) wurden die relevanten klimatischen Temperaturanteile bei massigen Bauteilen mit einer Finite-Elemente basierten Parameterstudie bestimmt. Hierzu wurde die Bodentemperatur der FE-Modelle zunächst mit 10 °C voreingestellt und mindestens ein Jahresgang gerechnet bis sich die Temperaturgeschichte im Bodenkörper eingespielt hatte. Anschließend wurde darauf aufbauend die eigentliche Simulation der Temperaturfeldänderungen durchgeführt.

Folgende Annahmen liegen der Simulation der Temperaturreandbedingungen zugrunde:

- Außenlufttemperatur: Zeitreihenanalyse der Lufttemperatur von Deutschland (Quelle: Deutscher Wetterdienst) im Zeitraum von 1965 bis 2014, Sinusverlauf der Tagesmittelwerte im Jahresgang.
- Wassertemperatur: Sinusverlauf im Jahresgang mit verringerter Amplitude (90%) und Phasenverschiebung (5 Tage) gegenüber der Außenlufttemperatur, kein Tagesgang, für alle Wassertiefen gleich.
- Sonneneinstrahlung und Rückstrahlung: Gesamtstrahlungsbilanz mit halbsinusförmigem Verlauf zwischen März und Oktober. Die maximale Tagessumme beträgt 1200 Wh/m².

Basierend auf den Untersuchungen in (Turner 2017) werden folgende Temperaturansätze empfohlen:



Hinweis: $\Delta T_{Nz,Sohle}$ ist die mittlere Temperatur in der Sohle, ermittelt aus $\Delta T_{Mz,G}$ des Gesamtbauwerks

Bild 3: Saisonale Temperatureinwirkungen für Wasserbehälter mit $0,8 \leq b_W, h_{Pl} \leq 10 \text{ m}$ nach (Turner 2017)

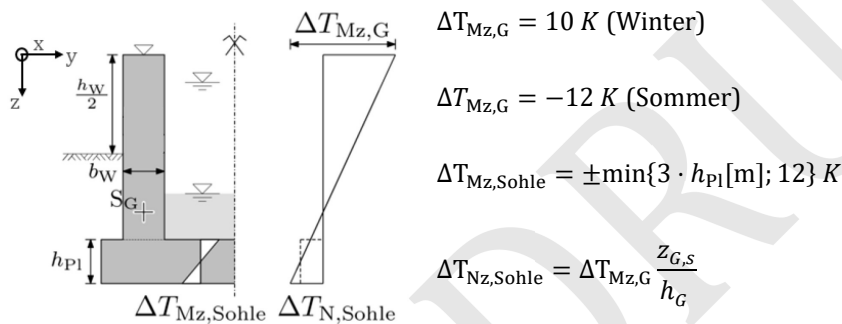


Bild 4: Saisonale Temperatureinwirkungen für Sparbecken mit $0,8 \leq b_W, h_{Pl} \leq 10 \text{ m}$ nach (Turner 2017)

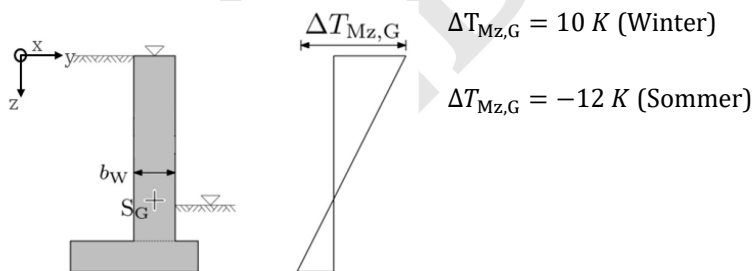


Bild 5: Saisonale Temperatureinwirkungen für Stützmauern mit $0,8 \leq b_W \leq 10 \text{ m}$ nach (Turner 2017)

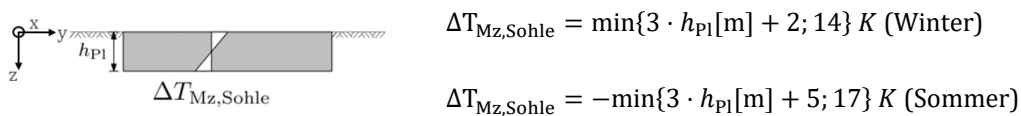


Bild 6: Saisonale Temperatureinwirkungen für Bodenplatten mit $0,8 \leq h_{Pl} \leq 10 \text{ m}$ nach (Turner 2017)

In den Wandbereichen sind neben den vertikalen Temperaturdifferenzen auch horizontale Temperaturdifferenzen zu erwarten. Im Rahmen dieses Merkblatts kann auf eine rechnerische Berücksichtigung der horizontalen Temperaturdifferenzen verzichtet werden, da es in der Vergangenheit nicht zu einer nennenswerten Bildung von horizontalen Rissen kam.

2.1.4 Einfluss der Boden-Bauwerk-Interaktion

Verformungen infolge Bauwerkssetzungen stellen ebenfalls Zwangsbeanspruchungen dar. Insbesondere bei fugenlosen Konstruktionen sind diese Zwangsbeanspruchungen im Rahmen der statischen Untersuchungen auf Grundlage des Bodengutachtens projektspezifisch zu ermitteln.

2.2 Zwangskraft im frühen und späten Betonalter

2.2.1 Zwangskraft im frühen Betonalter - Erhärtungszeitraum

In massigen Bauteilen wird die Größe der Verformungseinwirkungen im frühen Betonalter maßgeblich durch die Hydratationswärme und den Wärmeaustausch mit der Umgebung bestimmt. Weiterhin führen die Behinderung durch die angrenzenden Bauteile sowie die Aktivierung des Eigengewichts zum Aufbau der Zwangsbeanspruchung auf das Bauteil. Für den in Bild 1 dargestellten Stab wird in der Erwärmungsphase eine Druckkraft und in der anschließenden Abkühlungsphase eine Zugkraft (Bild 7) als Zwangsbeanspruchung aufgebaut.

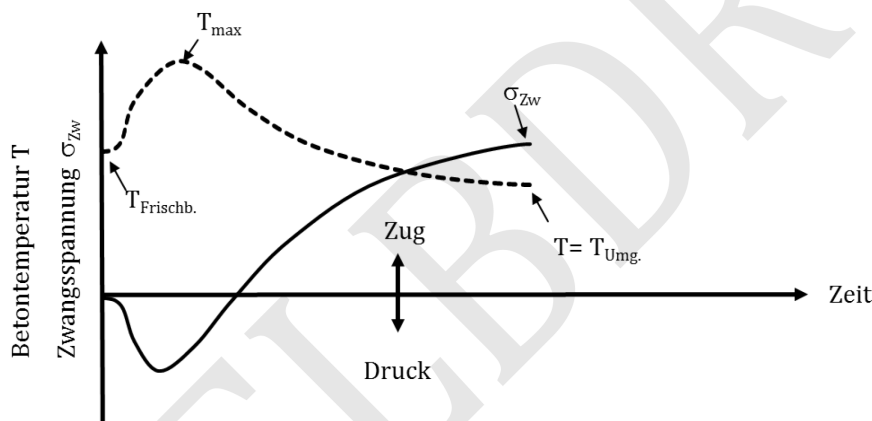


Bild 7: Erhärtungsbedingte Betontemperatur und resultierende Zwangsspannung im Herstellungszeitraum

Die genaue Ermittlung der resultierenden Zwangskraft im frühen Betonalter ist nicht trivial, da hierbei neben der zeitlichen Änderung des E-Moduls und des Behinderungsgrads auch die viskoelastischen Eigenschaften des Betons zu berücksichtigen sind. Es handelt sich um eine zeitdiskrete Berechnung. Die Zugbeanspruchung ist ausgeprägter als die Druckbeanspruchung, da sich zum einen der E-Modul des Betons erst mit der Hydratation entwickelt und zum anderen das Kriechverhalten maßgeblich vom Betonalter abhängig ist. Weiterhin ist bei massigen Bauteilen zu berücksichtigen, dass die Zwangsbeanspruchung im Allgemeinen mit erheblichen Eigenspannungen einhergeht.

Wesentliche Einflussfaktoren auf die Zwangsbeanspruchung sind die Größe der Verformungseinwirkung, der Behinderungsgrad und die viskoelastischen Eigenschaften des Betons. Dabei ist der Wert der Zwangskraft auf die notwendige Risskraft des Querschnitts begrenzt.

Hinweis: Berechnungsgrößen mit Bezug zum frühen Zwang (Erhärtungszeitraum) werden im Folgenden mit dem Index 0 gekennzeichnet.

2.2.2 Zwangskraft im späten Betonalter - Nutzungszeitraum

Das Bauwerk steht unter Witterungseinflüssen und erfährt dadurch im Nutzungszeitraum Längenänderungen und Verkrümmungen. Durch die Aktivierung des Eigengewichts sowie die Interaktion mit dem Baugrund und den angrenzenden Bauteilen werden wiederum Zwangsbeanspruchungen hervorgerufen. Bisher wurde davon ausgegangen, dass die Zwangskraft im frühen Betonalter durch Relaxation weitestgehend abgebaut wird, sodass die späte Zwangskraft im Allgemeinen nicht über die Risskraft des frühen Zwangs ansteigt. Eine Überlagerung mit einer eventuellen Zwangsbeanspruchung aus dem späten Betonalter sei daher nicht erforderlich und in der Praxis nicht üblich. Entsprechend den Ergebnissen aus (Turner 2017) liegt diese Annahme nicht auf der sicheren Seite, da der Relaxationsprozess bei erhärtungsbedingten Zugbeanspruchungen sehr schnell zum Erliegen kommt. Eine auf der sicheren Seite liegende Bemessung der Mindestbewehrung sollte den Abbau der Zwangskraft aus frühem Zwang durch Relaxation nicht berücksichtigen.

Die Ermittlung der Zwangskraft im späten Betonalter erfolgt anhand des gleichen Prinzips wie für den frühen Zwang. Der positive Einfluss der viskoelastischen Eigenschaften des Betons sollte jedoch für saisonale Temperatureinwirkungen auf der sicheren Seite liegend vernachlässigt werden, da das Relaxationsvermögen mit zunehmendem Betonalter signifikant abnimmt. Dadurch ist im Hinblick auf den wiederkehrenden Charakter der saisonalen Einwirkung eine gewisse Unsicherheit auf den positiven Einfluss gegeben. Da Wasserbauwerke hohe Anforderungen an die Wasserundurchlässigkeit stellen, sollte die Überlagerung des frühen und späten Zwangs bei fugenlosen Wasserbauwerken immer berücksichtigt werden.

Hinweis: Berechnungsgrößen mit Bezug zum späten Zwang (Nutzungszeitraum) werden im Folgenden mit dem Index 1 gekennzeichnet.

2.3 Rissprozess in massigen Bauteilen

Verformungseinwirkungen führen entsprechend Gl. (1) in Abhängigkeit vom Behinderungsgrad a zu einer Zwangsbeanspruchung. Bild 8 verdeutlicht den Zusammenhang zwischen Zwangskraft und Rissbildung in einer massigen Stahlbetonscheibe mit einer Bewehrung in der Randzone.

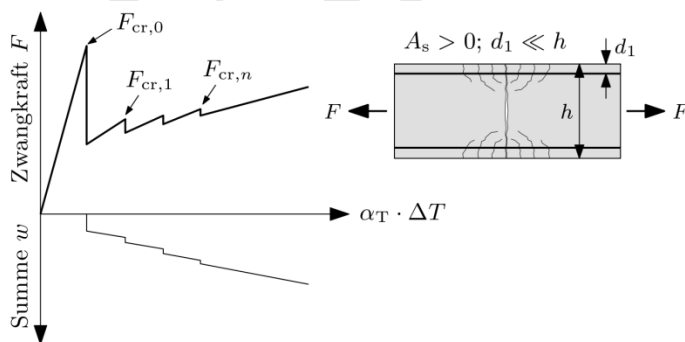


Bild 8: Zwangskraft und Rissbildung in massigen Bauteilen mit randnaher Bewehrung

Durch kontinuierlichen Zwangkraftaufbau wird die Betonspannung im Querschnitt gesteigert. Erreicht die Betonspannung die Größe der Zugfestigkeit des Betons, tritt der Primärriss auf und die Zwangskraft wird teilweise abgebaut. In der Regel tritt gleichzeitig mit dem Primärriss ein Paar von Sekundärrissen auf. Dies ist

dadurch zu erklären, dass der Primärrissabstand l_{cr} deutlich größer als die Einleitungslänge der Bewehrung l_{es} und die Risskraft der effektiven Zugzone ($A_{c,eff}$) deutlich geringer als die zum Primärriss gehörige Risskraft des Gesamtquerschnitts (A_c) ist. Nach Auftreten des Primärrisses ist der Zwangskraftabbau aufgrund der Steifigkeitsänderung des Stahlbetonquerschnitts sehr deutlich sichtbar. Mit zunehmender Verformung baut sich die Zwangskraft bis zum erneuten Entstehen eines weiteren Sekundärrisspaares wieder auf. Im Gegensatz zur Rissbildung bei Primärrissen erfolgt kein nennenswerter Abbau der Zwangskraft bei der Sekundärrissbildung. Weitere Details zu dieser Thematik können (Turner 2017) entnommen werden.

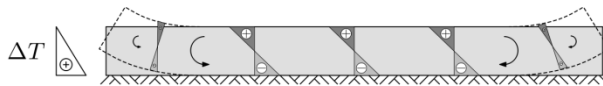
2.4 Zwangsbeanspruchung und geometrisches Rissbild für typische Bauteile

2.4.1 Bodenplatte

2.4.1.1 Erhärtungszeitraum (früher Zwang)

In (Schlicke 2016) wurde festgestellt, dass es bei Bodenplatten zwei kritische Zeitpunkte zu betrachten gilt. In Bild 9 ist die Biegespannungsverteilung in der Bodenplatte für beide Zeitpunkte qualitativ dargestellt. Zunächst wird in der ersten Phase der Betonerhärtung die Bodenplatte an der Oberseite infolge des Wärme- und Feuchtigkeitsaustauschs mit der Umgebung sowie des Schwindens im Allgemeinen verkürzt. Dahingegen führt eine Temperaturzunahme an der Unterseite durch die dämmende Wirkung des Bodens zu einer Verlängerung. Dadurch entsteht eine konkave Verkrümmung, die durch die Aktivierung des Eigengewichts der Bodenplatte behindert wird. Als Folge entsteht eine Biegebeanspruchung in der Bodenplatte mit Zugspannungen an der Oberseite und Druckspannungen an der Unterseite der Platte. Am Ende des Erhärtungszeitraums ist es umgekehrt.

$T_{max.}$ an der Unterseite:



Temperaturausgleich an der Unterseite:

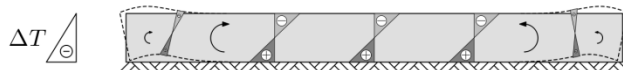
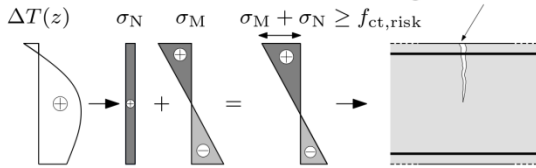


Bild 9: Kritische Zeitpunkte während des Erhärtungszeitraums in einer Bodenplatte, vgl. (Schlicke und Tue 2016a)

Während die Rissbildungsgefahr an der Plattenoberseite unabhängig vom zentrischen Zwang ist, überlagert sich der Biegezwang bei Temperaturausgleich (Zugspannung unten) mit einer Zwangsnormalkraft infolge der Interaktion mit dem Baugrund (siehe Bild 10). Da die Bodensteifigkeit im Vergleich zur Steifigkeit der Bodenplatte relativ gering ist, kann bei Wasserbauwerken für die Ermittlung der Mindestbewehrung in der Regel der Biegezwang allein zugrunde gelegt werden. Für dünne Bodenplatten oder eine sehr hohe Bodensteifigkeit (z. B. felsiger Untergrund bei gutem Verbund) sind in (Schlicke 2016; DIN EN 1992-1-1; König und Tue 1996) weiterführende Erläuterungen enthalten.

Wahrscheinliches Szenario (unabhängig vom Baugrund):
 Biegeriss an der Plattenoberseite



Seltenes Szenario (sehr steifer Baugrund):
 Trennriss über gesamte Plattenhöhe (selten)

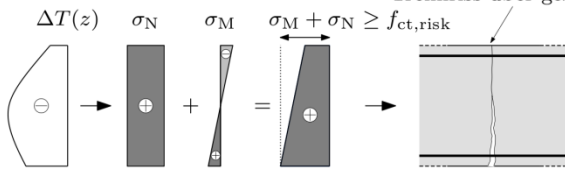


Bild 10: Rissbildung in einer Bodenplatte in Abhängigkeit der Behinderungssituation, vgl. (Schlicke und Tue 2016a)

Bei entsprechender Länge der Bodenplatte führt das Verkrümmungsbestreben zu einer vollständigen Aktivierung des Eigengewichts. Für die Zwangsspannung und den Behinderungsgrad gilt:

$$\sigma_{Zw,i} = \pm \frac{\alpha_T \cdot \Delta T_{Mz,i} \cdot E_c}{2} \cdot a_{M,i} \quad (3)$$

$$\text{mit: } a_{M,i} = \frac{3}{2} \cdot \frac{\gamma_c \cdot L^2}{\alpha_T \cdot |\Delta T_{Mz,i}| \cdot E_c \cdot h_{Pl}} \leq 1 \quad (4)$$

und

- $\sigma_{Zw,i}$ Zwangsspannung
- α_T Wärmeausdehnungskoeffizient des Betons
- $\Delta T_{Mz,i}$ vertikale Temperaturdifferenz
- $a_{M,i}$ Behinderungsgrad bei Biegezwang,
 $i = 0$: Erhärtungszeitraum, $i = 1$: Nutzungszeitraum
- E_c E-Modul des Betons
- γ_c Wichte des Betons
- h_{Pl} Dicke der Bodenplatte
- L Länge der Bodenplatte in Betrachtungsrichtung

Auf der sicheren Seite liegend ist ohne Berücksichtigung der Bewehrung gemäß (Schlicke 2016) an der Ober- und Unterseite der Platte ein regelmäßiges Rissbild mit folgendem maximalen Primärrissabstand zu erwarten:

$$l_{cr,Pl} = \sqrt{\frac{f_{ctm} \cdot h_{Pl}}{3 \cdot \gamma_c}} \leq \frac{L}{2} \quad (5)$$

mit:

- $l_{cr,Pl}$ effektive Länge einer Bodenplatte
- h_{Pl} Dicke der Bodenplatte
- f_{ctm} Mittelwert der zentrischen Betonzugfestigkeit im Alter von 56 Tagen

2.4.1.2 Nutzungszeitraum

In der Regel ist im Nutzungszeitraum ebenfalls der Biegezwang aufgrund der vertikalen Temperaturdifferenz $\Delta T_{Mz,1}$ maßgebend und die Zwangsbeanspruchung kann mit Gl. (3) bestimmt werden.

Bild 11 stellt schematisch die gesamte Spannungsgeschichte an der Ober- und Unterseite einer Bodenplatte bei reiner Biegebeanspruchung dar. Bei der Überlagerung von frühem und spätem Zwang sollten für die Oberseite der Bodenplatte günstige Druckspannungen am Ende des Herstellungszeitraums vernachlässigt werden.

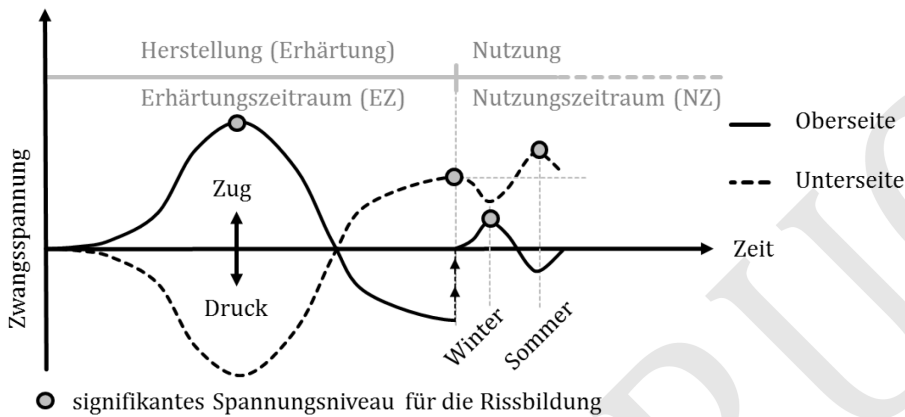


Bild 11: Schematische Darstellung der Spannungsgeschichte bei einer reinen Biegebeanspruchung an der Ober- und Unterseite von Bodenplatten

Ist die Bodenplatte Teil eines Bauwerks, welches eine Biegebeanspruchung erfährt, entsteht i. d. R. im Sommer-Szenario eine zusätzliche zentrische Zwangsbeanspruchung ($\Delta T_{N,1}$). Im Winter-Szenario entsteht eine Druckbeanspruchung, die auf der sicheren Seite liegend vernachlässigt wird.

2.4.1.3 Aufzunehmende Verformung

Die behinderte Verformung w_{beh} kann wie folgt ermittelt werden:

$$w_{beh,Pl} = (\sigma_{Zw}(\Delta T_{Mz,eq,0}) \oplus \sigma_{Zw}(\Delta T_{Mz,1}) \oplus \sigma_{Zw}(\Delta T_{N,1})) \cdot \frac{l_{cr,Pl}}{E_c} \quad (6)$$

mit:

- $w_{beh,Pl}$ aufzunehmende Verformung bzw. behinderte Verformung der Bodenplatte
- σ_{Zw} Zwangsspannung
- $\Delta T_{Mz,eq,0}$ linear veränderlicher äquivalente Temperatureinwirkung im Erhärtungszeitraum
- $\Delta T_{Mz,1}$ linear veränderlicher Temperaturanteil entlang der z-Achse im Nutzungszeitraum
- $\Delta T_{N,1}$ gleichförmiger Temperaturanteil im Nutzungszeitraum
- $l_{cr,Pl}$ effektive Länge der Bodenplatte

Oft sind die Primärrisse allein nicht ausreichend, um die Verformungskompatibilität unter Einhaltung der zulässigen Rissbreite zu erreichen. In diesen Fällen ist es die Aufgabe der Bewehrung, sicher zu stellen, dass sogenannte Sekundärrisse in der Umgebung der Primärrisse entstehen können, siehe Abschnitt 2.6.

2.4.2 Wand auf Fundament

2.4.2.1 Erhärtungszeitraum

Im Allgemeinen werden Wände auf Fundamenten oder darunterliegenden Wandabschnitten hergestellt. Sind diese Fundamente oder Wandabschnitte im Erhärtungsprozess bereits fortgeschritten, so treten diese Bauteile mit dem erstellten Bauteil in eine thermische und mechanische Wechselwirkung und führen damit zu einer Behinderungssituation am neu erstellten Bauteil. Ist die Steifigkeit des Bodens signifikant, kann diese ebenfalls zur Behinderungssituation beitragen. Die Verformung infolge Betonerrhärtung und Schwinden wird durch die Behinderungssituation dann teilweise eingeschränkt. Hierdurch entsteht in den Wänden vorwiegend zentrischer Zwang. Bild 12 veranschaulicht diesen Zusammenhang schematisch. Gemäß den Überlegungen in (Schlicke 2016) und (Schlicke und Tue 2016b) kann die Zwangsbeanspruchung durch eine Überlagerung der inneren Zwangsschnittgrößen infolge Verformungskompatibilität der benachbarten Querschnitte mit dem äußeren Moment infolge Eigengewichtsaktivierung bestimmt werden.

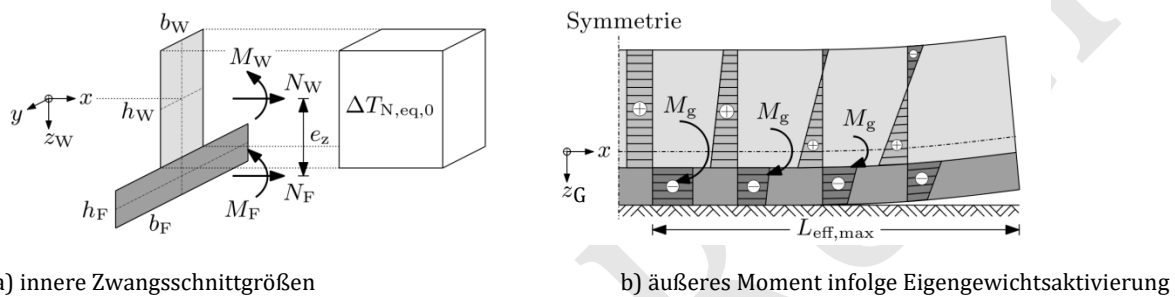


Bild 12: Verformungskompatibilität von Wänden bzw. Wandabschnitten auf Fundamenten nach (Schlicke und Tue 2016a); a) Gleichgewicht und innere Zwangsschnittgrößen, b) Eigengewichtsaktivierung

Die Zwangsschnittgrößen lassen sich auf Grundlage der Verformungskompatibilität herleiten. Mehr Details hierzu können (Schlicke und Tue 2016a) und Anlage A entnommen werden. Dieses innere Gleichgewicht geht mit einer Verkrümmung des Gesamtquerschnitts einher, welche mit zunehmender Bauteillänge das Eigengewicht aktiviert, wie in Bild 12 b) skizziert. Das resultierende äußere Moment M_g wird unter Berücksichtigung der maximal aktivierbaren Bauteillänge ($L_{eff,max}$) ermittelt. Bei der Ermittlung dieses äußeren Moments ist außerdem das Vorhandensein einer Wanddecke oder eines etwaigen Überstandes der Bodenplatte in Längsrichtung zu berücksichtigen, wie in Bild 13 gezeigt. Dies wird über die zusätzlichen Größen der Querschnittsfläche der zusätzlich am freien Rand der Wand aktivierten Querschnittsfläche (A_{zus}) und des Überstandes des vorhergehenden Bauabschnitts am freien Rand der Wand (ΔL) berücksichtigt.

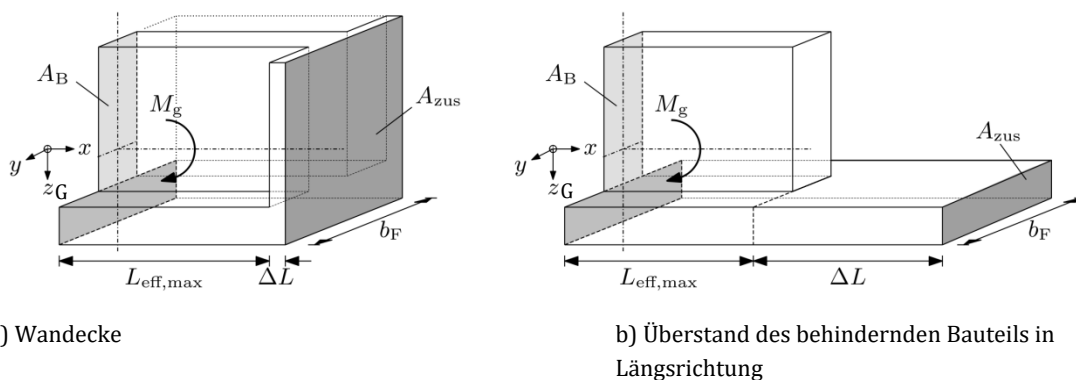


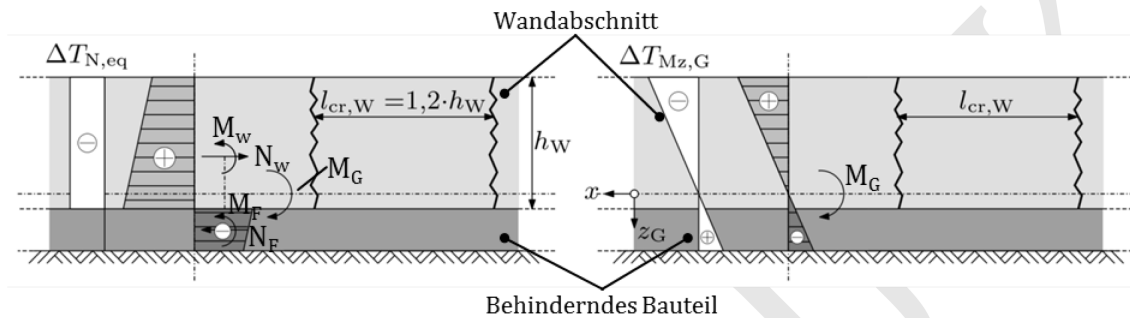
Bild 13: Einfluss des zusätzlichen Eigengewichts am freien Rand einer Wand, vgl. (Schlicke und Tue 2017); a) Wanddecke, b) Überstand

Bei im Wasserbau üblichen Bauteilgeometrien (hohe Bauteilmassigkeit $b_W \geq 1,8 \text{ m}$ und Bauabschnittslängen $\geq 3,5 \cdot h_W$) kommt es im Erhärungszeitraum zu Trennrissen über die gesamte Wand- bzw. Bauabschnittshöhe h_W , wie Bild 14 a) qualitativ darstellt. In (Schlicke 2016) wird gezeigt, dass der Abstand der Trennrisse ($l_{cr,W}$) wie folgt abgeschätzt werden kann:

$$l_{cr,W} = 1,2 \cdot h_W \quad (7)$$

mit:

$l_{cr,W}$ effektive Länge als Abstand der Primärrisse
 h_W Wandhöhe bzw. Höhe des Bauabschnitts



a) Erhärungszeitraum

b) Nutzungszeitraum

Bild 14: Längsansicht der Wand: Abstand der Primärrisse bei Wänden mit langer Bauabschnittslänge ($L_{BA} \geq 3,5 \cdot h_W$); a) Erhärungszeitraum, b) Nutzungszeitraum

Besteht die Möglichkeit, dass im Erhärungszeitraum keine Trennrisse entstehen, so ist Anlage B zu beachten.

2.4.2.2 Nutzungszeitraum (später Zwang)

Im Nutzungszeitraum wird der Biegezwang am Gesamtquerschnitt maßgebend. Diese Zwangsbeanspruchung wird durch eine vertikale Temperaturdifferenz $\Delta T_{Mz,G,1}$ hervorgerufen, siehe (Turner 2017) und Bild 14 b). Bei üblichen Längsabmessungen der Bauwerke im Wasserbau wird das Verkrümmungsbestreben immer vollständig behindert, daher ist der Behinderungsgrad a immer gleich 1.

Auf den zusätzlich zu berücksichtigenden Temperaturanteil des horizontalen Temperaturgradienten $\Delta T_{My,Wand,1}$, der zu einer zusätzlichen Biegebeanspruchung über die Wanddicke führt, kann aufgrund bisheriger Erfahrungen in der Bundesanstalt für Wasserbau verzichtet werden.

2.4.2.3 Aufzunehmende Verformung

Die aufzunehmende Verformung im Primärriss setzt sich allgemein wie folgt zusammen:

$$w_{beh,W} = [\sigma_{Zw}(\Delta T_{N,eq,0}) + \sigma_{Zw}(\Delta T_{Mz,G,1})] \cdot \frac{l_{cr,W}}{E_c} \quad (8)$$

mit:

$w_{beh,W}$ aufzunehmende Verformung des Wandabschnitts bzw. behinderte Verformung des Wandabschnitts
 σ_{Zw} Zwangsspannung
 $\Delta T_{N,eq,0}$ gleichmäßige äquivalente Temperatureinwirkung im Erhärungszeitraum
 $\Delta T_{Mz,G,1}$ vertikaler, linear veränderlicher Temperaturanteil des Gesamtbauwerks im Nutzungszeitraum

Reichen die Primärrisse allein nicht aus, um die Verformungskompatibilität bei Einhaltung des Risskriteriums zu gewährleisten, so ist dann eine notwendige Mindestbewehrung zur Sicherstellung der Sekundärrissbildung nach Abschnitt 2.6 erforderlich.

2.5 Zwangskraftabbau bei Rissbildung

Der Rissbildungsprozess ist verbunden mit der Änderung der Zwangskraft, wobei die Änderung der Zwangskraft im Querschnitt infolge der Entstehung des Primärrisses deutlich größer ist als bei der Sekundärrissbildung. Entsprechend (Turner 2017) kann das Verhältnis zwischen der von der Bewehrung aufzunehmenden Kraft und der im Bauteil mit unbegrenzter Zugfestigkeit vorhandenen Kraft wie folgt ausgedrückt werden:

$$\frac{\sigma_{Zw}^{II}}{\sigma_{Zw}} = \left(\frac{0,2}{l_{cr}} \cdot \frac{1}{\alpha_e \rho_s} \cdot a + 1 \right)^{-1} \cdot 0,92 \cdot h^{-0,32} \quad (9)$$

mit:

σ_{Zw}	Zwangsspannung im Beton ohne Rissbildung
σ_{Zw}^{II}	Zwangsspannung im Beton nach Rissbildung
l_{cr}	effektive Länge als Abstand der Primärrisse in m
α_e	Verhältnis des Elastizitätsmoduls des Bewehrungsstahls zum Elastizitätsmodul des Betons
ρ_s	Bewehrungsgrad des Gesamtquerschnitt; $\rho_s = A_s/A_c$
h	Dicke des Bauteils in m

Die Zwangskraft bzw. Zwangsspannung im Querschnitt muss zur Entstehung von Sekundärrissen ansteigen und kann in Abhängigkeit der Anzahl der Sekundärrisspaare n mit Gl. (10) ermittelt werden:

$$\sigma_{Zw}^{II} = (1 + 0,3 \cdot (n - 1)) \cdot f_{ctm} \frac{2 \cdot A_{c,eff}}{A_c} \quad (10)$$

mit:

n	Anzahl der Sekundärrisspaare
f_{ctm}	Mittelwert der zentrischen Betonzugfestigkeit (hier: Bemessungswert)

2.6 Einfluss der Bewehrung auf die Rissverteilung

Der behinderte Anteil der Verformungseinwirkung tritt im ungerissenen Zustand ausschließlich als Zwangsspannung (-dehnung) in Erscheinung. Nach der Rissbildung wird dieser Anteil im Bauteil in Form von elastischer Betonverformung und Rissbreiten realisiert. Reichen die Primärrisse nicht aus um bei Einhaltung des Risskriteriums die Verformungskompatibilität zu gewährleisten, müssen weitere Sekundärrisse erzeugt werden. Das Verformungspotenzial eines Rissystems kann entsprechend (Bödefeld 2010) auf der sicheren Seite liegend mit Gl. (11) angegeben werden.

$$\sum w = w^P \cdot (1 + 0,9 \cdot n) \quad (11)$$

mit:

$\sum w$	Rissbreite des Rissystems
w^P	Rissbreite des Primärrisses
n	Anzahl der Sekundärrisspaare

Die zum Erreichen der Verformungskompatibilität erforderliche Anzahl der Sekundärrisspaare n wird in Abhängigkeit von Verformungseinwirkung, Primärrissabstand und zulässiger Rissbreite bestimmt. Weiterhin

werden die elastische Verformung im Beton (k_{BD}) und die Änderung des Behinderungsgrads bei der Rissbildung ($a^{0,6}$) berücksichtigt. Nach (Turner 2017) gilt allgemein:

$$n = 1,1 \cdot \left(\frac{\sigma_{Zw} \cdot l_{cr}}{E_{cm} \cdot w_k} \cdot \frac{k_{BD}}{a^{0,6}} - 1 \right) \quad (12)$$

mit: $k_{BD} = \begin{cases} 0,75; & \sigma_{Zw} < 2 \cdot f_{ctm} \\ 0,85; & \sigma_{Zw} \geq 2 \cdot f_{ctm} \end{cases}$

σ_{Zw}	Zwangsspannung im Beton ohne Rissbildung
l_{cr}	effektive Länge als Abstand der Primärrisse
E_{cm}	E-Modul des Betons im Betonalter von 56 Tagen
w_k	Rissbreitenkriterium
k_{BD}	Bewert zur Berücksichtigung der elastischen Betondehnung zwischen den Rissen
a	allgemeiner Behinderungsgrad
f_{ctm}	Mittelwert der zentrischen Betonzugfestigkeit
n	Anzahl der Sekundärrisspaare

Die Anzahl der Sekundärrisspaare muss eine natürliche Zahl sein. Das Ergebnis von Gl. (12) muss folglich auf die nächste größere, natürliche Zahl aufgerundet werden. Hiermit liegt man auf der sicheren Seite. Wird das Rissbreitenkriterium im Bauteil ohne Sekundärrisspaare bereits erfüllt ($n \leq 0$), ist die Aufgabe der Bewehrung auf die Begrenzung der Rissbreite infolge der Eigenspannung und die Sicherstellung der Dauerhaftigkeit der Randzone beschränkt (siehe Abschnitt 4.1.)

2.7 Mindestbewehrung zur Einhaltung des Rissbreitenkriteriums

Grundlage für die Festlegung der Mindestbewehrung nach (Bödefeld 2010) ist die Begrenzung der Rissbreite im Primärriss auf das Rissbreitenkriterium w_k . Wird die erforderliche Anzahl an Sekundärrisspaaren n mit Gl. (12) ermittelt, folgt:

$$a_{s,erf} = \sqrt{\frac{d_s \cdot d_1^2 \cdot b^2 \cdot f_{ctm}}{w_k \cdot E_s} \cdot (0,5 + 0,34 \cdot n)} \quad (13)$$

$a_{s,erf}$	Mindestbewehrung
d_s	Durchmesser der Bewehrung
d_1	Abstand des Bewehrungsschwerpunkts vom Bauteilrand
b	betrachtete Breite, in der Regel 1 m
f_{ctm}	Mittelwert der zentrischen Betonzugfestigkeit im Betonalter von 56 Tagen
w_k	Rissbreitenkriterium
E_s	Elastizitätsmodul des Bewehrungsstahls
n	Anzahl der Sekundärrisspaare

Die effektive Zugzone wird hier mit einer Tiefe von $h_{c,eff} = 2,5 \cdot d_1$ angenommen. Zusätzlich wird die Rissbreitenzunahme unter Dauerlast oder wiederholter Belastung berücksichtigt.

3 Bemessung

Das hier verwendete Verfahren zielt auf eine rechnerische Begrenzung der Rissbreiten ab und ist daher von Verfahren zur Rissvermeidung abzugrenzen. Die zu Grunde gelegten Annahmen gelten allgemein für Stahlbetonbauteile. Allerdings ist der Anwendungsbereich des Merkblatts auf Querschnitte mit kleinster Abmessung größer gleich 80 cm begrenzt. Wesentlicher Vorteil dieser geometrischen Abgrenzung ist, dass Sekundärrissbildung im Bauteil unterstellt werden kann.

Aufgrund der zu treffenden Annahmen und der großen Streuung der den Prozess beeinflussenden Parameter auf der Baustelle bleibt das Verfahren eine rechnerische Näherung. Darüber hinaus können die vorgestellten Berechnungen (Nachweise) nur für homogene Querschnitte geführt werden. Unstetigkeitsstellen wie Einbauten, Querschnittssprünge und andere Inhomogenitäten werden hier nicht explizit einbezogen und müssen durch eine konstruktive Bewehrungsführung ausreichend berücksichtigt werden. Es können folglich am Bauwerk vereinzelt größere Rissbreiten als die angestrebte, rechnerisch ermittelte Rissbreite auftreten, wie dies generell bei einer rechnerischen Rissbreitenbegrenzung, z. B. nach (DIN EN 1992-1-1), möglich ist.

3.1 Allgemeines Bemessungskonzept

Die Vorgehensweise bei der Bemessung besteht aus der Lösung folgender Teilaufgaben:

1. Ermittlung der äquivalenten Temperatureinwirkung im Erhärungszeitraum (EZ)
2. Ermittlung der Temperatureinwirkung im Nutzungszeitraum (NZ)
3. Ermittlung der Zwangsbeanspruchung im EZ und NZ
4. Ermittlung des Primärrissabstands
5. Ermittlung der erforderlichen Bewehrung

Die Ansätze für die äquivalenten Temperatureinwirkungen im Erhärungszeitraum wurden unter Berücksichtigung der Steifigkeitsentwicklung und der Viskoelastizität des Betons abgeleitet (Turner 2017). Parameter, welche direkt in die Berechnung eingehen, erfassen die adiabatische Temperaturerhöhung durch Hydratationswärmefreisetzung, die Bauteildicke, die Betonfestigkeitsklasse und den Betonagezeitpunkt. Die Erhärtungsgeschwindigkeit des Zements und die Differenz von Frischbeton- und Umgebungstemperatur werden auf der sicheren Seite liegend ebenfalls berücksichtigt (Schlicke 2016). Mit zunehmendem Abstand des Bewehrungsschwerpunkts zum Bauteilrand steigt die erforderliche Mindestbewehrung direkt proportional an. Daher ist unter Einhaltung der Dauerhaftigkeitskriterien eine möglichst randnahe Bewehrungsanordnung wirtschaftlich sinnvoll.

3.2 Baustoffkennwerte des Betons

Für eine Bemessung sind die nachfolgend aufgeführten Betonkennwerte relevant:

$\Delta T_{\text{adiab},7d}$	adiabatische Temperaturerhöhung des Betons nach sieben Tagen
f_{ck}	charakteristischer Wert der Betondruckfestigkeit im Alter von 56 Tagen
f_{ctm}	Mittelwert der zentrischen Betonzugfestigkeit im Alter von 56 Tagen
E_{cm}	Mittelwert des Elastizitätsmoduls des Betons nach 56 Tagen (je nach Bauteil auch mit E_F , E_W bezeichnet)
α_T	Wärmeausdehnungskoeffizient des Betons

Grundsätzlich ist die Bemessung mit den Baustoffkennwerten des im Bauwerk vorliegenden Betons durchzuführen. Idealerweise sollten die zur Anwendung kommenden Betonrezepturen und die Betoneigenschaften aus der Eignungsprüfung nach 56 Tagen zum Zeitpunkt der Bemessung bereits vorliegen. Dies ist aber in der Regel nicht der Fall.

Können zum Zeitpunkt der Berechnung noch keine gesicherten Informationen zu den Betoneigenschaften angegeben werden, muss der fachkundige Planer für die Baustoffkennwerte auf Erfahrungs- bzw. Literaturwerte zurückgreifen. Mögliche auftretende Überfestigkeiten des Betons in Bezug auf die in der Norm angegebenen Mindestfestigkeiten sind dabei zu berücksichtigen. **Die getroffenen Annahmen für die Baustoffkennwerte sind zwingend durch eine spätere Eignungsprüfung des Betons zu verifizieren.** Zusätzlich wird darauf hingewiesen, dass im Bereich der WSV die in ZTV-W LB 215 (BMVBS 2012), Tabelle 2.2 vorgegebenen Grenzwerte für die adiabatische Temperaturentwicklung und die Festigkeiten einzuhalten sind.

Der Wärmeausdehnungskoeffizient des Betons α_T ist von der verwendeten Zuschlagsart abhängig. Zur Abschätzung dieses Kennwerts können die Werte aus Tabelle 1 herangezogen werden. Liegen keine genauen Informationen vor, kann auf der sicheren Seite liegend $\alpha_T = 12 \cdot 10^{-6} K^{-1}$ verwendet werden.

Tabelle 1: Rechenwerte der linearen Wärmeausdehnungskoeffizienten α_T des Betons in Abhängigkeit der Zuschlagsart (Krauß 2001)

Zuschlagsart:	α_T [$10^{-6} K^{-1}$]
quarzitischer Zuschlag	12
Sandbeton	11
Granit	10
Dolomit	10
Kalkstein	9

3.3 Bodenplatte

3.3.1 Untere Bewehrungslage

Die erforderliche Bewehrung der unteren Lage wird im Folgenden entsprechend des zuvor vorgestellten Bemessungskonzepts ermittelt. Zur besseren Übersicht ist dazu die Vorgehensweise in Bild 15 schematisch verdeutlicht.

1. Ermittlung der äquivalenten Temperatureinwirkung im Erhärtungszeitraum (EZ):

$$\Delta T_{Mz,eq,0} = -0,8 \cdot (\min[0,6 \cdot k_0; 0,25] \cdot k_{FK} \cdot k_{JZ} \cdot \Delta T_{adiab,7d} + 0,25 \cdot \Delta T_{nom}) \quad (14)$$

Die Faktoren werden wie folgt ermittelt:

k_0 Basisfaktor zur Ermittlung der äquivalenten Temperaturdifferenz

$$k_0 = 0,14 + 0,2 \cdot h_{pl} \leq 0,74$$

k_{FK} Faktor zur Berücksichtigung der Betonfestigkeitsklasse

$$k_{FK} = 1,00 \quad \text{für C20/25}$$

$$k_{FK} = 1,05 \quad \text{für C25/30}$$

$$k_{FK} = 1,10 \quad \text{für C30/37}$$

- $k_{FK} = 1,15$ für C35/45
- $k_{FK} = 1,20$ für C40/50
- k_{JZ} Faktor zur Berücksichtigung des Betonagezeitpunkts
 - $k_{JZ} = 1,0$ bei Betonage außerhalb des Winters
 - $k_{JZ} = 0,6$ bei Betonage im Winter (Frischbetontemperatur $\leq 15\text{ °C}$ und Umgebungstemperatur $\leq 10\text{ °C}$ während der gesamten Hydratationsphase)
- $\Delta T_{\text{adiab},7d}$ adiabatischen Temperaturerhöhung des Betons nach sieben Tagen
- ΔT_{nom} Vorhaltemaß zur Berücksichtigung des Unterschieds zwischen Frischbetontemperatur und mittlerer Tagestemperatur der Umgebungsluft bzw. mittlerer Temperatur des behindernden Bauteils; $\Delta T_{\text{nom}} = 5\text{ K}$
- h_{Pl} Plattendicke in m

2. Ermittlung der Temperatureinwirkung im Nutzungszeitraum (NZ) (Sommer-Szenario):

siehe Abschnitt 2.1.3

3. Ermittlung der Zwangsbeanspruchung im EZ und NZ:

$$\Delta T_{Mz} = \Delta T_{Mz,eq,0} + \Delta T_{Mz,1} \tag{15}$$

$$\sigma_{Zw,i} = \frac{-\alpha_T \cdot \Delta T_{Mz,i} \cdot E_c}{2} \cdot a_{M,i} \tag{siehe Gl. (3)}$$

Anmerkung: Ist die Bodenplatte Teil eines Bauwerks mit Biegebeanspruchung in Längsrichtung, entsteht i. d. R. zusätzlich eine zentrische Zwangsbeanspruchung $\Delta T_{N,1}$ z. B. aus der vertikalen Temperaturdifferenz $\Delta T_{Mz,G,1}$ im Sommer.

4. Ermittlung des Primärrissabstands: siehe Gl. (5)

5. Ermittlung der erforderlichen Bewehrung:

Die erforderliche Anzahl der Sekundärrisspaare n wird mit Gl. (12) bestimmt. Ist $n > 0$ wird die erforderliche Bewehrung mit Gl. (13) berechnet.

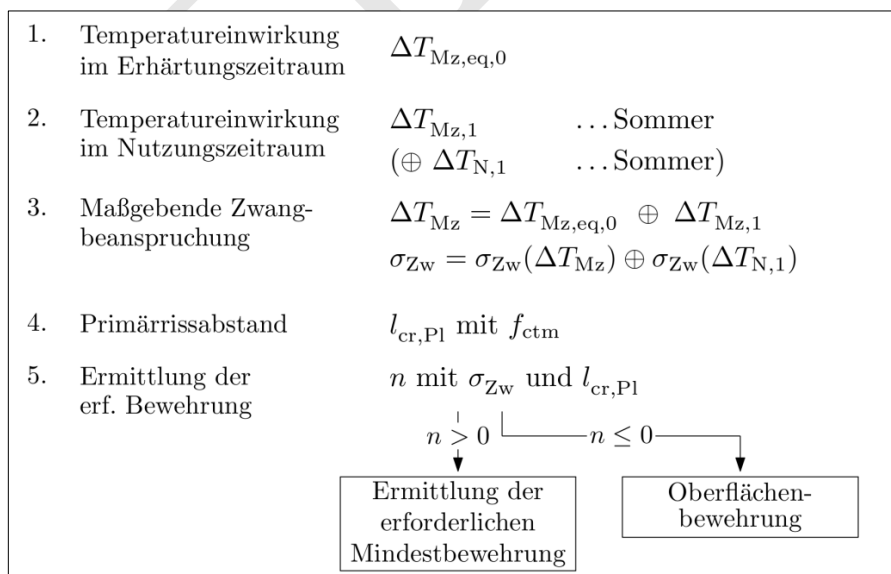


Bild 15: Vorgehensweise für die Bemessung der unteren Bewehrungslage der Bodenplatte

3.3.2 Obere Bewehrungslage

Die erforderliche Bewehrung für die obere Lage wird nachfolgend ermittelt. Bild 16 zeigt dazu schematisch das Vorgehen in 5 Teilschritten auf.

1. Ermittlung der äquivalenten Temperatureinwirkung im Erhärungszeitraum (EZ):

$$\Delta T_{Mz,eq,0} = 0,6 \cdot (k_0 \cdot k_{FK} \cdot k_{JZ} \cdot \Delta T_{adiab,7d} + \Delta T_{nom}) \quad (16)$$

Die Faktoren werden wie folgt ermittelt:

k_0	Basisfaktor zur Ermittlung der äquivalenten Temperaturdifferenz $k_0 = 0,14 + 0,2 \cdot h_{pl} \leq 0,74$
k_{FK}	Faktor zur Berücksichtigung der Betonfestigkeitsklasse $k_{FK} = 1,00$ für C20/25 $k_{FK} = 1,05$ für C25/30 $k_{FK} = 1,10$ für C30/37 $k_{FK} = 1,15$ für C35/45 $k_{FK} = 1,20$ für C40/50
k_{JZ}	Faktor zur Berücksichtigung des Betonagezeitpunkts $k_{JZ} = 1,0$ bei Betonage außerhalb des Winters $k_{JZ} = 0,6$ bei Betonage im Winter (Frischbetontemperatur $\leq 15^\circ\text{C}$ und Umgebungstemperatur $\leq 10^\circ\text{C}$ während der Hydratationsphase von 28 Tagen)
$\Delta T_{adiab,7d}$	adiabatischen Temperaturerhöhung des Betons nach sieben Tagen
ΔT_{nom}	Vorhaltemaß zur Berücksichtigung des Unterschieds zwischen Frischbetontemperatur und mittlerer Tagestemperatur der Umgebungsluft bzw. mittlerer Temperatur des behindernden Bauteils; $\Delta T_{nom} = 5\text{ K}$
h_{pl}	Plattendicke in m

2. Ermittlung der Temperatureinwirkung im Nutzungszeitraum (NZ) (Winter-Szenario): siehe Abschnitt 2.1.3
3. Ermittlung der Zwangsbeanspruchung im EZ und NZ:

$$\Delta T_{Mz} = \max \begin{cases} \Delta T_{Mz,eq,0} \\ \Delta T_{Mz,1} \end{cases} \quad (17)$$

$$\sigma_{Zw,i}^I = \frac{\alpha_T \cdot \Delta T_{Mz,i} \cdot E_c}{2} \cdot a_{M,i} \quad \text{siehe Gl. (3)}$$

Anmerkung: Ist die Bodenplatte Teil eines Bauwerks mit Biegebeanspruchung in Längsrichtung, entsteht i. d. R. zusätzlich eine zentrische Zwangsbeanspruchung $\Delta T_{N,1}$ z. B. aus der vertikalen Temperaturdifferenz $\Delta T_{Mz,G,1}$ im Sommer.

4. Ermittlung des Primärrissabstands: siehe Gl. (5)
5. Ermittlung der erforderlichen Bewehrung:

Die erforderliche Anzahl der Sekundärrisspaare n wird mit Gl. (12) bestimmt. Ist $n > 0$ wird die erforderliche Bewehrung mit Gl. (13) berechnet.

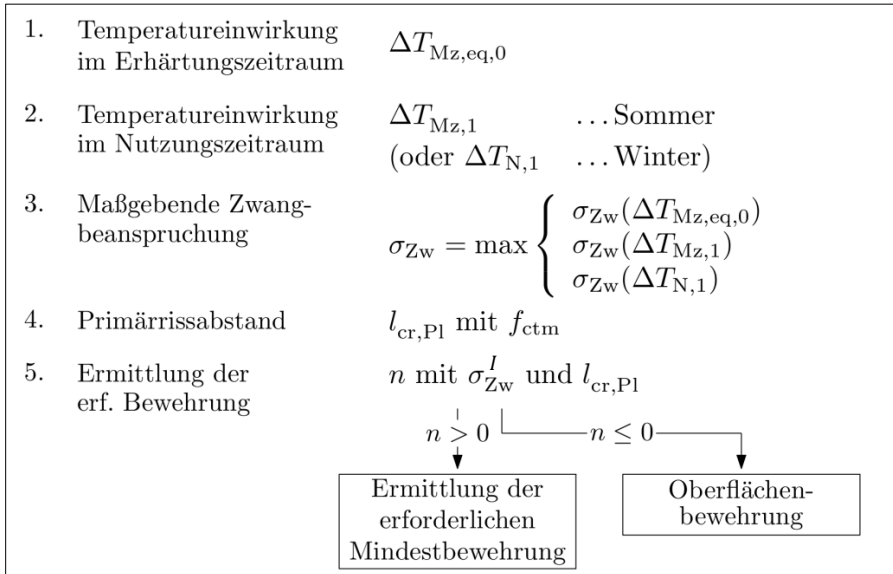


Bild 16: Vorgehensweise für die Bemessung der oberen Bewehrungslage der Bodenplatte

3.4 Wände

Nachfolgend wird die erforderliche Bewehrungsmenge für Wände entsprechend der in Bild 18 dargestellten Vorgehensweise ermittelt.

1. Temperatureinwirkung im Erhärtungszeitraum:

$$\Delta T_{N,eq,0} = -0,7 \cdot (k_0 \cdot k_{FK} \cdot k_{JZ} \cdot \Delta T_{adiab,7d} + \Delta T_{nom}) \quad (18)$$

Die Faktoren werden wie folgt ermittelt:

k_0 Basisfaktor zur Ermittlung der äquivalenten Temperaturdifferenz

$$k_0 = 0,7 - 0,2/b_W^{0,3}$$

k_{FK} Faktor zur Berücksichtigung der Betonfestigkeitsklasse

$$k_{FK} = 0,90 \quad \text{für C20/25}$$

$$k_{FK} = 0,95 \quad \text{für C25/30}$$

$$k_{FK} = 1,00 \quad \text{für C30/37}$$

$$k_{FK} = 1,05 \quad \text{für C35/45}$$

$$k_{FK} = 1,10 \quad \text{für C40/50}$$

k_{JZ} Faktor zur Berücksichtigung des Betonagezeitpunkts (Jahreszeit)

$$k_{JZ} = 1,0 \quad \text{bei Betonage außerhalb des Winters}$$

$$k_{JZ} = 0,7 + 0,1 \cdot b_W \leq 1,0 \quad \text{bei Betonage im Winter (Frischbetontemperatur } \leq 15^\circ\text{C und Umgebungstemperatur } \leq 10^\circ\text{C während der gesamten Hydratationsphase)}$$

$\Delta T_{adiab,7d}$ adiabatische Temperaturerhöhung nach sieben Tagen

ΔT_{nom} Vorhaltemaß zur Berücksichtigung des Unterschieds zwischen Frischbetontemperatur und mittlerer Temperatur des behindernden Bauteils

$$\Delta T_{nom} = 5 \text{ °K}$$

b_W Breite der Wand (in m)

2. Temperatureinwirkung im Nutzungszeitraum:

siehe Abschnitt 2.1.3

3. Maßgebende Zwangsbeanspruchung:

Die Lage der Querschnittsfaser j in Bezug auf die relevanten Schwerpunkte des Bauwerks sind in Bild 17 verdeutlicht.

Siehe Anlagen

$$\sigma_{Zw,0}(j) = \frac{N_W}{A_W} + \frac{M_W}{I_W} \cdot z_j^W - \frac{M_g}{I_B} \cdot z_j^B$$

Anlage A, Gl. (22) bis (28)

Siehe Anlagen

$$\sigma_{Zw,1}(j) = -\frac{\alpha_T \cdot \Delta T_{Mz,G,1} \cdot E_c}{h_G} \cdot z_j^G$$

Anlage A, Gl. (29)

$$\sigma_{Zw}(j) = \sigma_{Zw,0}(j) + \sigma_{Zw,1}(j) \quad (19)$$

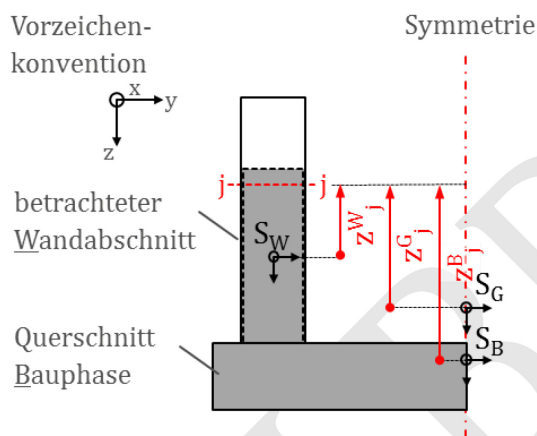


Bild 17: Lage der Querschnittsfaser j in Bezug auf die relevanten Schwerpunkte des Bauwerks

4. Primärrissabstand:

Der Rissabstand kann bei im Wasserbau üblichen Bauteilgeometrien (hohe Bauteilmassigkeit $b_W \geq 1,8$ m und Bauabschnittslängen $\geq 3,5 \cdot h_W$) mit Gl. (7) bestimmt werden.

Kann im Erhärungszeitraum anhand einer rechnerischen Abschätzung nicht mit Sicherheit vom Entstehen von Trennrissen ausgegangen werden, muss der Rissabstand entsprechend Anlage B ermittelt werden.

5. Ermittlung der erforderlichen Bewehrung:

Die erforderliche Anzahl der Sekundärrisspaare kann mit Gl. (12) bestimmt werden. Ist $n > 0$ wird die erforderliche Bewehrung mit Gl. (13) berechnet.

Die Einwirkungen aus dem Nutzungszeitraum erfordern, dass zusätzlich im obersten Wandbereich (Planie) ein Zugband in Längsrichtung vorzusehen ist. Hierzu ist die ermittelte Bewehrung im obersten Wandabschnitt (Planie) an den Seiten, wie auch in der Wandkrone einzulegen.

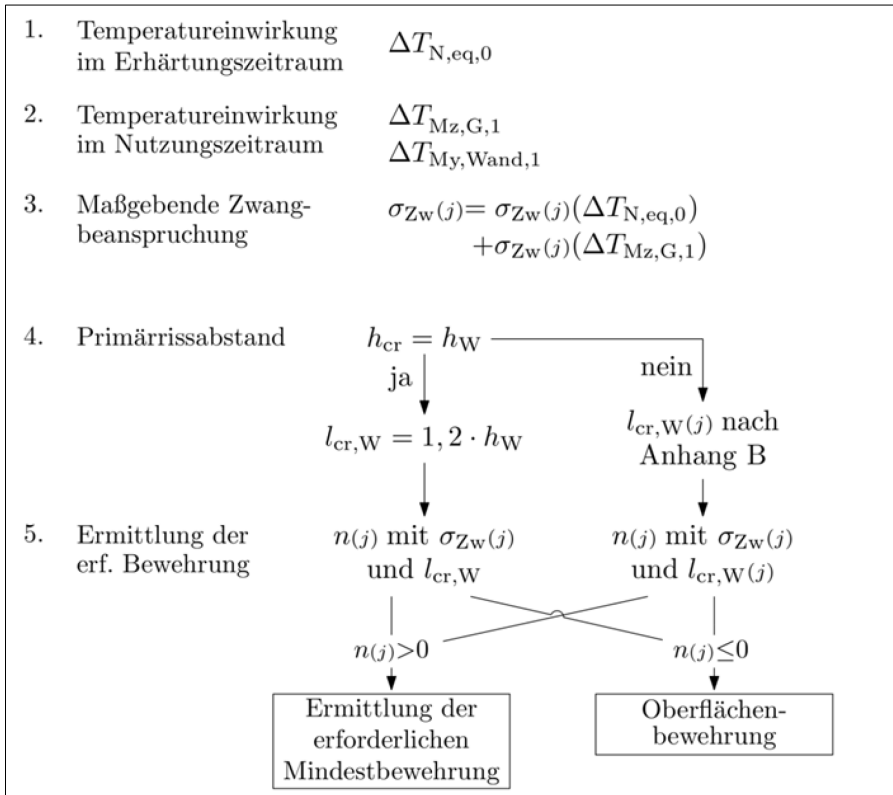


Bild 18: Vorgehensweise für Wandquerschnitte

3.5 Grundlaufdecke

1. Ermittlung der Temperaturbeanspruchung im Erhärtings- (EZ) und Nutzungszeitraum (NZ):

Im Gegensatz zur einseitig erdberührten Bodenplatte ist die vertikale Temperaturdifferenz in der Grundlaufdecke im Erhärtings- und Nutzungszeitraum gering. Die zentrische Temperatureinwirkung im Erhärtingszeitraum kann analog zu Wänden, mit Gl. (18) und der Grundlaufdeckenhöhe h_{Gl} anstelle von b_w abgeschätzt werden. Im Nutzungszeitraum sollte aufgrund der geringeren Massigkeit und Wärmeträgheit des Bauteils eine Temperaturdifferenz von $\Delta T_p = \pm 2 \text{ K}$ zu angrenzenden Bauteilen berücksichtigt werden. Außerdem entsteht eine zentrische Zwangsbeanspruchung aus der Biegebeanspruchung des Bauwerks in Längsrichtung, z. B. aus der vertikalen Temperaturdifferenz $\Delta T_{Mz,G}$, siehe Bild 19.

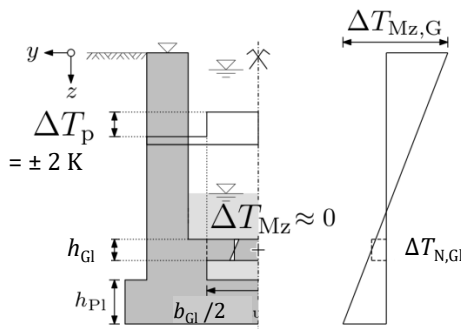


Bild 19: Saisonale Temperatureinwirkungen für die Grundlaufdecke

Der Behinderungsgrad des Bauteils in Längsrichtung kann mit $a_N = 1$ angenommen werden. In Querrichtung wird die erforderliche Bewehrungsmenge im Wesentlichen durch den Lastabtrag bestimmt. Eine Bemessung infolge Zwangs ist daher nicht notwendig.

2. Ermittlung der Zwangsbeanspruchung im EZ und NZ:

$$\sigma_{Zw} = \sigma_{Zw}(\Delta T_{N,eq,0}) + \sigma_{Zw}(\Delta T_{Mz,G,1}) + \sigma_{Zw}(\Delta T_p) \quad \text{mit } a_N = 1$$

mit:

σ_{Zw} Zwangsspannung in Längsrichtung

$\Delta T_{N,eq,0}$ gleichmäßige äquivalente Temperatureinwirkung im Erhärtingszeitraum

$\Delta T_{Mz,G,1}$ vertikaler, linear veränderlicher Temperaturanteil des Gesamtbauwerks im Nutzungszeitraum

ΔT_p Temperaturdifferenz zwischen angrenzenden Bauteilen

a_N Behinderungsgrad bei zentrischem Zwang

3. Ermittlung des Primärrissabstands:

$$l_{cr} = 0,6 \cdot b_{Gl} \quad (20)$$

mit:

l_{cr} effektive Länge des Abstands der Primärrisse (der Grundlaufdecke in Längsrichtung)

b_{Gl} Breite des Grundlaufs

4. Ermittlung der erforderlichen Bewehrung:

Die erforderliche Anzahl der Sekundärrisspaare kann mit Gl. (12) bestimmt werden. Ist $n > 0$ wird die erforderliche Bewehrung mit Gl. (13) berechnet.

4 Konstruktive Ausbildung und qualitative Maßnahmen

Neben der quantitativen Berechnung der erforderlichen Bewehrungsmenge zur Dimensionierung der rissbreitenbegrenzenden Bewehrung haben konstruktive und betontechnologische Maßnahmen einen maßgebenden Einfluss auf die Gebrauchstauglichkeit und Dauerhaftigkeit des Bauwerks.

4.1 Oberflächenbewehrung

Sollte eine Bemessung zeigen, dass bei Beachtung des Risskriteriums keine Mindestbewehrung zur Einhaltung der Verformungskompatibilität erforderlich ist, so ist die Aufgabe der Bewehrung auf die Begrenzung der Rissbreite infolge der Eigenspannungen und Sicherstellung der Dauerhaftigkeit in der Randzone beschränkt (Tue et al. 2018). Die erforderliche Oberflächenbewehrung kann dann mit dem ingenieurmäßigen Ansatz aus (Tue et al. 2018) wie folgt ermittelt werden:

$$a_{s,erf} = 0,07 \cdot A_c \cdot \frac{f_{ctm}}{f_{yk}} \leq 25 \text{ cm}^2/\text{m} \quad (21)$$

Dabei ist die ermittelte Bewehrung nach Gleichung (21) je Seite und Verlegerichtung anzuordnen. Die Begrenzungsflächen von scheiben- und plattenartigen Bauteilen müssen eine kreuzweise Bewehrung erhalten.

4.2 Qualitative Maßnahmen bei Planung und Herstellung

Ziel der nachfolgend aufgeführten Punkte ist es, den sachkundigen planenden Ingenieur und die ausführende Baufirma für die Problematik der Zwangsbeanspruchung zu sensibilisieren.

4.2.1 Bauteilgeometrie, Bauabschnitte und Betonierfolge

Auf die Realisierung einer gleichmäßigen Bauteilgeometrie sollte geachtet werden. Dabei sind große Querschnittsprünge im Bauabschnitt zu vermeiden. Es sollte ein Optimum zwischen Betonierabschnittshöhe und Anzahl der Arbeitsfugen angestrebt werden. Bei Bauwerken mit großer Längenausdehnung ist eine Vor-Kopf-Betonage vorteilhaft. Schwindlücken können sich ungünstig auf die Behinderungssituation auswirken, da diese Bereiche als Bauteile im Erhärtungszeitraum beidseitig gehalten sind und daher in diesen Bereichen hohe Zwangskräfte auftreten. Bei monolithischen Bauteilen sollten übereinander liegende Bauabschnitte längsversetzt angeordnet werden, damit über die Bauteilhöhe durchlaufende vertikale Arbeitsfugen vermieden werden.

4.2.2 Betontechnologie

Bei der Wahl der Betonrezeptur sind die Anforderungen an Beton für massige Bauteile der ZTV-W LB 215, Tabelle 2.2 (BMVBS 2012) zu beachten. Betonrezepturen mit geringer Wärmeentwicklung reduzieren die auftretenden Temperaturen und damit die einwirkende Zwangsbeanspruchung. Dies wird durch geringere Zementmengen oder die Anwendung von Zementen mit geringer Hydratationswärmeentwicklung (LH, VLH-Zement) erreicht. Die Wirksamkeit von langsam erhärtenden Betonen (Festigkeitsentwicklung $r < 0,30$) bezüglich der Reduzierung der Rissgefahr muss allerdings stets unter Berücksichtigung der Selbstbeschleunigung des Hydratationsprozesses in massigen Bauteilen beurteilt werden.

Betone mit hohen Festigkeiten führen in der Regel zu höheren Zwangsbeanspruchungen. Daher sind unter Berücksichtigung anderer Festigkeitsanforderungen an den Beton, z. B. aufgrund statischer Belange oder der Dauerhaftigkeit, geringe Festigkeiten anzustreben und Überfestigkeiten zu vermeiden.

Geringe Frischbetontemperaturen reduzieren die Zwangsbeanspruchung signifikant. Zum einen läuft der Erhärtungsprozess langsamer ab, sodass eine günstige Erhöhung des Wärmeabflusses in der Erwärmungs-

phase stattfinden kann. Zum anderen werden die Temperaturdifferenz zur Außentemperatur bzw. zu vorherigen Bauabschnitten, und damit die Zwangsbeanspruchung reduziert.

4.2.3 Herstellungszeitraum

Die klimatischen Randbedingungen des Winters sind für die Herstellung massiger Betonbauteile generell günstiger zu bewerten als die des Sommers. Da die Betonerhärtung im Winter auf einem niedrigeren Temperaturniveau abläuft, ist von verlangsamten Hydratationsgeschwindigkeiten sowie niedrigeren Frischbetontemperaturen auszugehen. Grundsätzlich sollte der Betonierbeginn so gewählt werden, dass tägliche Schwankungen der klimatischen Randbedingungen nur einen geringen Einfluss auf die resultierende Maximaltemperatur im erhärtenden Bauteil haben. So sollte zum Beispiel der Betoneinbau eines Bodenplattenabschnitts mit einer Betonagedauer von 24 Stunden mittags beginnen. Dadurch wird der mittlere Bereich der Bodenplatte, welcher sich während der Hydratation am höchsten erwärmen wird, in den kühleren Nachtstunden eingebaut werden. Somit wird ein zusätzlicher Wärmeeintrag in den Kernbereich des herzustellenden Bauteils aufgrund der höheren Lufttemperatur und der Sonneneinstrahlung am Tage vermieden.

4.2.4 Nachbehandlung

Die Nachbehandlung verfolgt die Ziele:

- Sicherstellung einer ausreichenden Festigkeitsentwicklung in der Betonrandzone,
- Sicherstellung der geforderten Dauerhaftigkeit der Betonrandzone (Dichtigkeit),
- Verringerung des Risspotentials aus Fröhschwinden und infolge von Temperaturspannungen aus Dehnungen infolge von Hydratationswärmeentwicklung,
- Schutz des jungen Betons vor schädlichen Einwirkungen (Frost, mechanische Beanspruchungen, ...).

Zur Umsetzung einer angemessenen Nachbehandlung sind die Anforderungen der ZTV-W LB 215, Teil 3, Abschnitt 8.5 (BMVBS 2012) in Ergänzung zu DIN EN 13670 (DIN EN 13670), Abschnitt 8.5 und DIN 1045-2 (DIN 1045-2) einzuhalten. Weitere Hinweise und Empfehlungen sind der DAfStb-Richtlinie „Massige Bauteile aus Beton“ (DAfStb 2010) sowie dem DBV- Merkblatt „Nachbehandlung von Beton“ (Deutscher Beton- und Bautechnik-Verein e.V. Entwurf 2019) zu entnehmen.

Generell ist für massige Bauteile zu empfehlen, die Maßnahmen zur Nachbehandlung stets im Einzelfall unter Berücksichtigung der objektspezifischen Randbedingungen sowie der in der Betoneignungsprüfung ermittelten Betoneigenschaften gesamtheitlich zu planen.

5 Beispiel: Mindestbewehrung für eine fugenlose Schifffahrtsschleuse

In diesem Beispiel sollen ausgewählte Bauteile (Bodenplatte, Kammerwand) einer monolithisch hergestellten Schleuse auf frühen und späten Zwang bemessen werden. Die Geometrie des Bauwerks und die zugehörigen Randbedingungen sind in Bild 20 dargestellt. Die Herstellung der Bodenplatte und des unteren Wandabschnitts der Kammerwand soll außerhalb des Winters erfolgen. Für den oberen Wandabschnitt sollen winterliche Bedingungen vorausgesetzt werden. Weiterhin werden hier mögliche in der Realität auftretende Überfestigkeiten nicht berücksichtigt.

Geometrie:

Platte	h_{PI} / b_{PI}	1,8 / 12 m
Wandabschnitt unten:	h_W / b_W	4,5 / 1,8 m
Wandabschnitt oben:	h_W / b_W	6,15 / 1,8 m
Gesamtlänge / Bauabschnitt:	L / L_{BA}	180 / 60 m

Material:

Beton C25/30:	f_{ctm}	2,60 N/mm ²
	E_c	31000 N/mm ²
	$\Delta T_{adiab,7d}$	35 K
	α_T	10 ⁻⁵ K ⁻¹
	w_k	0,25 mm
Bewehrung B500 B	c_{nom}	60 mm

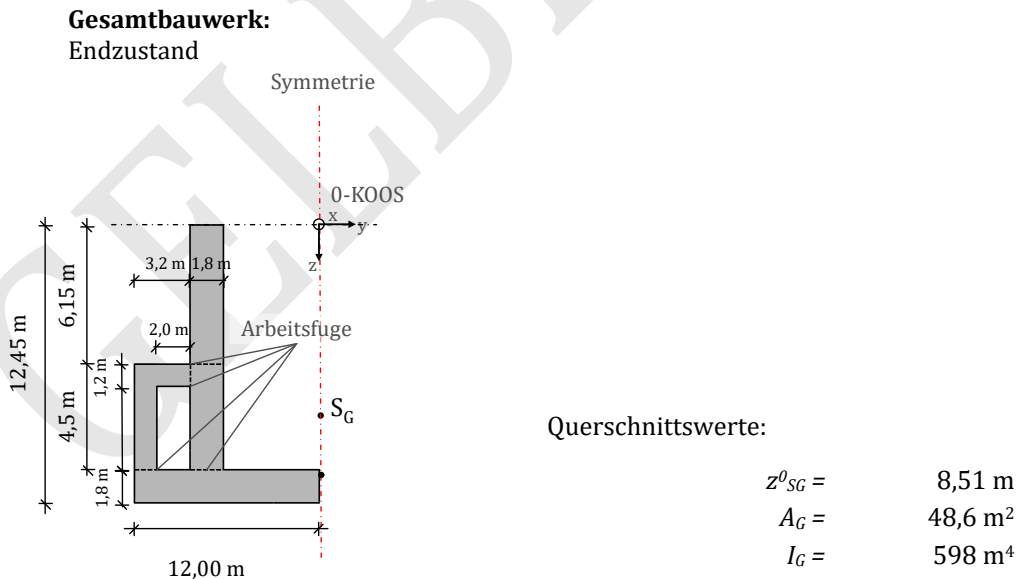


Bild 20: Randbedingungen, Geometrie und Querschnittswerte der Schifffahrtsschleuse

Für die Bemessung sind die in Bild 21 verdeutlichten Schwerpunktabstände und Querschnittswerte für die jeweilige Bauphase zu ermitteln.

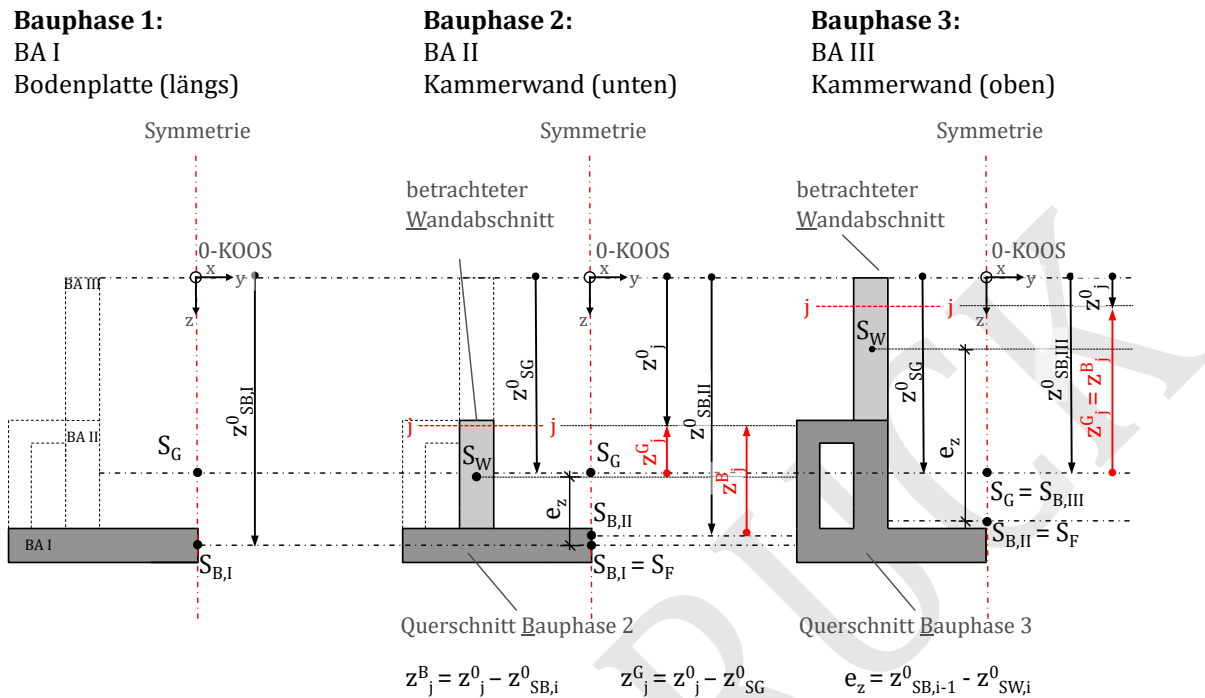


Bild 21: Lage der Querschnittsfaser in Bezug auf die relevanten Schwerpunkte in den einzelnen Bauphasen

Bauabschnitt I (BA I)	Bauabschnitt II (BA II)	Bauabschnitt III (BA III)
$z_{SB,1}^0 = 11,55 \text{ m}$	$z_{SB,2}^0 = 10,69 \text{ m}$	$z_{SB,3}^0 = 8,51 \text{ m}$
	Sw	Sw
	$z_{SW}^0 = 8,40 \text{ m}$	$z_{SW}^0 = 3,08 \text{ m}$
	$z_{SW}^B = -2,29 \text{ m}$	$z_{SW}^B = -5,43 \text{ m}$
	$z_{SW}^G = -0,11 \text{ m}$	$z_{SW}^G = -5,43 \text{ m}$
	$e_z = 3,15 \text{ m}$	$e_z = 7,03 \text{ m}$
	Wandfuß	Wandfuß
	$z_{Fu\beta}^0 = 10,65 \text{ m}$	$z_{Fu\beta}^0 = 6,15 \text{ m}$
	$z_{Fu\beta}^B = -0,04 \text{ m}$	$z_{Fu\beta}^B = -2,36 \text{ m}$
	$z_{Fu\beta}^G = 2,14 \text{ m}$	$z_{Fu\beta}^G = -2,36 \text{ m}$
	$z_{Fu\beta}^W = 2,25 \text{ m}$	$z_{Fu\beta}^W = 3,08 \text{ m}$
	Wandkopf	Wandkopf
	$z_{W,Kopf}^0 = 6,15 \text{ m}$	$z_{W,Kopf}^0 = 0,00 \text{ m}$
	$z_{W,Kopf}^B = -4,54 \text{ m}$	$z_{W,Kopf}^B = -8,51 \text{ m}$
	$z_{W,Kopf}^G = -2,36 \text{ m}$	$z_{W,Kopf}^G = -8,51 \text{ m}$
	$z_{W,Kopf}^W = 2,25 \text{ m}$	$z_{W,Kopf}^W = 3,08 \text{ m}$
	$A_{F,eff} = 12,96 \text{ m}^2$	$A_F = 37,5 \text{ m}^2$
	$I_{F,eff} = 3,50 \text{ m}^4$	$I_F = 140 \text{ m}^4$
	$A_W = 8,10 \text{ m}^2$	$A_W = 11,1 \text{ m}^2$
	$I_W = 13,7 \text{ m}^4$	$I_W = 34,9 \text{ m}^4$
	$A_B = 29,7 \text{ m}^4$	$A_B = 48,6 \text{ m}^4$
	$I_B = 78,0 \text{ m}^4$	$I_B = I_G = 598 \text{ m}^4$

Die obigen Werte sind geometrische Werte, welche in die nachfolgende Berechnung eingehen, wobei zwischen den schwarz- und graugefärbten Werte zu unterscheiden ist. Dabei gehen die schwarzgefärbten Werte explizit in die Berechnung ein. Die graugefärbten Werte sind als Kontrollwerte für den Anwender gedacht.

S_G	Schwerpunkt des Gesamtbauwerks
$S_{B,j}$	Schwerpunkt des Bauabschnitts j (alle bisher vorhandenen Bauabschnitte und der neu hinzukommende Wandabschnitt)
$S_F = S_{B,i-1}$	Schwerpunkt des behindernden Bauteils (Fundament und vorhergehende Wandabschnitte; $i \geq 2$)
S_W	Schwerpunkt des neu hinzukommenden Wandabschnitts
A_F	Querschnittsfläche des behindernden Bauteils (Fundamente und vorhergehende Wandabschnitte)
I_F	ideelles Trägheitsmoment des behindernden Bauteils (Fundamente und vorhergehende Wandabschnitte)
I_B	ideelles Trägheitsmoment des Bauabschnitts (alle bisher vorhandenen Bauabschnitte und der neu hinzukommende Wandabschnitt)
z_{SG}^0	Koordinate des Gesamtschwerpunkts bezogen auf das ursprüngliche Koordinatensystem (0-KOOS)
$z_{SB,i}^0$	Koordinate des Schwerpunkts des Bauabschnitts i bezogen auf das ursprüngliche Koordinatensystem (0-KOOS)
z_j^0	Koordinate der betrachteten Querschnittsfaser j bezogen auf das ursprüngliche Koordinatensystem (0-KOOS)
z_{SW}^0	Koordinate des Schwerpunkts des neu hinzukommenden Wandabschnitts bezogen auf das ursprüngliche Koordinatensystem (0-KOOS)
$z_{B,j}^B$	Koordinate der betrachteten Querschnittsfaser j in Bezug auf den Schwerpunkt des Bauabschnitts (alle bisher vorhandenen Bauabschnitte und der neu hinzukommende Wandabschnitt)
$z_{G,j}^G$	Koordinate der betrachteten Querschnittsfaser j in Bezug auf den Schwerpunkt des Gesamtbauwerks
$z_{W,j}^W$	Koordinate der betrachteten Querschnittsfaser j in Bezug auf den Schwerpunkt des neu hinzukommenden Wandabschnitts
e_z	Abstand des Schwerpunkts des neuen Wandabschnitts S_W zum Schwerpunkt des behindernden Bauteils ($S_F = S_{B,i-1}$ mit, $i \geq II$)

5.1 Mindestbewehrung für die Bodenplatte in Längsrichtung – BA I

Mit Gl. (14) und (16) betragen die äquivalenten Temperaturunterschiede im Erhärtungszeitraum an der Unter- und Oberseite der Bodenplatte:

$$\Delta T_{Mz,eq,0}^{unten} = -0,8 \cdot (0,25 \cdot 1,05 \cdot 1,00 \cdot 35 + 0,25 \cdot 5) = -8,4 \text{ K (Unterseite Zug)} \quad \text{nach Gl. (14)}$$

$$\Delta T_{Mz,eq,0}^{oben} = 0,6 \cdot (0,50 \cdot 1,05 \cdot 1,00 \cdot 35 + 5) = 14,0 \text{ K (Oberseite Zug)} \quad \text{nach Gl. (16)}$$

Die erhärtungsbedingte Zwangsbeanspruchung ergibt sich zu:

$$\sigma_{Zw,0}^{unten} = \frac{-10^{-5} \cdot (-8,4) \cdot 31000}{2} \cdot 1 = 1,29 \text{ N/mm}^2 \quad \text{nach Gl. (3)}$$

$$\text{mit: } a_M = \frac{3}{2} \cdot \frac{0,025 \cdot 60^2}{10^{-5} \cdot 8,4 \cdot 31000 \cdot 1,8} = 28,97 > 1 \rightarrow 1 \quad \text{nach Gl. (4)}$$

$$\sigma_{Zw,0}^{oben} = \frac{10^{-5} \cdot 14,0 \cdot 31000}{2} \cdot 1 = 2,17 \text{ N/mm}^2 \quad \text{nach Gl. (3)}$$

$$\text{mit: } a_M = \frac{3}{2} \cdot \frac{0,025 \cdot 60^2}{10^{-5} \cdot 14,0 \cdot 31000 \cdot 1,8} = 17,28 > 1 \rightarrow 1 \quad \text{nach Gl. (4)}$$

Die Temperatureinwirkungen im Nutzungszeitraum betragen nach Abschnitt 2.1.3:

$$\text{Sommer-Szenario: } \Delta T_{Mz,1}^{unten} = -3 \cdot 1,8 = -5,4 \text{ K (Unterseite Zug)}$$

$$\text{und } \Delta T_{N,1} = -10 \cdot \frac{3,04}{12,45} = -2,44 \text{ K (aus Biegung am Gesamt-QS)}$$

$$\text{Winter-Szenario: } \Delta T_{Mz,1}^{oben} = 3 \cdot 1,8 = 5,4 \text{ K (Oberseite Zug)} \quad \text{Siehe Bild 3}$$

Entsprechend der Überlagerungsregel in Gl. (17) kann die bemessungsrelevante Zwangsbeanspruchung berechnet werden:

$$\Delta T_{Mz}^{unten} = -8,4 + (-5,4) = -13,8 \text{ K} \quad \text{nach Gl. (15)}$$

$$\sigma_{Zw}^{unten} = -10^{-5} \cdot 31000 \cdot \left(\frac{-13,8}{2} + (-2,44) \right) \cdot 1 = 2,89 \text{ N/mm}^2$$

$$\Delta T_{Mz}^{oben} = \max \left\{ \begin{array}{l} 14,0 \\ 5,4 \end{array} \right\} = 14,0 \text{ K} \quad \text{nach Gl. (17)}$$

$$\sigma_{Zw}^{oben} = \max \left\{ \begin{array}{l} -10^{-5} \cdot 31000 \cdot \left(-\frac{14,0}{2} \right) \cdot 1 = 2,17 \\ -10^{-5} \cdot 31000 \cdot (-2,44) \cdot 1 = 0,76 \end{array} \right\} = 2,17 \text{ N/mm}^2$$

Der Rissabstand kann an der Unter- und Oberseite der Platte mit Gl. (5) ermittelt werden:

$$l_{cr,Pl} = \sqrt{\frac{2,60 \cdot 1,8}{3 \cdot 0,025}} = 7,9 \leq 30 \rightarrow 7,9 \text{ m} \quad \text{nach Gl. (5)}$$

Die erforderliche Anzahl von Sekundärrissen zur Einhaltung der zulässigen Rissbreite in den Primärrissen kann mit Gl. (12) bestimmt werden.

Es gilt:

$$n_{\text{unten}} = 1,1 \cdot \left(\frac{2,89 \cdot 7900}{31000 \cdot 0,25} \cdot \frac{0,75}{1} - 1 \right) = 1,33 \rightarrow 2 \quad \text{nach Gl. (12)}$$

$$n_{\text{oben}} = 1,1 \cdot \left(\frac{2,17 \cdot 7900}{31000 \cdot 0,25} \cdot \frac{0,75}{1} - 1 \right) = 0,73 \rightarrow 1$$

An der Unter- und Oberseite wird eine Mindestbewehrung gemäß Gl. (13) benötigt. Unter der Annahme, dass mit $\varnothing 20$ nur eine Bewehrungslage erforderlich ist, beträgt der Abstand vom Bewehrungsschwerpunkt zum äußeren Rand $d_1 = 7,0$ cm, bei $\varnothing 25$ beträgt der Randabstand $d_1 = 7,25$ cm.

$$a_{s,\text{erf}}^{\text{unten}} = \sqrt{\frac{25 \cdot 7,25^2 \cdot 100^2 \cdot 2,60}{0,25 \cdot 200000}} \cdot (0,5 + 0,34 \cdot 2) = 28,4 \text{ cm}^2/\text{m} \quad \text{nach Gl. (13)}$$

$$a_{s,\text{erf}}^{\text{oben}} = \sqrt{\frac{20 \cdot 7,0^2 \cdot 100^2 \cdot 2,60}{0,25 \cdot 200000}} \cdot (0,5 + 0,34 \cdot 1) = 20,7 \text{ cm}^2/\text{m}$$

An der Plattenunterseite ist eine Lage $\varnothing 25$ im Abstand $s = 15$ cm ($a_s = 32,7 \text{ cm}^2/\text{m}$) erforderlich. Die Mindestbewehrung an der Plattenoberseite wird durch den Einbau von einer Lage $\varnothing 20$ im Abstand $s = 15$ cm ($a_s = 20,9 \text{ cm}^2/\text{m}$) abgedeckt.

5.2 Mindestbewehrung für den unteren Kammerwandabschnitt - BA II

Die konstant im Querschnitt verteilte Temperatureinwirkung gemäß Gl. (18) beträgt:

$$\Delta T_{N,\text{eq},0} = -0,7 \cdot (0,53 \cdot 0,95 \cdot 1,00 \cdot 35 + 5) = -15,9 \text{ K} \quad \text{nach Gl. (18)}$$

Für die Normalkraft und das Moment in der Wand infolge Wechselwirkung aus Temperatur gilt nach Gl. (22) und (23):

$$N_W = -10^{-5} \cdot (-15,9) \cdot \left(\frac{1}{31000 \cdot 12,96} + \frac{1}{31000 \cdot 8,10} + \frac{3,15^2}{31000 \cdot (3,50 + 13,7)} \right)^{-1} = 6,34 \text{ MN} \quad \text{nach Gl. (22)}$$

$$M_W = 6,34 \cdot 3,15 \cdot \left(1 + \frac{31000 \cdot 3,50}{31000 \cdot 13,7} \right)^{-1} = 15,9 \text{ MNm} \quad \text{nach Gl. (23)}$$

Das äußere Moment infolge Eigengewichtsaktivierung kann mit Gl. (25) bestimmt werden. Auch ohne die Berücksichtigung eines Bodenplattenüberstands ($A_{zus} = 0$) wird das Eigengewicht vollständig aktiviert:

$$L_{\text{eff,max}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 15,9}{0,025 \cdot 29,7} \cdot \frac{78}{13,7}} = 15,62 < \frac{60}{2} \text{ m} \quad \text{nach Gl. (26)}$$

$$M_g = 0,025 \cdot \left[\frac{29,7 \cdot 15,62^2}{2} + 0 \right] = 90,6 \text{ MNm} \leq 16,0 \cdot \frac{78}{13,7} \text{ MNm} \quad \text{nach Gl. (25)}$$

Die erhärtungsbedingte Zwangsbeanspruchung am Wandfuß und -kopf ergibt sich damit zu:

$$\sigma_{\text{Zw},0}^{\text{Wandfuß}} = \frac{6,34}{8,10} + \frac{15,9}{13,7} \cdot \frac{4,5}{2} - \frac{90,6}{78} \cdot (-0,04) = 3,44 \text{ N/mm}^2 \quad \text{nach Gl. (27)}$$

$$\sigma_{\text{Zw},0}^{\text{Wandkopf}} = \frac{6,34}{8,10} - \frac{15,9}{13,7} \cdot \frac{4,5}{2} - \frac{90,6}{78} \cdot (-4,54) = 3,44 \text{ N/mm}^2$$

Der Behinderungsgrad beträgt nach Gl. (28):

$$a_0 = \frac{3,44}{-10^{-5} \cdot (-15,9) \cdot 31000} = 0,70 \quad \text{nach Gl. (28)}$$

Für die Zwangsbeanspruchung im Nutzungszeitraum wird die vertikale Temperaturdifferenz am Gesamtbauwerk entsprechend Abschnitt 2.1.3 berücksichtigt:

$$\sigma_{\text{Zw},1}^{\text{Wandfuß}} = \frac{-10^{-5} \cdot (-10) \cdot 31000}{12,45} \cdot (2,14) = 0,53 \text{ N/mm}^2 \quad \text{nach Gl. (29)}$$

$$\sigma_{\text{Zw},1}^{\text{Wandkopf}} = \frac{-10^{-5} \cdot 5 \cdot 31000}{12,45} \cdot (-2,36) = 0,29 \text{ N/mm}^2$$

mit:

$$a_1 = 1$$

Für einen Trennriss kann der Rissabstand entsprechend Gl. (7) berechnet werden:

$$l_{\text{cr,W}} = 1,2 \cdot 4,5 = 5,4 \text{ m} \quad \text{nach Gl. (7)}$$

Die erforderliche Anzahl von Sekundärrissen zur Einhaltung der zulässigen Rissbreite in den Primärrissen kann mit Gl. (12) bestimmt werden. Es gilt:

$$n^{\text{Wandfuß}} = 1,1 \cdot \left[\left(\frac{3,44}{0,70^{0,6}} + 0,53 \right) \cdot \frac{5400 \cdot 0,75}{31000 \cdot 0,25} - 1 \right] = 1,65 \rightarrow 2 \quad \text{nach Gl. (12)}$$

$$n^{\text{Wandkopf}} = 1,1 \cdot \left[\left(\frac{3,44}{0,70^{0,6}} + 0,29 \right) \cdot \frac{5400 \cdot 0,75}{31000 \cdot 0,25} - 1 \right] = 1,52 \rightarrow 2$$

Für die Mindestbewehrung gilt gemäß Gl. (13):

$$a_{s,erf} = \sqrt{\frac{25 \cdot 7,25^2 \cdot 100^2 \cdot 2,60}{0,25 \cdot 200000}} \cdot (0,5 + 0,34 \cdot 2) = 28,4 \text{ cm}^2/\text{m} \quad \text{nach Gl. (13)}$$

Der erforderlichen Mindestbewehrung kann mit einer Lage $\varnothing 25$ im Abstand $s = 15 \text{ cm}$ ($a_s = 32,7 \text{ cm}^2/\text{m}$) je Seite über die Wandhöhe entsprochen werden.

5.3 Mindestbewehrung für den oberen Kammerwandabschnitt – BA III

Die erhärtungsbedingte Temperatureinwirkung hat eine Größe von:

$$\Delta T_{N,eq,0} = -0,7 \cdot (0,53 \cdot 0,95 \cdot 0,88 \cdot 35 + 5) = -14,4 \text{ K} \quad \text{nach Gl. (18)}$$

Für die Normalkraft und das Moment in der Wand infolge Wechselwirkung aus Temperatur gilt nach Gl. (22) und (23):

$$N_W = -10^{-5} \cdot (-14,4) \cdot \left(\frac{1}{31000 \cdot 37,5} + \frac{1}{31000 \cdot 11,1} + \frac{7,03^2}{31000 \cdot (140,26 + 34,89)} \right)^{-1} = 11,18 \text{ MN} \quad \text{nach Gl. (22)}$$

$$M_W = 11,18 \cdot 7,03 \cdot \left(1 + \frac{31000 \cdot 140}{31000 \cdot 34,9} \right)^{-1} = 15,7 \text{ MNm} \quad \text{nach Gl. (23)}$$

Das äußere Moment infolge Eigengewichtsaktivierung kann mit Gl. (25) bestimmt werden.

$$L_{eff,max} = \sqrt{\frac{2 \cdot 15,7}{0,025 \cdot 48,6} \cdot \frac{598}{34,9}} = 21,0 \leq \frac{60}{2} \text{ m} \quad \text{nach Gl. (26)}$$

$$M_g = 0,025 \cdot \left[0 + 37,50 \cdot 23,95 \cdot \left(0 + \frac{23,95}{2} \right) \right] = 268,8 \text{ MNm} \leq 5,7 \cdot \frac{598}{34,9} \text{ MNm} \quad \text{nach Gl. (25)}$$

Die erhärtungsbedingte Zwangsbeanspruchung am Wandfuß und -kopf ergibt sich damit zu:

$$\sigma_{Zw,0}^{Wandfuß} = \frac{11,18}{11,1} + \frac{15,7}{34,9} \cdot \frac{6,15}{2} - \frac{268,8}{598} \cdot (-2,36) = 3,45 \text{ N/mm}^2 \quad \text{nach Gl. (27)}$$

$$\sigma_{Zw,0}^{Wandkopf} = \frac{11,18}{11,1} - \frac{15,7}{34,9} \cdot \frac{6,15}{2} - \frac{268,8}{598} \cdot (-8,51) = 3,45 \text{ N/mm}^2$$

Der Behinderungsgrad beträgt nach Gl. (28):

$$a_0 = \frac{3,45}{-10^{-5} \cdot (-14,4) \cdot 31000} = 0,77 \quad \text{nach Gl. (28)}$$

Für die Zwangsbeanspruchung im Nutzungszeitraum wird die vertikale Temperaturdifferenz am Gesamtbauwerk entsprechend Abschnitt 2.1.3 berücksichtigt:

$$\sigma_{Zw,1}^{Wandfuß} = \frac{-10^{-5} \cdot 5 \cdot 31000}{12,45} \cdot (-2,36) = 0,29 \text{ N/mm}^2 \quad \text{nach Gl. (29)}$$

$$\sigma_{Zw,1}^{Wandkopf} = \frac{-10^{-5} \cdot 5 \cdot 31000}{12,45} \cdot (-8,51) = 1,06 \text{ N/mm}^2$$

mit: $a_1 = 1$

Der Rissabstand wird entsprechend Gl. (7) berechnet:

$$l_{cr,W} = 1,2 \cdot 6,15 = 7,4 \text{ m} \quad \text{nach Gl. (7)}$$

Die erforderliche Anzahl von Sekundärrissen zur Einhaltung der zulässigen Rissbreite in den Primärrissen kann mit Gl. (12) bestimmt werden. Es gilt:

$$n^{Wandfuß} = 1,1 \cdot \left[\left(\frac{3,45}{0,770,6} + 0,29 \right) \cdot \frac{7400 \cdot 0,75}{31000 \cdot 0,25} - 1 \right] = 2,29 \rightarrow 3 \quad \text{nach Gl. (12)}$$

$$n^{Wandkopf} = 1,1 \cdot \left[\left(\frac{3,45}{0,770,6} + 1,06 \right) \cdot \frac{7400 \cdot 0,75}{31000 \cdot 0,25} - 1 \right] = 2,89 \rightarrow 3$$

Für die Mindestbewehrung gilt gemäß Gl. (13):

$$a_{s,erf}^{Seite,unten} = \sqrt{\frac{25 \cdot 7,25^2 \cdot 100^2 \cdot 2,60}{0,25 \cdot 200000} \cdot (0,5 + 0,34 \cdot 3)} = 32,2 \text{ cm}^2/\text{m} \quad \text{nach Gl. (13)}$$

$$a_{s,erf}^{Seite,oben} = \sqrt{\frac{25 \cdot 7,25^2 \cdot 100^2 \cdot 2,60}{0,25 \cdot 200000} \cdot (0,5 + 0,34 \cdot 3)} = 32,2 \text{ cm}^2/\text{m}$$

$$A_{s,erf}^{Zugband} = \sqrt{\frac{25 \cdot 7,25^2 \cdot 180^2 \cdot 2,60}{0,25 \cdot 200000} \cdot (0,5 + 0,34 \cdot 3)} = 58,0 \text{ cm}^2$$

Die erforderliche Mindestbewehrung kann durch den Einbau einer gleichmäßigen Bewehrung von $\varnothing 25$ im Abstand $s = 15 \text{ cm}$ ($a_s = 32,23 \text{ cm}^2/\text{m}$) über die Wandhöhe realisiert werden. Zur Ausbildung des benötigten Zugbands an der Wandoberseite werden 12 $\varnothing 25$ ($A_s = 58,0 \text{ cm}^2$) benötigt. Die gewählten Bewehrungsmengen sind in Bild 22 verdeutlicht.

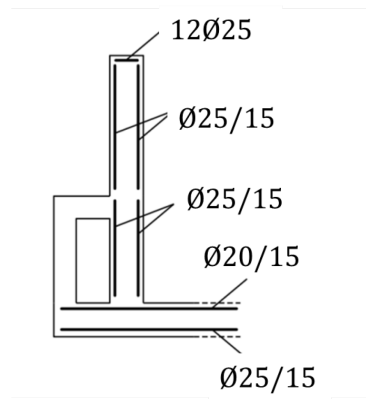


Bild 22: Skizze der anzuordnenden horizontalen Längsbewehrung

GELBDRUCK

Literatur

- BMVBS (Hg.) (2012): ZTV-W LB 215. Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen Wasserbau, Wasserbauwerke aus Beton und Stahlbeton - Leistungsbereich 215. Bonn. Online verfügbar unter https://izw.baw.de/publikationen/stlk-w_ztv-w/0/ZTV-W_LB215_Ausgabe_2012-5_.pdf.
- Bödefeld, Jörg (2010): Rissmechanik in dicken Stahlbetonbauteilen bei abfließender Hydratationswärme. Karlsruhe: Bundesanstalt für Wasserbau (Mitteilungsblatt der Bundesanstalt für Wasserbau, 92).
- Braasch, Timm (2004): Herabsetzung des Risikos einer Rissbildung abschnittsweise hergestellter Brückenüberbauten aus Beton. Dissertation. Universität Duisburg - Essen. Fachbereich 10 Bauwesen.
- DAfStb (Hg.) (2010): DAfStb-Richtlinie Massige Bauteile aus Beton. Ausg. Juni 2010. DAfStb. Berlin.
- Deutscher Beton- und Bautechnik-Verein e.V. (Hg.) (Entwurf 2019): Nachbehandlung von Beton. Curing of Concrete. Deutscher Beton- und Bautechnik-Verein e.V. (DBV-Merkblatt-/Sammlung / Deutscher Beton- und Bautechnik-Verein e.V. Bauausführung).
- DIN EN 13670:2011-03: Ausführung von Tragwerken aus Beton.
- DIN EN 1991-1-5:2010-12: Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 1-5: Allgemeine Einwirkungen – Temperatureinwirkungen.
- DIN EN 1992-1-1:2011-01: Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken – Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau; Deutsche Fassung EN 1992-1-1:2004+ AC:2010.
- DIN 19703:2014-06: Schleusen der Binnenschiffahrtsstraßen - Grundsätze für Abmessungen und Ausrüstung.
- DIN 1045-2:2008-08: Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton – Teil 2: Beton – Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität – Anwendungsregeln zu DIN EN 206-1.
- König, Gert; Tue, Nguyen Viet (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 (Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, 466).
- Krauß, Matias (2001): Frühe Risse in massigen Betonbauteilen-Ingenieurmodelle für die Planung von Gegenmaßnahmen. Dissertation. Technische Universität, Braunschweig. Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz (IBMB).
- Lichte, Ulf (2004): Klimatische Temperatureinwirkungen und Kombinationsregeln bei Brückenbauwerken. Dissertation. Universität der Bundeswehr München, München. Institut für Konstruktiven Ingenieurbau.
- Schlicke, Dirk (2016): Mindestbewehrung für zwangbeanspruchten Beton. Festlegung unter Berücksichtigung der erhärtungsbedingten Spannungsgeschichte und der Bauteilgeometrie. 2. überarbeitete Auflage (Schriftenreihe des Instituts für Betonbau). Online verfügbar unter <http://dx.doi.org/10.3217/978-3-85125-473-0>.

- Schlicke, Dirk; Tue, Nguyen Viet (2016a): Mindestbewehrung zur Begrenzung der Rissbreite unter Berücksichtigung des tatsächlichen Bauteilverhaltens. In: Beton- und Stahlbetonbau 111 (3), S. 120–131. DOI: 10.1002/best.201500019.
- Schlicke, Dirk; Tue, Nguyen Viet (2016b): Mindestbewehrung zur Begrenzung der Rissbreite unter Berücksichtigung des tatsächlichen Bauteilverhaltens. In: Beton- und Stahlbetonbau 111 (4), S. 210–220. DOI: 10.1002/best.201500072.
- Schlicke, Dirk; Tue, Nguyen Viet (2017): Merkblatt zur OeBV Richtlinie „Weiße Wannen“ - Analytisches Bemessungsmodell für den rechnerischen Ausschluss von Makrorissen bei der Verwendung von BS 1 Plus:2017.
- Tue, Nguyen Viet; Schlicke, Dirk; Turner, Katrin (2018): Untersuchung zur Oberflächenbewehrung bei Betonbauteilen im Wasserbau. -Endbericht-. Technische Universität Graz, Graz.
- Turner, Katrin (2017): Ganzheitliche Betrachtung zur Ermittlung der Mindestbewehrung für fugenlose Wasserbauwerke. Dissertation. Technische Universität Graz, Graz. Institut für Betonbau.
- Turner, Katrin; Schlicke, Dirk; Tue, Nguyen Viet (2016): Zwangbeanspruchung von Stahlbetonbauteilen. In: Beton- und Stahlbetonbau 111 (5), S. 301–309. DOI: 10.1002/best.201600003.

Anlagen

Anlage A: Analytische Spannungsermittlung im Wandquerschnitt

Die Gleichungen (22) und (23) gelten für einachsige Biegung und eine konstant im Querschnitt verteilte Einwirkung entsprechend Bild 12.

$$N_W = -\alpha_T \cdot \Delta T_{N,eq,0} \cdot \left(\frac{1}{E_F A_F} + \frac{1}{E_W A_W} + \frac{e_z^2}{E_F I_F + E_W I_W} \right)^{-1} \quad (22)$$

$$M_W = N_W \cdot e_z \cdot \left(1 + \frac{E_F I_F}{E_W I_W} \right)^{-1} \quad (23)$$

mit:

N_W, M_W Schnittgrößen (Normalkraft, Moment) im neu hinzukommenden Wandabschnitt infolge Querschnittskompatibilität

α_T Wärmeausdehnungskoeffizient des Betons

$\Delta T_{N,eq,0}$ gleichmäßige äquivalente Temperatureinwirkung im Erhärungszeitraum

$E_F A_F$ Dehnsteifigkeit des behindernden Bauteils

$E_W A_W$ Dehnsteifigkeit der Wand

$E_F I_F$ Biegesteifigkeit des behindernden Bauteils

$E_W I_W$ Biegesteifigkeit der Wand

e_z Abstand der Schwerpunkte von Wand und behinderndem Bauteil, siehe Bild 12

Der Einfluss der Bodenplatte (Fundament) in Querrichtung bei der Wandbemessung ist begrenzt. Daher wird eine aktivierbare Breite des Fundaments eingeführt. Die maximal aktivierbare Breite des Fundaments ermittelt sich zu:

$$b_{F,eff} = b_W + \sum b_{eff,i} \text{ mit } b_{eff,i} = b_{vorh,i} \leq 1,2 \cdot h_W/2 \quad (24)$$

Daraus lassen sich die effektiven Steifigkeiten ermitteln.

$E_F A_{F,eff}$ effektive Dehnsteifigkeit des behindernden Bauteils gemäß der aktivierbaren Breite

$E_F I_{F,eff}$ effektive Biegesteifigkeit des behindernden Bauteils unter Berücksichtigung der aktivierbaren Breite

Das äußere Moment infolge Eigengewichtsaktivierung kann wie folgt bestimmt werden:

$$M_g = \gamma_c \cdot \left[\frac{A_B \cdot L_{eff,max}^2}{2} + A_{zus} \cdot \Delta L \cdot \left(L_{eff,max} + \frac{\Delta L}{2} \right) \right] \leq M_W \cdot \frac{I_B}{I_W} \quad (25)$$

$$\text{mit: } L_{eff,max} = \sqrt{\frac{2 \cdot M_W}{\gamma_c \cdot A_B} \cdot \frac{I_B}{I_W} + \frac{A_{zus}}{A_B} \cdot \Delta L^2 \cdot \left(\frac{A_{zus}}{A_B} - 1 \right)} - \frac{A_{zus}}{A_B} \cdot \Delta L \leq x \quad (26)$$

M_g äußeres Moment infolge Eigengewichtsaktivierung

γ_c Wichte des Betons

A_B Querschnittsfläche des Bauabschnitts (alle bisher vorhandenen Bauabschnitte und der neu hinzukommende Wandabschnitt)

$L_{eff,max}$ maximal aktivierbare Bauteillänge

A_{zus}	Querschnittsfläche des zusätzlich am freien Rand der Wand aktivierten Eigengewichts
ΔL	Überstand des vorhergehenden Bauabschnitts am freien Rand der Wand (zusätzlich aktivierbares Eigengewicht in Längsrichtung)
I_B	ideelles Eigenträgheitsmoment des Bauabschnitts (alle bisher vorhandenen Bauabschnitte und der neu hinzukommende Wandabschnitt)
I_W	ideelles Trägheitsmoment des neu hinzukommenden Wandabschnitts
x	Abstand des freien Rands der Wand zum gedachten Verformungsruehpunkt in Längsrichtung; i. d. R. $x = \frac{L}{2}$ bzw. $x = L$ bei Vorkopf-Betonage
L	Länge des betrachteten Bauteils bzw. des Bauabschnitts
M_W	Moment im neu hinzukommenden Wandabschnitt infolge Querschnittskompatibilität

Für die resultierende Zwangsspannung und den Behinderungsgrad gilt:

$$\sigma_{\text{Zw}}(j) = \frac{N_W}{A_W} + \frac{M_W}{I_W} \cdot z^W_j - \frac{M_g}{I_B} \cdot z^B_j \quad (27)$$

$$a_N(j) = \frac{\sigma_{\text{Zw}}(j)}{-\alpha_T \cdot \Delta T_{\text{N,eq},0} \cdot E_W} \quad (28)$$

mit:

z^W_j	Koordinate der betrachteten Querschnittsfaser j in Bezug auf den Schwerpunkt des neu hinzukommenden Wandabschnitts
z^B_j	Koordinate der betrachteten Querschnittsfaser j in Bezug auf den Schwerpunkt des Bauabschnitts (alle bisher vorhandenen Bauabschnitte und der neu hinzukommende Wandabschnitt)
$a_{N,j}$	Behinderungsgrad bei zentrischem Zwang

Die Zwangsspannung in der Querschnittsfaser j infolge einer vertikalen Temperaturdifferenz im Gesamtbauwerk kann mit Gl. (29) bestimmt werden:

$$\sigma_{\text{Zw}}(j) = \frac{-\alpha_T \cdot \Delta T_{\text{Mz,G},1} \cdot E_c}{h_G} \cdot z^G_j \quad \text{für } a_M = 1 \quad (29)$$

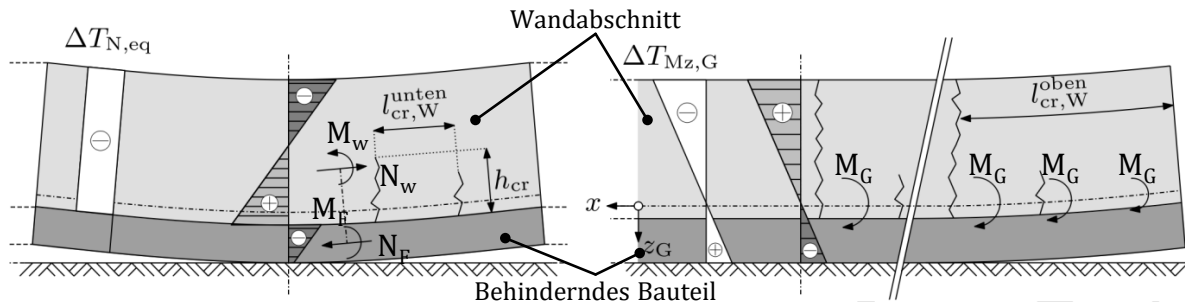
mit:

h_G	Höhe des Gesamtbauwerks
z^G_j	Koordinate der betrachteten Querschnittsfaser j in Bezug auf den Schwerpunkt des Gesamtbauwerks

Hinweis: Wenn die betrachtete Querschnittsfaser j des Bauabschnitts unterhalb des Gesamtschwerpunktes liegt, ist die Temperatur aus dem Sommer-Szenario maßgebend.

Anlage B: Abstand der Primärrisse bei Wänden ohne Trennrisse im Erhärtungszeitraum

Bei kurzen Bauabschnittslängen kann es in Abhängigkeit von der Größe der Verformungseinwirkung zu unterschiedlichen Rissverhalten kommen. Dies soll anhand von Bild 23 qualitativ verdeutlicht werden.



a) Erhärtungszeitraum

b) Nutzungszeitraum (winterliche Bedingungen)

Bild 23: Längsansicht: Abstand der Primärrisse bei Wänden mit kurzer Bauabschnittslänge ($L_{BA} < 3,5 \cdot h_W$); a) Primärrisse (Anrisse) im Erhärtungszeitraum, b) Primärrisse (Trennrisse) im Nutzungszeitraum

Im Erhärtungszeitraum kann es, ausgehend vom Wandfuß, zur Rissbildung kommen. Dabei handelt es sich um Anrisse, welche in der Regel nicht bis zur Wandoberkante verlaufen (siehe Bild 23 a)). In (Schlicke 2016) wird gezeigt, dass der Abstand dieser Anrisse wie folgt abgeschätzt werden kann:

$$l_{cr,W}^{unten} = 1,2 \cdot h_{cr} \tag{30}$$

- mit:
- $l_{cr,W}^{unten}$ effektive Länge eines Wandabschnitts bei kurzer Bauabschnittslänge; Anrisse von der Unterseite des Wandabschnitts
- h_{cr} Höhe des Primärrisses in einer Wand (hier: Anrisse bei Rissbildung im Erhärtungszeitraum als Ergebnis einer grafischen Ermittlung nach (Schlicke 2016))

Im Nutzungszeitraum kann es, ausgehend vom Wandkopf zur Rissbildung durch eine Biegebeanspruchung am Gesamtquerschnitt kommen (siehe Bild 23 b)). Der sich einstellende Rissabstand im oberen Wandbereich $l_{cr,W}^{oben}$ sollte in diesem Fall auf der sicheren Seite liegend mit Gl. (31) ermittelt werden:

$$l_{cr,W}^{oben} = \sqrt{\frac{2 \cdot f_{ctm}}{A_G \cdot \gamma_c} \cdot \frac{I_G}{|z_G^{oben}|}} \leq \frac{L}{2} \tag{31}$$

- mit:
- $l_{cr,W}^{oben}$ effektive Länge eines Wandabschnitts bei kurzer Bauabschnittslänge; Rissabstand im oberen Wandabschnittsbereich
- A_G Querschnittsfläche des Gesamtbauwerks
- γ_c Wichte des Betons
- f_{ctm} Mittelwert der zentrischen Betonzugfestigkeit (hier: Bemessungswert)
- I_G ideales Trägheitsmoment des Gesamtbauwerks
- z_G^{oben} Koordinate der Wandoberkante in Bezug auf den Schwerpunkt des Gesamtbauwerks
- L Länge des betrachteten Bauteils bzw. des Bauabschnitts L_{BA}