

**BAWMerkblatt**

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

Ausgabe 2024

EU-Notifizierung Nr. xxx

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

info@baw.de  
www.baw.de

Copyright: Creative Commons BY-ND 4.0

<https://creativecommons.org/licenses/by-nd/4.0/>

Soweit nicht anders angegeben, liegen alle Bildrechte bei der BAW.

<b>Inhaltsverzeichnis</b>		<b>Seite</b>
1	Allgemeines	4
2	Konstruktionsempfehlungen	4
2.1	Allgemeine Empfehlungen	4
2.2	Betonage gegen Baugrubenverbaue	4
2.3	Aussparungen in massiven Wasserbauwerken	4
2.4	Vertikale Arbeitsfugen in Bodenplatten	5
2.5	Oberflächenbewehrung in Bereichen ohne Mindestbewehrung	5
3	Bemessung	6
3.1	Allgemeine Hinweise zur Bemessung nach MRZ	6
3.2	Materialeingangsgrößen	7
3.3	Zwang infolge Betonerhärtung (früher Zwang)	7
3.3.1	Bodenplatte	7
3.3.2	Wandabschnitte	8
3.3.3	Grundlaufdecke	9
3.4	Zwang im Nutzungszeitraum (später Zwang)	10
3.4.1	Verformungseinwirkung	10
3.4.2	Zwangsbeanspruchung	12
3.5	Erforderliche Anzahl an Sekundärrisspaaren	14
3.5.1	Primärrissabstand	14
3.5.2	Erforderliche Sekundärrisspaare	15
3.6	Ermittlung der erforderlichen Mindestbewehrung	15
4	Beispiel: Mindestbewehrung für eine fugenlose Schifffahrtsschleuse	16
Literatur		17

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 3.1: Ablaufdiagramm der Bemessung nach MRZ.	6
Abbildung 3.9: Saisonale Temperatureinwirkungen für Wasserbehälter mit $0,8 \leq b_W, h_{Pl} \leq 10$ m nach Turner (2017).	10
Abbildung 3.10: Saisonale Temperatureinwirkungen für Sparbecken mit $0,8 \leq b_W, h_{Pl} \leq 10$ m nach Turner (2017).	11
Abbildung 3.11: Saisonale Temperatureinwirkungen für Stützmauern mit $0,8 \leq b_W, h_{Pl} \leq 10$ m nach Turner (2017).	11
Abbildung 3.12: Saisonale Temperatureinwirkungen für Bodenplatten mit $0,8 \leq b_W, h_{Pl} \leq 10$ m nach Turner (2017).	11
Abbildung 3.13: Saisonale Temperatureinwirkungen für die Grundlaufdecke.	11
Abbildung 3.15: Übersicht der Überlagerung für klimatische Einwirkungen und Boden-Bauwerk-Interaktion (Ober et al. 2024).	12

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 3.1: Materialeingangsgrößen für die Bemessung.	7
--	---

## Vorbemerkung

Das BAWMerkblatt „Rissbreitenbegrenzung für Zwang in massiven Wasserbauwerken“ (MRZ) beinhaltet die kompakte Zusammenfassung des Bemessungsmodells zur verformungsbasierten Rissbreitenbegrenzung infolge Zwangs für massive Wasserbauwerke.

Das MRZ gilt für Wasserbauwerke und deren Bauteile aus Stahlbeton. Für die praktische Anwendung wurden ingenieurmäßige Vereinfachungen im grundsätzlich mechanisch basierten Berechnungsverfahren getroffen, sodass der Anwendungsbereich wie folgt eingrenzt wird:

- massive Querschnitte, deren kleinste Abmessung  $\geq 0,8$  m ist
- randnahe Anordnung der Mindestbewehrung
- fugenlose Bauwerke mit L/H-Verhältnissen  $\geq 5$

Bei Anwendung für dünnere Querschnitte als 0,8 m kann die in der Bemessung zugrunde gelegte Sekundär-rissbildung nicht per se vorausgesetzt werden, sodass eine unzureichende Rissverteilung mit größeren Rissbreiten auftreten kann. Die Anwendung bei fugenbehafteten Bauwerken mit kleineren L/H-Verhältnissen ist grundsätzlich möglich, wobei die mit geringerem Fugenabstand zusätzlich einhergehenden Bewehrungseinsparungen hier nicht genutzt werden.

Ausführliche Erläuterungen finden sich in den „Erläuterungen zum BAWMerkblatt Rissbreitenbegrenzung für Zwang in massiven Wasserbauwerken“ (Erläuterungen zum MRZ). Die Gliederung der beiden Dokumente ist identisch, um eine einfache Orientierung zu ermöglichen. Die Nummerierung der Abbildungen, Gleichungen und Tabellen ist ebenfalls aus den Erläuterungen zum MRZ übernommen.

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

Bei der Verwendung des MRZ sind die jeweils gültige ZTV-W LB 215 und sonstige im Technischen Regelwerk - Wasserstraßen (TR-W) eingeführten Regelwerke zu berücksichtigen.

## 1 Allgemeines

In der Bemessung ist zwischen Rechenwert der Rissbreite, Rissbreitenkriterium und tatsächlicher Rissbreite am Bauwerk zu unterscheiden. Der Zusammenhang ist in den Erläuterungen zum MRZ, Kapitel 1.1, zu finden.

Die verformungskompatible Zwangsbemessung bestimmt die notwendige Mindestbewehrung zur Begrenzung der Rissbreite unter Berücksichtigung des tatsächlichen Bauteilverhaltens inkl. der wirkenden Verformungen. Im Gegensatz dazu basiert das im EC2 (DIN EN 1992-1-1:2011-01) enthaltene Modell darauf, dass die Zwangskraft die Risschnittgröße nicht übersteigen kann. Hintergründe zum Wesen der verformungskompatiblen Zwangsbemessung und dem Unterschied zum Konzept im EC2 sind in den Erläuterungen zum MRZ, Kapitel 1.2 und 1.3, sowie in Tue und Schlicke (2020) zu finden.

## 2 Konstruktionsempfehlungen

### 2.1 Allgemeine Empfehlungen

Der verformungskompatible Bemessungsansatz ermöglicht i. A. eine einlagige Bewehrungsführung auch bei massigen Querschnitten. Die einlagige Bewehrungsführung ist in jedem Fall anzustreben. Hierzu können betontechnologische und konstruktive Maßnahmen herangezogen werden. Für Wandabschnitte ist die Reduzierung der Betonierabschnittshöhe eine geeignete Maßnahme. Für Bodenplatten ist die Reduzierung der Hydratationswärme wirkungsvoll.

### 2.2 Betonage gegen Baugrubenverbaue

Die Mindestbewehrung für Wandabschnitte bei Betonage gegen Bohrpfahlwände soll mit der Betonüberdeckung der Luftseite ermittelt und auch für die Erdseite übernommen werden. Bei Schlitz- und Spundwänden bestehen folgende drei Möglichkeiten:

- 1) Herstellung eines Toleranzausgleichs vor Betonage der Wand und Ermittlung der Mindestbewehrung nach MRZ.
- 2) Auslegung der Horizontalbewehrung in Sollage als Querbewehrung für die Vertikalbewehrung und zusätzlicher Einbau der Mindestbewehrung nach MRZ im Toleranzbereich.
- 3) In Bereichen mit übermäßiger Betondeckung wird die Ermittlung der Mindestbewehrung für den Ausschluss von Bewehrungsfließen bei Aufnahme der Risskraft der Effektivzone vorgenommen, wobei  $h_{c,eff}$  unter Berücksichtigung der übermäßigen Betondeckung zu berechnen ist ( $h_{c,eff} = \min\{2,5 \cdot d_1; h/2\}$ ).

### 2.3 Aussparungen in massiven Wasserbauwerken

Im Übergangsbereich von Querschnittsprüngen ist eine modifizierte erforderliche Mindestbewehrung  $A_{s,min,mod}$  mit der modifizierten Anzahl an Sekundärrisspaaren  $n_{mod} = 2 \cdot n$  zu bestimmen. Diese ist unabhängig von der Länge der Aussparung und der zu erwartenden Rissbildung. Weiterhin muss darauf geachtet werden, dass die verbleibende Wanddicke größer als 0,8 m ist. Außerdem ist eine ausreichende

Verankerungslänge  $l_{bd}$  für die Bewehrung vorzusehen. Diese kann für den Gebrauchszustand vereinfacht mit Gl. (2.1) ermittelt werden. An der Seite ohne Aussparung ist die Bewehrung der Wand durchzuführen.

$$l_{bd} = \frac{100 \cdot d_s}{f_{ctm}} \quad (2.1)$$

$l_{bd}$	Verankerungslänge für den Gebrauchszustand in mm
$d_s$	Durchmesser der Bewehrung in mm
$f_{ctm}$	mittlere zentrische Betonzugfestigkeit in N/mm <sup>2</sup>

## 2.4 Vertikale Arbeitsfugen in Bodenplatten

Im Lokalbereich von vertikalen Arbeitsfugen in Bodenplatten ist in Querrichtung der Bodenplatte die Bewehrung an der Unterseite gleich der Bewehrung an der Oberseite anzuordnen. Die Erhöhung der Bewehrung ist erst ab 0,75 m nach der Arbeitsfuge notwendig; die Länge des Lokalbereiches ermittelt sich mit:

$$l_{\text{lokal}} = \min\{2 \cdot h_{p1}; 0,2 \cdot b_{p1}\} \quad (2.2)$$

$l_{\text{lokal}}$	Länge des Lokalbereiches bei vertikalen Arbeitsfugen
$h_{p1}$	Plattendicke der Bodenplatte
$b_{p1}$	Breite der Bodenplatte

## 2.5 Oberflächenbewehrung in Bereichen ohne Mindestbewehrung

Sollte eine Bemessung zeigen, dass bei Beachtung des Rissbreitenkriteriums keine Mindestbewehrung zur Einhaltung der Verformungskompatibilität erforderlich ist, so ist eine Oberflächenbewehrung anzuordnen. Bereiche welche nach Herstellung des Bauwerks freie Stirnflächen aufweisen, erfordern ebenfalls die Anordnung einer Oberflächenbewehrung als konstruktive Mindestbewehrung gemäß DIN 19702.

$$a_{s,\text{erf}} = \rho \cdot A_c \leq a_{s,\text{max}} \text{ cm}^2/\text{m} \quad (2.3)$$

$a_{s,\text{erf}}$	erforderliche Mindestbewehrung pro m
$A_c$	Querschnittsfläche des Betons pro m
$\rho$	Rechenwert Bewehrungsgrad bei Bauteilen mit Anforderung an die Wasserundurchlässigkeit $\rho = 0,1 \%$ bei Bauteilen ohne Anforderung an die Wasserundurchlässigkeit $\rho = 0,06 \%$
$a_{s,\text{max}}$	Höchstwert der konstruktiven Mindestbewehrung; bei Anforderung an die Wasserundurchlässigkeit $a_{s,\text{max}} = 25 \text{ cm}^2/\text{m}$ ohne Anforderung an die Wasserundurchlässigkeit $a_{s,\text{max}} = 15 \text{ cm}^2/\text{m}$

Die zugrundeliegende Eingangsgröße ist die Querschnittsfläche des Betons  $A_c$ . Zur Ermittlung der Bewehrung an Stirnflächen soll in diesem Fall die Querschnittsfläche des Betons des betrachteten Bauteils zugrunde gelegt werden. Die ermittelte Bewehrung nach Gl. (2.3) ist je Seite und Verlegerichtung anzuordnen. Die Begrenzungsflächen von scheiben- und plattenartigen Bauteilen müssen eine kreuzweise Bewehrung erhalten.

### 3 Bemessung

#### 3.1 Allgemeine Hinweise zur Bemessung nach MRZ

Die verformungskompatible Zwangsbemessung zielt auf eine rechnerische Begrenzung der Rissbreiten ab. Das vorgestellte Bemessungskonzept ist für homogene Querschnitte konzipiert. Unstetigkeitsstellen wie Einbauten, Querschnittsprünge und andere Inhomogenitäten werden hier nicht explizit einbezogen und müssen gesondert berücksichtigt werden. Empfehlungen dazu sind in Kapitel 2 gegeben. Die Bemessung nach MRZ unterliegt einer gewissen Systematik. Zur besseren Veranschaulichung der verformungskompatiblen Zwangsbemessung ist in Abbildung 3.1 ein Ablaufdiagramm für die Bemessung nach MRZ enthalten.

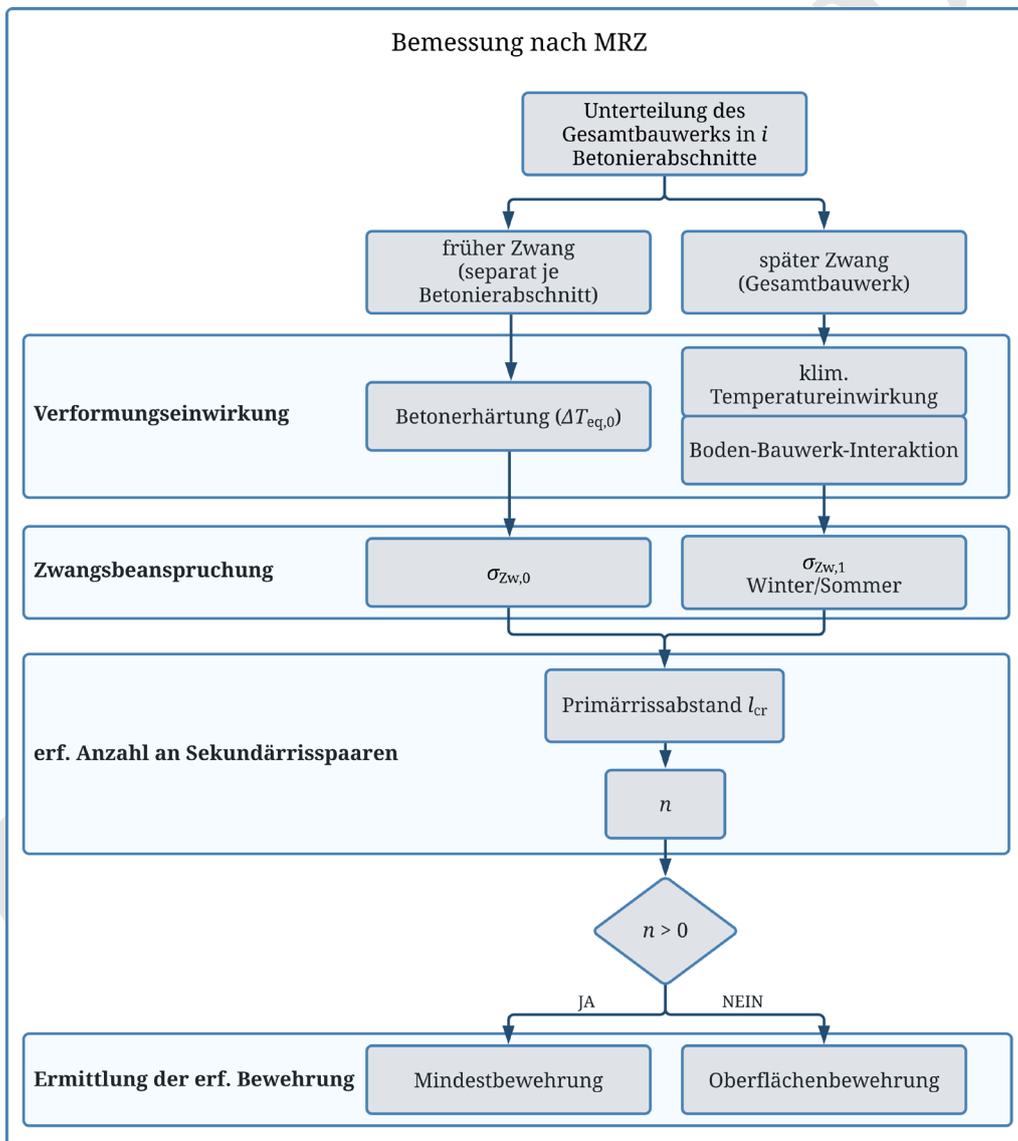


Abbildung 3.1: Ablaufdiagramm der Bemessung nach MRZ.

### 3.2 Materialeingangsgrößen

Für die Bemessung sind die in Tabelle 3.1 angeführten Materialeingangsgrößen relevant.

Tabelle 3.1: Materialeingangsgrößen für die Bemessung

Kurzbegriff	Materialeingangsgröße
$\Delta T_{\text{adiab},7\text{d}}$	adiabatische Temperaturerhöhung des Betons nach 7 Tagen (Sofern nicht anders festgelegt, ist die Obergrenze nach ZTV-W LB 215 zu verwenden.)
$\alpha_T$	Wärmeausdehnungskoeffizient des Betons (Darf ohne genauere Kenntnis mit $10 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ angesetzt werden.)
$f_{\text{ctm}}$	mittlere zentrische Betonzugfestigkeit nach DIN EN 1992-1-1 in Abhängigkeit der geplanten Betonfestigkeitsklasse
$E_{\text{cm}}$	mittlerer Elastizitätsmodul des Betons (je nach Bauteil mit $E_G, E_{\text{Gl}}, E_{\text{Pl}}, E_W$ bezeichnet) nach DIN EN 1992-1-1 in Abhängigkeit der geplanten Betonfestigkeitsklasse

### 3.3 Zwang infolge Betonerhärtung (früher Zwang)

#### 3.3.1 Bodenplatte

##### 3.3.1.1 Verformungseinwirkung

Die äquivalente Temperatureinwirkung für die Bodenplatte  $\Delta T_{\text{Mz,eq},0}$  unterscheidet sich mit Blick auf die bauteiltypische Spannungsgeschichte zwischen Biegezwang an der Ober- und Unterseite.

##### Bodenplatte Oberseite

$$\Delta T_{\text{Mz,eq},0} = 0,6 \cdot (k_0 \cdot \Delta T_{\text{adiab},7\text{d}} + \Delta T_{\text{nom}}) \quad (3.2)$$

$\Delta T_{\text{Mz,eq},0}$  lineare äquivalente Temperatureinwirkung infolge Betonerhärtung

$k_0$  Basisfaktor zur Ermittlung der äquivalenten Temperatureinwirkung

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

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

$\Delta T_{\text{nom}}$  Vorhaltemaß; im Allgemeinen  $\Delta T_{\text{nom}} = 5 \text{ K}$ , sofern keine konkreten Maßnahmen zur Modifikation der Frischbetontemperatur vorgenommen werden. Im Falle von Frischbetonkühlung im Sommer darf  $\Delta T_{\text{nom}}$  um die Kühlleistung reduziert werden, es gilt  $\Delta T_{\text{nom}} = 5 \text{ K} + \min\{0; (T_{\text{FB}} - T_0) \cdot k_{\text{FB}}\}$ .

$k_{\text{FB}}$  Bauteildickenfaktor zur Berücksichtigung der Temperaturdifferenz zwischen Frischbeton- und Umgebungstemperatur

$$k_{\text{FB}} = 0,1 + 0,25 \cdot \ln(h_{\text{pl}})$$

$T_{\text{FB}}$  Frischbetontemperatur an der Einbaustelle

$T_0$  mittlere Umgebungstemperatur an der Einbaustelle am Einbautag

$h_{\text{pl}}$  Plattendicke der Bodenplatte in m

### Bodenplatte Unterseite

$$\Delta T_{Mz,eq,0} = -0,8 \cdot (k_0 \cdot \Delta T_{adiab,7d} + 0,25 \cdot \Delta T_{nom}) \quad (3.3)$$

- $\Delta T_{Mz,eq,0}$  lineare äquivalente Temperatureinwirkung infolge Betonerhärtung  
 $k_0$  Basisfaktor zur Ermittlung der äquivalenten Temperatureinwirkung  
 $k_0 = 0,20$   
 $\Delta T_{adiab,7d}$  adiabatische Temperaturerhöhung des Betons nach sieben Tagen  
 $\Delta T_{nom}$  Vorhaltemaß;  $\Delta T_{nom} = 5 \text{ K}$

#### 3.3.1.2 Zwangsbeanspruchung

Für die Zwangsspannung und den Behinderungsgrad im Erhärtungszeitraum gilt:

$$\sigma_{Zw,0} = \pm \frac{\alpha_T \cdot \Delta T_{Mz,eq,0} \cdot E_{Pl}}{2} \cdot a_{M,0} \quad (3.4)$$

$$\text{mit: } a_{M,0} = \frac{3}{2} \cdot \frac{\gamma_c \cdot l_{BA,eff}^2}{\alpha_T \cdot |\Delta T_{Mz,eq,0}| \cdot E_{Pl} \cdot h_{Pl}} \leq 1 \quad (3.5)$$

- $\sigma_{Zw,0}$  Zwangsspannung im Beton im Zustand I infolge Betonerhärtung  
 $\alpha_T$  Wärmeausdehnungskoeffizient des Betons  
 $\Delta T_{Mz,eq,0}$  lineare äquivalente Temperatureinwirkung infolge Betonerhärtung  
 $E_{Pl}$  mittlerer Elastizitätsmodul des Betons der Bodenplatte  
 $a_{M,0}$  allgemeiner Behinderungsgrad bei Biegezwang im Erhärtungszeitraum  
 $\gamma_c$  Wichte des Betons  
 $l_{BA,eff}$  effektive Betonierabschnittslänge der Bodenplatte in Betrachtungsrichtung  
 $l_{BA,eff} = l_{BA,Pl}$  ... für freistehende Betonierabschnitte  
 $l_{BA,eff} = 2 \cdot l_{BA,Pl}$  ... für Vorkopfbetonagen  
 $l_{BA,Pl}$  Betonierabschnittslänge der Bodenplatte in Betrachtungsrichtung  
 $h_{Pl}$  Plattendicke der Bodenplatte

#### 3.3.2 Wandabschnitte

Die Zwangsschnittgrößen der Wand werden nur durch einen Teil der Bodenplatte in Querrichtung beeinflusst. Die maximale aktivierbare Breite der Bodenplatte  $b_{Pl,eff}$  gibt diesen Teilbereich an und ermittelt sich mit:

$$b_{Pl,eff} = b_W + \sum b_{eff,i} \text{ mit } b_{eff,i} = b_{vorh,i} \leq 1,2 \cdot h_{BA,W}/2 \quad (3.6)$$

- $b_{Pl,eff}$  maximal aktivierbare Breite der Bodenplatte (Die maximal aktivierbare Breite der Bodenplatte wird für den ersten Wandabschnitt berechnet und für alle weiteren Wandabschnitte beibehalten.)  
 $b_W$  Breite der Wand  
 $b_{eff,i}$  aktivierbare Breite der Bodenplatte je Überstand der Bodenplatte  
 $b_{vorh,i}$  Breite des Überstands der Bodenplatte  
 $h_{BA,W}$  Betonierabschnittshöhe der Wand bzw. des Wandabschnitts

### 3.3.2.1 Verformungseinwirkung

Die Verformungseinwirkung infolge Betonerhärtung kann für Wandabschnitte mit Gl. (3.7) ermittelt werden.

$$\Delta T_{N,eq,0} = -0,7 \cdot (k_0 \cdot \Delta T_{adiab,7d} + \Delta T_{nom}) \quad (3.7)$$

$\Delta T_{N,eq,0}$	konstante äquivalente Temperatureinwirkung infolge Betonerhärtung
$k_0$	Basisfaktor zur Ermittlung der äquivalenten Temperatureinwirkung $k_0 = 0,7 - 0,2/b_W^{0,3}$
$\Delta T_{adiab,7d}$	adiabatische Temperaturerhöhung des Betons nach sieben Tagen
$\Delta T_{nom}$	Vorhaltemaß; im Allgemeinen $\Delta T_{nom} = 5$ K, sofern keine konkreten Maßnahmen zur Modifikation der Frischbetontemperatur vorgenommen werden. Im Falle von Frischbetonkühlung im Sommer darf $\Delta T_{nom}$ um die Kühlleistung reduziert werden, es gilt $\Delta T_{nom} = 5 \text{ K} + \min\{0 \text{ K}; (T_{FB} - T_0) \cdot k_{FB}\}$ . Im Falle von Warmbeton im Winter gilt $\Delta T_{nom} = 5 \text{ K} + \max\{0 \text{ K}; (T_{FB} - T_0 - 10 \text{ K}) \cdot k_{FB}\}$
$k_{FB}$	Bauteildickenfaktor zur Berücksichtigung der Temperaturdifferenz zwischen Frischbeton- und Umgebungstemperatur $k_{FB} = 1$
$T_{FB}$	Frischbetontemperatur an der Einbaustelle
$T_0$	mittlere Umgebungstemperatur an der Einbaustelle am Einbautag
$b_W$	Breite der Wand in m

### 3.3.2.2 Zwangsbeanspruchung

$$\sigma_{Zw,0} = -\alpha_T \cdot \Delta T_{N,eq,0} \cdot E_W \cdot a_N \quad (3.8)$$

$$\text{mit: } a_N = \frac{1}{1 + \frac{E_W \cdot A_W}{\sum E_{F,i} A_{F,i}}} \leq 1 \quad (3.9)$$

$\sigma_{Zw,0}$	Zwangsspannung im Beton im Zustand I infolge Betonerhärtung
$\alpha_T$	Wärmeausdehnungskoeffizient des Betons
$\Delta T_{N,eq,0}$	konstante äquivalente Temperatureinwirkung infolge Betonerhärtung
$E_W$	mittlerer Elastizitätsmodul des Betons des Wandabschnitts
$a_N$	allgemeiner Behinderungsgrad bei zentrischem Zwang
$\sum E_{F,i} A_{F,i}$	Dehnsteifigkeit der behindernden Bauteile $i$ (Berücksichtigung der maximalen aktivierbaren Breite der Bodenplatte $b_{Pl,eff}$ )
$E_W \cdot A_W$	Dehnsteifigkeit des Wandabschnitts

Wenn die behindernden Bauteile unterschiedlichen Betondruckfestigkeitsklassen zuzuordnen sind, kann für die Dehnsteifigkeit der behindernden Bauteile auch vereinfacht der Elastizitätsmodul des Bauteils mit der höheren Festigkeitsklasse verwendet werden.

### 3.3.3 Grundlaufdecke

Für Grundlaufdecken wird für die Temperaturentwicklung und -verteilung das gleiche Verhalten wie bei Wandabschnitten unterstellt. Hinsichtlich der Behinderungssituation wird allerdings von einer vollständigen Zwängung ausgegangen.

### 3.3.3.1 Verformungseinwirkung

$$\Delta T_{N,eq,0} = -0,7 \cdot (k_0 \cdot \Delta T_{adiab,7d} + \Delta T_{nom}) \quad (3.10)$$

$\Delta T_{N,eq,0}$  konstante äquivalente Temperatureinwirkung infolge Betonerhärtung

$k_0$  Basisfaktor zur Ermittlung der äquivalenten Temperatureinwirkung

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

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

$\Delta T_{nom}$  Vorhaltemaß;  $\Delta T_{nom} = 5 \text{ K}$

$h_{Gl}$  Höhe der Grundlaufdecke in m

### 3.3.3.2 Zwangsbeanspruchung

$$\sigma_{Zw,0} = -\alpha_T \cdot \Delta T_{N,eq,0} \cdot E_{Gl} \cdot a_N \quad (3.11)$$

$$\text{mit: } a_N = 1 \quad (3.12)$$

$\sigma_{Zw,0}$  Zwangsspannung im Beton im Zustand I infolge Betonerhärtung

$\alpha_T$  Wärmeausdehnungskoeffizient des Betons

$\Delta T_{N,eq,0}$  konstante äquivalente Temperatureinwirkung infolge Betonerhärtung

$E_{Gl}$  mittlerer Elastizitätsmodul des Betons der Grundlaufdecke

$a_N$  allgemeiner Behinderungsgrad bei zentrischem Zwang

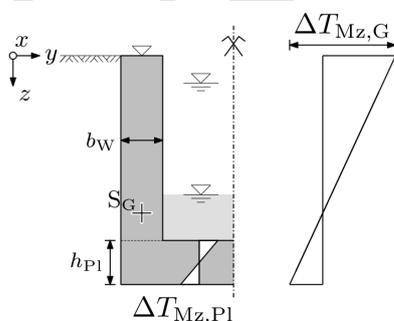
## 3.4 Zwang im Nutzungszeitraum (später Zwang)

Der Zwang im Nutzungszeitraum wird immer am Gesamtbauwerk und am Gesamtquerschnitt betrachtet.

### 3.4.1 Verformungseinwirkung

#### 3.4.1.1 Klimatische Einwirkungen

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



$$\Delta T_{Mz,G} = 5 \text{ K (Winter, oben kälter als unten)}$$

$$\Delta T_{Mz,G} = -10 \text{ K (Sommer, oben wärmer als unten)}$$

$$\Delta T_{Mz,Pl} = \min\{3 \cdot h_{Pl}[\text{m}]; 12\} \text{ K (Winter)}$$

$$\Delta T_{Mz,Pl} = -\min\{3 \cdot h_{Pl}[\text{m}]; 12\} \text{ K (Sommer)}$$

Abbildung 3.9: Saisonale Temperatureinwirkungen für Wasserbehälter mit  $0,8 \text{ m} \leq b_W, h_{Pl} \leq 10 \text{ m}$  nach Turner (2017).

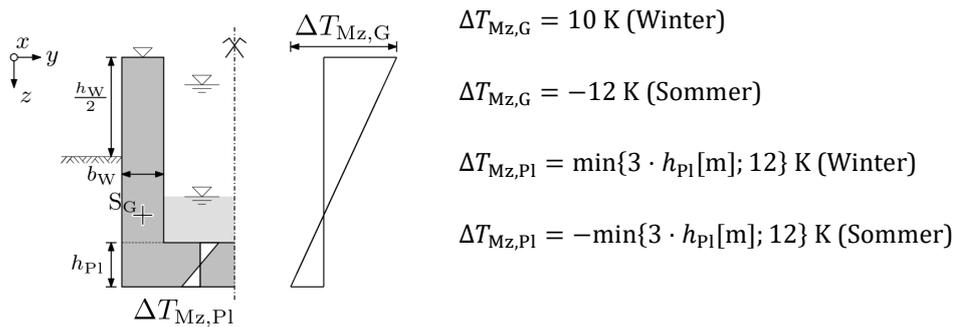


Abbildung 3.10: Saisonale Temperatureinwirkungen für Sparbecken mit  $0,8 \text{ m} \leq b_W$ ,  $h_{Pl} \leq 10 \text{ m}$  nach Turner (2017).

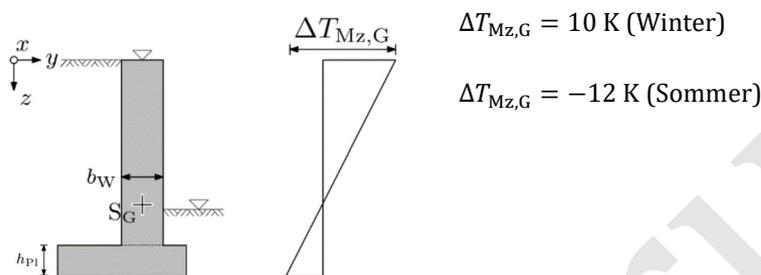


Abbildung 3.11: Saisonale Temperatureinwirkungen für Stützmauern mit  $0,8 \text{ m} \leq b_W$ ,  $h_{Pl} \leq 10 \text{ m}$  nach Turner (2017).

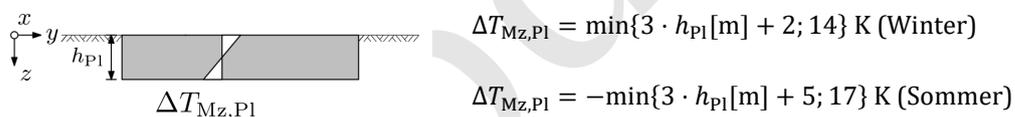


Abbildung 3.12: Saisonale Temperatureinwirkungen für Bodenplatten mit  $0,8 \text{ m} \leq b_W$ ,  $h_{Pl} \leq 10 \text{ m}$  nach Turner (2017).

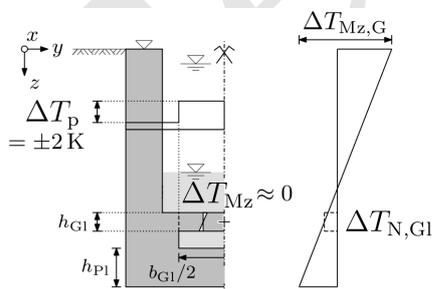


Abbildung 3.13: Saisonale Temperatureinwirkungen für die Grundlaufdecke.

Die vertikale Temperaturdifferenz in Grundlaufdecken ist im Erhärtings- und Nutzungszeitraum gering. 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 ein

konstante Temperatureinwirkung  $\Delta T_{N,G1}$  aus der linear-veränderlichen Temperatureinwirkung am Gesamtbauwerk  $\Delta T_{Mz,G}$ .

Die Temperatureinwirkungen für Wehre können von Wasserbehältern und Sparbecken übernommen werden. Landpfeiler sind einseitig eingeschüttet, wodurch die Temperatureinwirkung von Wasserbehältern (Abbildung 3.9) übernommen werden. Stropfwehre werden beidseitig von Wasser umflossen, wodurch die Temperaturansätze des Sparbeckens (Abbildung 3.10) angesetzt werden.

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.

### 3.4.1.2 Boden-Bauwerk-Interaktion

Aus der Boden-Bauwerk-Interaktion ergeben sich zusätzliche Verformungseinwirkungen. Die Ermittlung der Setzungen sollte in enger Abstimmung mit dem Baugrundgutachter erfolgen. Für das Nachweisverfahren wird dem Gesamtbauwerk die letztendliche Setzungsmulde aufgezwungen. Die Berechnung der Setzungsmulde und die daraus ermittelten Zwangsspannungen erfolgen im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit.

### 3.4.2 Zwangsbeanspruchung

Die klimatischen Einwirkungen und die Boden-Bauwerk-Interaktion führen im Nutzungszeitraum zu einer Biegebeanspruchung am Gesamtquerschnitt. Für übliche Längsabmessungen der Bauwerke im Wasserbau wird der Behinderungsgrad  $a$  immer gleich 1 gesetzt.

Die Zwangsspannungen aus dem Nutzungszeitraum werden am Gesamtbauwerk ermittelt und über ein Zugband unten und oben berücksichtigt. Die sich aus dem Sommer- bzw. Winterfall ergebenden klimatischen Zwangsspannungen werden über die gesamte Bauwerkslänge angesetzt. Die Spannungen aus der Boden-Bauwerk-Interaktion werden in den relevanten Bereichen ungünstig überlagert. Abbildung 3.15 gibt eine Übersicht für die Überlagerungsvorschriften. Druckspannungen infolge der Boden-Bauwerk-Interaktion werden auf der sicheren Seite liegend vernachlässigt.

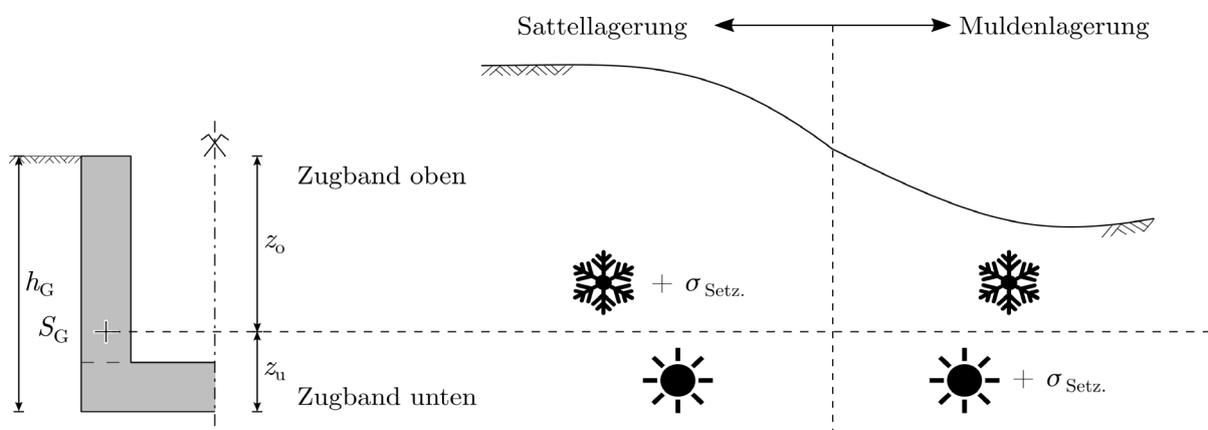


Abbildung 3.15: Übersicht der Überlagerung für klimatische Einwirkungen und Boden-Bauwerk-Interaktion (Ober et al. 2024).

Nachfolgend werden die in Abbildung 3.15 schematisch dargestellten Überlagerungen für die Zwangsspannungen aus klimatischen Einwirkungen und Boden-Bauwerk-Interaktion getrennt für das Zugband unten und das Zugband oben zusammengefasst.

### 3.4.2.1 Zugband unten

Die Zwangsspannung für das Zugband unten ergibt sich wie folgt:

$$\sigma_{Zw,1} = -\frac{\alpha_T \cdot \Delta T_{Mz,G} \cdot E_{Pl}}{h_G} \cdot z_u - \frac{\alpha_T \cdot \Delta T_{Mz,Pl} \cdot E_{Pl}}{2} \cdot a_M + \sigma_{\text{Setzung}} \quad (3.13)$$

$\sigma_{Zw,1}$	Zwangsspannung im Beton im Zustand I im Nutzungszeitraum
$\alpha_T$	Wärmeausdehnungskoeffizient des Betons
$\Delta T_{Mz,G}$	linear-veränderliche Temperatureinwirkung am Gesamtbauwerk im Nutzungszeitraum Sommer
$\Delta T_{Mz,Pl}$	linear-veränderliche Temperatureinwirkung der Bodenplatte im Nutzungszeitraum Sommer
$E_{Pl}$	mittlerer Elastizitätsmodul des Betons der Bodenplatte
$z_u$	Abstand vom Schwerpunkt des Gesamtbauwerks zum unteren Rand
$h_G$	Höhe des Gesamtbauwerks
$a_M$	allgemeiner Behinderungsgrad bei Biegezwang; $a_M = 1$
$\sigma_{\text{Setzung}}$	Zwangsspannung unten aus der Setzungsmulde im Falle einer Muldenlagerung ( $\sigma_{\text{Setzung}} \geq 0$ )

### 3.4.2.2 Zugband oben

Die Zwangsspannung für das Zugband oben ergibt sich wie folgt:

$$\sigma_{Zw,1} = -\frac{\alpha_T \cdot \Delta T_{Mz,G} \cdot E_W}{h_G} \cdot z_o + \sigma_{\text{Setzung}} \quad (3.14)$$

$\sigma_{Zw,1}$	Zwangsspannung im Beton im Zustand I im Nutzungszeitraum
$\alpha_T$	Wärmeausdehnungskoeffizient des Betons
$\Delta T_{Mz,G}$	linear-veränderliche Temperatureinwirkung am Gesamtbauwerk im Nutzungszeitraum Winter
$E_W$	mittlerer Elastizitätsmodul des Betons des obersten Wandabschnitts
$z_o$	Abstand vom Schwerpunkt des Gesamtbauwerks zum oberen Rand
$h_G$	Höhe des Gesamtbauwerks
$\sigma_{\text{Setzung}}$	Zwangsspannung oben aus der Setzungsmulde im Falle einer Sattellagerung ( $\sigma_{\text{Setzung}} \geq 0$ )

### 3.5 Erforderliche Anzahl an Sekundärrisspaaren

#### 3.5.1 Primärrissabstand

##### 3.5.1.1 Bodenplatte

Für die Ober- und Unterseite der Bodenplatte ermittelt sich der maximale Primärrissabstand ingenieurmäßig mit:

$$l_{cr,Pl} = 5,5 \cdot \sqrt{h_{Pl}} \leq \frac{l_{BA,eff}}{2} \quad (3.15)$$

$l_{cr,Pl}$	geometrisch vorgegebener Primärrissabstand der Bodenplatte in m
$h_{Pl}$	Plattendicke der Bodenplatte in m
$l_{BA,eff}$	effektive Betonierabschnittslänge der Bodenplatte in Betrachtungsrichtung
	$l_{BA,eff} = l_{BA,Pl}$ ... für freistehende Betonierabschnitte
	$l_{BA,eff} = 2 \cdot l_{BA,Pl}$ ... für Vorkopfbetonagen
$l_{BA,Pl}$	Betonierabschnittslänge der Bodenplatte in Betrachtungsrichtung

##### 3.5.1.2 Wandabschnitte

Der Primärrissabstand für Wandabschnitte ist unabhängig von der Betonierabschnittslänge wie folgt zu ermitteln:

$$l_{cr,W} = \min\{1,2 \cdot h_{BA,W}; l_{BA,W}/2\} \quad (3.16)$$

$l_{cr,W}$	geometrisch vorgegebener Primärrissabstand der Wand bzw. des Wandabschnitts
$h_{BA,W}$	Betonierabschnittshöhe der Wand bzw. des Wandabschnitts
$l_{BA,W}$	Betonierabschnittslänge der Wand bzw. des Wandabschnitts

##### 3.5.1.3 Grundlaufdecke

Der Abstand von Primärrissen in Grundlaufdecken kann in Abhängigkeit der Breite des Grundlaufs mit Gl. (3.17) ermittelt werden.

$$l_{cr,Gl} = 0,6 \cdot b_{Gl} \quad (3.17)$$

$l_{cr,Gl}$	geometrisch vorgegebener Primärrissabstand der Grundlaufdecke in Längsrichtung
$b_{Gl}$	Breite der Grundlaufdecke

### 3.5.2 Erforderliche Sekundärrisspaare

Die zum Erreichen der Verformungskompatibilität erforderliche Anzahl an Sekundärrisspaaren  $n$  wird in Abhängigkeit von Verformungseinwirkung, Primärrissabstand und des Rissbreitenkriteriums bestimmt. Nach Turner (2017) gilt allgemein:

$$n = 1,1 \cdot \left( \left( \frac{\sigma_{Zw,0}}{a^{0,6}} + \sigma_{Zw,1} \right) \frac{l_{cr}}{E_{cm} \cdot w_k} \cdot k_{BD} - 1 \right) \quad (3.19)$$

mit:	$k_{BD} = \begin{cases} 0,75; & \sigma_{Zw} < 2 \cdot f_{ctm} \\ 0,85; & \sigma_{Zw} \geq 2 \cdot f_{ctm} \end{cases}$
$n$	Anzahl an Sekundärrisspaaren
$\sigma_{Zw,0}$	Zwangsspannung im Beton im Zustand I infolge Betonerhärtung
$\sigma_{Zw,1}$	Zwangsspannung im Beton im Zustand I im Nutzungszeitraum
$l_{cr}$	geometrisch vorgegebener Primärrissabstand
$E_{cm}$	mittlerer Elastizitätsmodul des Betons
$w_k$	Rissbreitenkriterium
$k_{BD}$	Beiwert zur Berücksichtigung der elastischen Betondehnung zwischen den Rissen
$a$	allgemeiner Behinderungsgrad
$f_{ctm}$	mittlere zentrische Betonzugfestigkeit

Die Zwangsspannungen im Beton im Zustand I werden separat für den frühen und späten Zwang ermittelt. Für die Bereiche der Zugbänder an der Ober- bzw. Unterseite des Gesamtbauwerks ist die Zwangsspannung aus frühem und spätem Zwang zu überlagern. In allen anderen Bereichen (Bodenplatte Oberseite und Wandabschnitte) ist nur der frühe Zwang zu berücksichtigen.

### 3.6 Ermittlung der erforderlichen Mindestbewehrung

Die Ermittlung der Mindestbewehrung erfolgt gemäß der wissenschaftlichen Erkenntnisse aus den Arbeiten von Bödefeld (2010) und Turner (2017) mit Gl. (3.20).

$$a_{s,erf} = \sqrt{\frac{d_s \cdot d_1^2 \cdot b^2 \cdot f_{ctm}}{w_k \cdot E_s}} \cdot (0,5 + 0,34 \cdot n) \quad (3.20)$$

$a_{s,erf}$	erforderliche Mindestbewehrung
$d_s$	Durchmesser der Bewehrung
$d_1$	Abstand des Bewehrungsschwerpunkts vom Bauteilrand
$b$	Breite des Querschnitts, in der Regel 1 m
$f_{ctm}$	mittlere zentrische Betonzugfestigkeit
$w_k$	Rissbreitenkriterium
$E_s$	Elastizitätsmodul des Bewehrungsstahls
$n$	Anzahl an Sekundärrisspaaren

#### **4 Beispiel: Mindestbewehrung für eine fugenlose Schifffahrtsschleuse**

Ein ausführliches Beispiel zur Ermittlung der Mindestbewehrung für eine fugenlose Schifffahrtsschleuse ist in den Erläuterungen zum MRZ, Kapitel 4, enthalten.

Gelbdruck

## Literatur

Bödefeld, Jörg (2010): Rissmechanik in dicken Stahlbetonbauteilen bei abfließender Hydratationswärme. Karlsruhe: Bundesanstalt für Wasserbau (Mitteilungsblatt der Bundesanstalt für Wasserbau, 92).

DIN EN 1992-1-1: Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken - Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau.

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.

Erläuterungen zum MRZ: Bundesanstalt für Wasserbau (Hg.): Erläuterungen zum BAW Merkblatt - Rissbreitenbegrenzung für Zwang in massiven Wasserbauwerken (MRZ). Karlsruhe: Bundesanstalt für Wasserbau (BAW-Merkblätter, -Empfehlungen und -Richtlinien).

MFZ (2011): Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) (Hg.): BAWMerkblatt Rissbreitenbegrenzung für frühen Zwang (MFZ). Karlsruhe: Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) (BAW-Merkblätter, -Empfehlungen und -Richtlinien).

Ober, Julia; Krenn, Christina; Schlicke, Dirk (2024): Bestimmung der Mindestbewehrung mittels verformungskompatiblen Ansatzes unter expliziter Berücksichtigung der Zwangsspannungen aus der Boden-Bauwerk-Interaktion bei massiven Wasserbauwerken. In: Dirk Schlicke, Markus Krüger, Bernhard Freytag und Thomas Markus Laggner (Hg.): 6. Grazer Betonkolloquium. Graz: Verlag der Technischen Universität Graz, S. 267–273.

Tue, Nguyen Viet; Schlicke, Dirk (2020): Zwangbeanspruchung und Rissbreitenbeschränkung in Stahlbetonbauteilen auf Grundlage der Verformungskompatibilität. In: Konrad Bergmeister, Frank Fingerloos und Johann-Dietrich Wörner (Hg.): Beton Kalender 2020: Wiley, S. 831–887.

Turner, Katrin (2017): Ganzheitliche Betrachtung zur Ermittlung der Mindestbewehrung für fugenlose Wasserbauwerke. Dissertation. Technische Universität Graz, Graz. Institut für Betonbau.

ZTV-W LB 215: Bundesministerium für Digitales und Verkehr (Hg.): Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen Wasserbau, Wasserbauwerke aus Beton und Stahlbeton - Leistungsbereich 215. Bonn/Berlin: Bundesministerium für Digitales und Verkehr (Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen - Wasserbau).