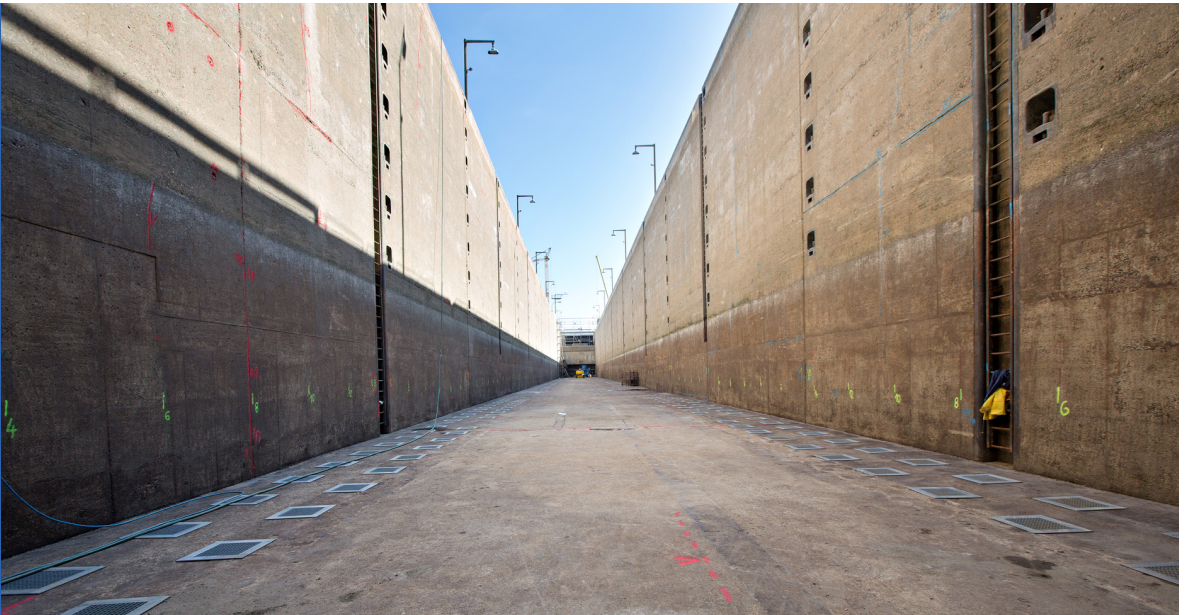




Ergänzende Hinweise zur Bewertung der Tragfähigkeit bestehender massiver Wasserbauwerke

1 Vorbemerkung

An den Bundeswasserstraßen gibt es zahlreiche bestehende massive Wasserbauwerke wie Schleusen, Wehre und Düker. Gemäß Bundeswasserstraßengesetz (WaStrG) müssen bestehende Bauwerke den Anforderungen der anerkannten Regeln der Technik (aaRdT) entsprechen. Für massive Wasserbauwerke sind die Normen DIN EN 1992-1-1:2011-01 (EC2) und DIN 19702:2013-02 (DIN 19702) im „Technischen Regelwerk – Wasserstraße“ (TR-W) verbindlich eingeführt. Bestandsschutz im engeren Sinne besteht nicht.

Die Bewertung der Tragfähigkeit bestehender Wasserbauwerke auf der Grundlage des aktuellen Normenstands, der primär den Hoch- und Brückenbau berücksichtigt, führt häufig zu rechnerischen Tragfähigkeitsdefiziten. Die zugrunde liegenden Ansätze werden den Besonderheiten des Wasserbaus nicht vollständig gerecht. Angesichts der begrenzten Ressourcen für Erneuerung und Unterhaltung sowie im Sinne der Nachhaltigkeit ist eine präzise Bewertung bestehender Bauwerke unerlässlich, um etwaige verzichtbare Verstärkungsmaßnahmen zu vermeiden.

Das BAWMerkblatt „Bewertung der Tragfähigkeit bestehender, massiver Wasserbauwerke (TbW)“ (2016) bietet als Nachrechnungsstandard durch modifizierte Nachweise eine strukturierte Tragfähigkeitsbewertung. Trotz der Modifikation nach TbW (2016) zeigt die Praxis, dass eine verbesserte Nutzung von rechnerischen Tragfähigkeitsreserven durch die Anpassung der Eingangsgrößen, der Nachweise und des Sicherheitskonzepts an die wasserbaulichen Gegebenheiten möglich und erforderlich ist. Derzeit laufen intensive Untersuchungen zur weiteren Modifizierung der Bemessungsvorgaben des BAWMerkblatts TbW (2016) (Stephan und Kotan 2024). Kernanliegen ist die Berücksichtigung der spezifischen Tragwerksbedingungen des massiven Wasserbaus, um vorhandene Tragfähigkeitsreserven gezielt zu mobilisieren. Erste Ergebnisse werden in diesem BAWBrief vorgestellt.

2 Anwendungsbereich

Untersuchungsgegenstand dieses BAWBriefs sind massive Wasserbauwerke der WSV aus bewehrtem und unbewehrtem Beton oder Mauerwerk, die nach den zur

Bauzeit geltenden aaRdT errichtet wurden und in den Anwendungsbereich des BAWMerkbblatts TbW (2016) fallen.

Die nationale Entwicklung des verbindlichen Regelwerks im Beton- und Stahlbetonbau begann mit der Einführung der ersten DIN 1045:1925 und setzte sich in mehreren Etappen bis zum heutigen Eurocode EC2 fort. Dabei waren vorwiegend die Belange des Hoch- und Brückenbaus inhaltsprägend, während die Haupteinwirkung Wasser bei Wasserbauwerken immer von untergeordneter Bedeutung war. Die Berücksichtigung des vormals vernachlässigten inneren Wasserdrucks als Riss- und Porenwasserdruck (ab circa 1966, u. a. DIN 19702) sowie die Einführung des semiprobabilistischen Sicherheitskonzepts und fortgeschriebener Nachweisformate (z. B. Querkraft) führen zu hohen rechnerischen Auslastungsgraden in den Bemessungsquerschnitten. Die nach alten Standards bemessenen Massivbauten sind daher nach heutigem Regelwerk oftmals rechnerisch nicht ausreichend tragfähig (Fleischer et al. 2020).

Die Anwendung des BAWMerkbblatts TbW (2016) als Nachrechnungsstandard zeigt insbesondere bei unbewehrten Querschnitten weiterhin rechnerische Defizite. Diese stehen oft im Widerspruch zum tatsächlich vorgefundenen Bauwerkszustand, der trotz seines hohen Durchschnittsalters keine Anzeichen von Überlastung zeigt. Die nachfolgenden Ansätze ermöglichen eine Bewertung der Tragfähigkeit unter Berücksichtigung der wasserbaulichen Randbedingungen durch Anpassung der Bemessungsgrößen. Das tragwerksgerechte Sicherheitskonzept gemäß Abschnitt 5 – für unbewehrte Querschnitte – berücksichtigt die spezifischen Tragwerksbedingungen des massiven Wasserbaus. Das Bewertungskonzept gemäß Abschnitt 6 ergänzt die Nachrechnung. Mit diesem Konzept werden rechnerische Defizite nach Gefahrenstufen bewertet. Die Gefahrenstufen legen den daraus resultierenden sicherheitsbezogenen Handlungsbedarf fest.

3 Modifizierter Ansatz der Einwirkung Wasserdruck

Die resultierenden Wasserdrücke, sowohl aus freier Wasseroberfläche (Kanal und Fluss) als auch aus dem Grundwasser, stellen neben Eigengewicht und Erddruck die

bemessungsrelevanten Einwirkungen bei Wasserbauwerken dar. Wasserdrücke lassen sich in Bezug auf ihre Größe und Richtung präzise bestimmen.

Bei Beanspruchungen durch Oberflächenwasser und Grundwasser können die Teilsicherheitsbeiwerte ständiger Einwirkungen angesetzt werden. Für jede Bemessungssituation sind die jeweils maßgebenden Wasserstände zu berücksichtigen.

Massive Wasserbauwerke regulieren häufig Wasserstände und stehen entsprechend planmäßig dauerhaft mit Wasser in Kontakt. Im Vergleich zu anderen veränderlichen Einwirkungen wie Wind oder Verkehr ist die Variabilität der Wasserstände relativ zuverlässig bekannt, kann zusätzlich durch Beobachtungen statistisch abgesichert werden und ist zum Teil physikalisch bzw. geometrisch begrenzt. Hinsichtlich der Einwirkungen aus Grundwasser kann ebenfalls unter der Voraussetzung, dass repräsentative Messreihen vorliegen, die Variabilität der Grundwasserstände bestimmt werden. Darüber hinaus können auch hier Randbedingungen vorliegen, die eine physikalische Begrenzung der Grundwasserstände bewirken.

Gemäß DIN EN 1990:2021-10 (EC0), Abschnitt 4.1.1 (3), dürfen Einwirkungen durch Wasser und Grundwasser in Abhängigkeit ihrer zeitlichen Veränderung als ständige oder veränderliche Einwirkungen eingestuft werden. Eine pauschale Behandlung des Wasserdrucks als veränderliche Einwirkung – verbunden mit entsprechend hohen Teilsicherheitsbeiwerten – führt insbesondere bei Nachrechnungen häufig zu rechnerischen Defiziten, da die Größe der Einwirkung überschätzt werden kann oder praktisch unrealistisch ist.

Alle Wasserdrücke – sowohl aus Oberflächenwasser als auch aus Grundwasser – können daher im Rahmen der Nachrechnung grundsätzlich mit den Teilsicherheitsbeiwerten ständiger Einwirkungen belegt werden. Dieses Vorgehen findet in der Geotechnik gemäß DIN 1054:2021-04, nach Tabelle A 2.1 und Abschnitt A 2.4.6.1.2 A (6), Anwendung und ist aufgrund der geotechnisch dominierten Beanspruchung massiver Wasserbauwerke gerechtfertigt. Dabei ist jedoch zu beachten, dass die charakteristischen Werte der Wasserstände trotz der Behandlung

als ständige Einwirkung zeitlich veränderlich sind und in unterschiedlichen Bemessungssituationen differenziert angesetzt werden müssen. Einwirkungen aus Wasserdruck dürfen nicht mit Kombinationsbeiwerten abgemindert werden.

4 Schubkrafttragfähigkeit – Anpassung des Reibungsbeiwerts

Der Nachweis der Schubkraftübertragung in Fugen erfolgt gemäß EC2, Abschnitt 6.2.5. Der Bemessungswert der Schubtragfähigkeit einer Fuge ergibt sich aus den additiven Traganteilen Adhäsion, Reibung und Bewehrung. Bei unbewehrten Querschnitten beschränkt sich die Schubkrafttragfähigkeit auf die Anteile Adhäsion und Reibung. Erfahrungen zeigen, dass ein wesentlicher Teil der Arbeitsfugen beschädigt („offen“) ist, sodass kein Verbund (Adhäsion) mehr wirksam ist. Dies gilt auch für zyklisch beanspruchte Querschnitte. Daher ist die Schubtragfähigkeit unbewehrter Querschnitte häufig allein durch Reibung bestimmt. Der Traganteil Reibung wird

auf Grundlage des Reibungsbeiwerts μ und der vorhandenen Normalspannung σ_n ermittelt und ist durch das Abgleiten eines starren Körpers entlang von Bruchflächen (i. d. R. Arbeitsfugen) gekennzeichnet.

Bemessungswert der Schubkrafttragfähigkeit nach EC2, Abschnitt 6.2.5, Gl. (6.25):

$$v_{Rdi} = c \cdot f_{ctd} + \mu \cdot \sigma_n + \rho \cdot f_{yd} (1,2\mu \cdot \sin \alpha + \cos \alpha) \leq 0,5 \cdot v \cdot f_{cd} \quad (1)$$

Für den Reibungsbeiwert kann ein Bemessungswert von $\mu = 1,0$ angesetzt werden, sofern keine genaueren Untersuchungsergebnisse vorliegen.

Umfangreiche Laboruntersuchungen der BAW an Probekörpern aus verschiedenen bestehenden Wasserbauwerken ergaben, dass die in EC2 angegebenen Reibungsbeiwerte konservativ sind (BAW 2019). Aufgrund der Großflächigkeit der Bruchzone und der Starrheit der abgleitenden Kontur ist im Versagensfall ein mittlerer

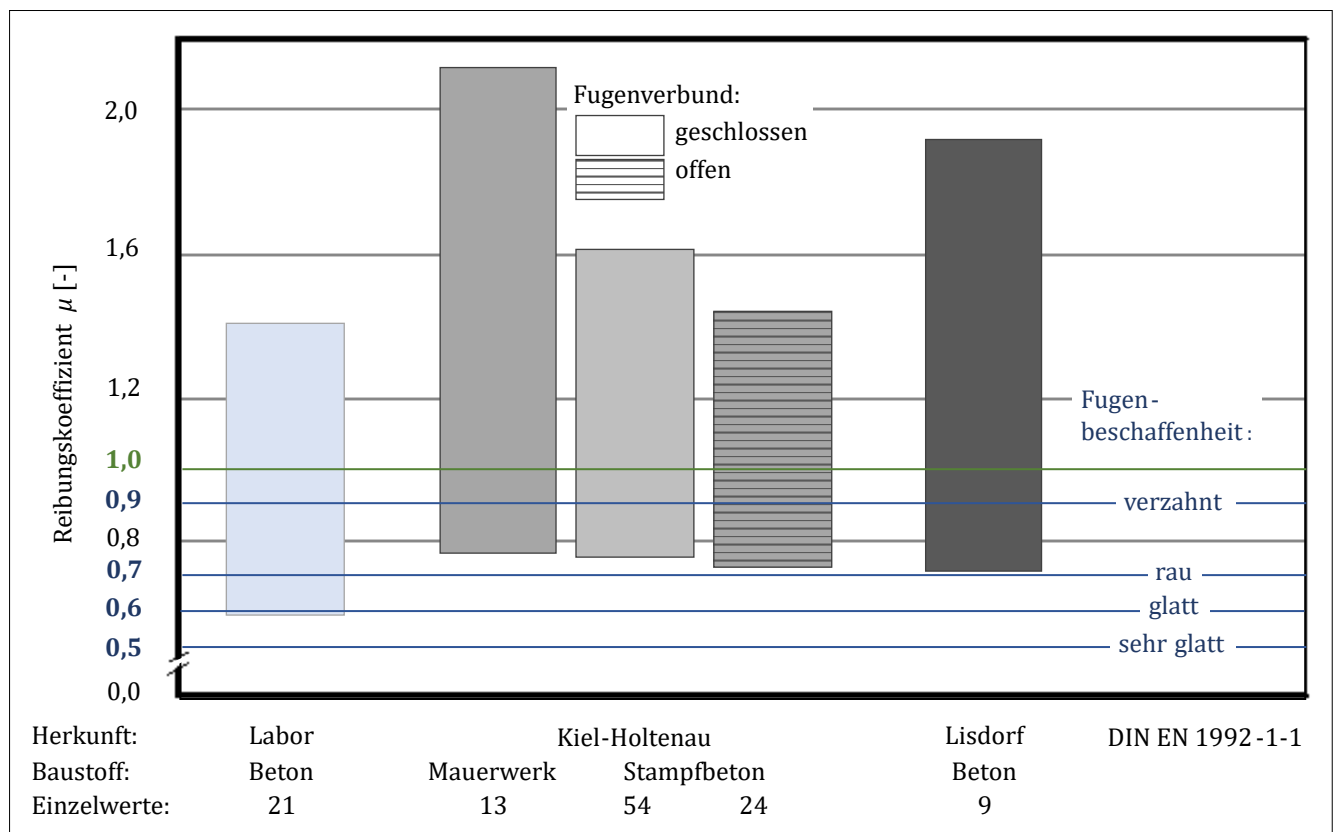


Bild 1: Vergleich der experimentell bestimmten Reibungskoeffizienten mit den Vorgaben nach EC2 (Malárics-Pfaff et al. 2022)

Reibungsbeiwert maßgebend, der für den Bemessungswiderstand angesetzt werden kann. Bild 1 (Seite 3) zeigt die aus Rahmenscherversuchen abgeleiteten Reibungskoeffizienten. Die Mittelwerte der ermittelten Reibungskoeffizienten überschreiten die Vorgaben der Norm gemäß EC2 deutlich und können als Nennwerte im Sinne von EC0, Abschnitt 4.2 (5), verwendet werden. Auf der Grundlage dieser Ergebnisse wird beim Nachweis der Schubkraftübertragung von Fugen die In-situ-Bestimmung des Reibungsbeiwertes durch Rahmenscherversuche oder die pauschale Verwendung eines Reibungsbeiwerts $\mu = 1,0$ empfohlen. Der Festigkeitsabminderungsbeiwert für die Fugenrauigkeit darf entsprechend einer verzahnten Fuge mit $v = 0,7$ angenommen werden.

5 Sicherheitskonzept: Effekt-Faktorisierung bei unbewehrten Querschnitten

5.1 Allgemeines

Die Nachrechnung bestehender Wasserbauwerke, die bauzeitlich nach einem globalen Sicherheitskonzept bemessen wurden, mit einem semiprobabilistischen Sicherheitskonzept nach Eurocode ist bei unbewehrten Querschnitten häufig nicht möglich. Die Spannungsbeurteilung wird durch die unterschiedliche Beaufschlagung günstiger und ungünstiger Einwirkungen sowie durch den nichtlinearen Einfluss des inneren Wasserdrucks erschwert (Stephan und Kotan 2024).

Das Sicherheitskonzept der Effekt-Faktorisierung umgeht diesen Nachteil und nutzt rechnerische Tragfähigkeitsreserven unbewehrter Querschnitte massiver Wasserbauwerke durch ein tragwerksgerechtes Konzept. Das Konzept beschränkt sich auf die Nachweise massiver Querschnitte bzw. Bauteile (STR).

Im Grenzzustand der Tragfähigkeit (GZT) werden die Teilsicherheitsbeiwerte $\gamma_{E,i}$ für die Einwirkungsseite nicht direkt bei den einzelnen Einwirkungen (Faktorisierung der Einwirkungen) berücksichtigt, sondern mittels eines integralen Teilsicherheitsbeiwerts γ_E auf die Auswirkungen (Effekte) der jeweiligen Einwirkungskombination angewendet (Bild 2).

Die Nachweise im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit (GZG) attestieren dem Bauwerk neben seiner Gebrauchstauglichkeit das nötige Maß an Robustheit und Dauerhaftigkeit. Als maßgebendes Kriterium ist die Begrenzung der Fugenklaffung im GZG als Nachweis einer ausreichenden Druckzonenhöhe und zur Gewährleistung einer ausreichenden Duktilität des Systems zu führen. Der Grenzwert der maximal zulässigen Fugenklaffung wurde dabei unter Berücksichtigung der Teilsicherheitsbeiwerte des Lagesicherheitsnachweises nach EC0 hergeleitet. Bei der Anwendung der Effekt-Faktorisierung sind die GZG-Nachweise deshalb zwingend erforderlich.

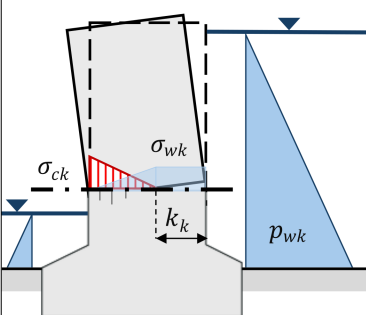
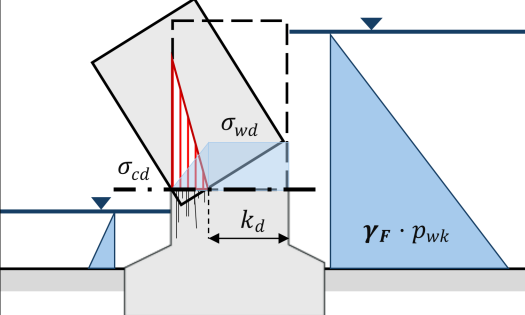
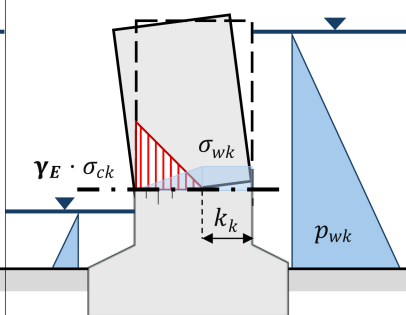
Das Beispiel einer flusseitigen Schleusenkammerwand (Anlage 1) vergleicht die Nachweisführung nach dem bisher angewendeten Sicherheitskonzept nach BAWMerkblatt TbW (2016) und der hier vorgestellten Effekt-Faktorisierung. Der Rechenaufwand reduziert sich bei dem Konzept der Effekt-Faktorisierung erheblich, da nur ein Gleichgewichtszustand unter charakteristischen Einwirkungen bestimmt wird. Es besteht die Möglichkeit, bewehrte Querschnitte auch ohne Berücksichtigung der Bewehrung als unbewehrte Querschnitte zu berechnen.

5.2 Eurocode-Konformität des Konzepts

Gemäß EC0, Abschnitt 6.3.2. (2), und DIN EN 1997-1:2009-09 (EC7), Abschnitt 2.4.7.3.2. (2), kann bei Beteiligung geotechnischer Einwirkungen der Teilsicherheitsbeiwert auf die Effekte der Einwirkungskombination angewendet werden. Die vorrangige geotechnische Beanspruchung der Wasserbauwerke durch Erd- und Wasserdruck rechtfertigt die Anwendung eines integralen Teilsicherheitsbeiwerts γ_E auf die Effekte, der die unterschiedlich großen Teilsicherheitsbeiwerte der Einwirkungen $\gamma_{E,i}$ beinhaltet. Die Effekt-Faktorisierung ist nach den geltenden Regelwerken (EC0, EC7) zulässig.

5.3 Teilsicherheitsbeiwerte

Durch die Veränderung der Position der Teilsicherheitsbeiwerte der Einwirkungen wird ein integraler Teilsicherheitsbeiwert eingeführt (Bild 2). Der integrale Teilsicherheitsbeiwert γ_E für die Effekte (Schnittkräfte, Spannungen etc.) des Konzepts der Effekt-Faktorisierung

Charakteristisch <i>Keine Faktorisierung</i>	Semiprobabilistisch (EC2, TbW 2016) <i>Faktorisierung der Einwirkungen</i>	Effekt-Faktorisierung (BAWBrief 2026) <i>Faktorisierung der Effekte</i>
 $E_d = E\{G_{k,j}; Q_{k,1}; \psi_{0,i} \cdot Q_{k,i}\} \quad (2)$	 $E_d = E\{\gamma_{G,j} \cdot G_{k,j}; \gamma_{F,1} \cdot Q_{k,1}; \gamma_{F,i} \cdot \psi_{0,i} \cdot Q_{k,i}\} \quad (3)$	 $E_d = \gamma_E \cdot E\{G_{k,j}; Q_{k,1}; \psi_{0,i} \cdot Q_{k,i}\} \quad (4)$

Dabei ist

G_k charakteristische Wert einer ständige Einwirkung;
 Q_k charakteristische Wert einer veränderlichen Einwirkung;
 γ_G Teilsicherheitsbeiwert für ständige Einwirkung;
 γ_F Teilsicherheitsbeiwert für Einwirkungen;
 γ_E Integraler Teilsicherheitsbeiwert der Effekt-Faktorisierung;

ψ_0 Kombinationsbeiwert einer veränderlichen Einwirkung;
 σ_w innerer Wasserdruck;
 σ_c Betondruckspannung;
 p_w Wasserdruck;
 k Klaffung der Fuge.

Bild 2: Schematische Gegenüberstellung der charakteristischen Einwirkung gemäß EC0, Gl. (6.14a) (links), Faktorisierung der Einwirkungen gemäß EC0, Gl. (6.9b) (Mitte) und der Effekt-Faktorisierung (rechts)

kann entsprechend den Anteilen der ständigen bzw. veränderlichen oder außergewöhnlichen Einwirkungen gewichtet werden. Vereinfachend werden die Werte der Tabelle 1 empfohlen, die sich auf die Ansätze im BAW-Merkblatt TbW (2016) beziehen.

Veränderliche Einwirkungen sind nur bei ungünstiger Wirkung in den Bemessungssituationen zu berücksichtigen. Hat eine veränderliche Einwirkung sowohl günstige als auch ungünstige Anteile, wird sie als Ganzes bei insgesamt ungünstiger Wirkung angesetzt.

Bemessungssituation	$\gamma_{E,inf}$	$\gamma_{E,sup}$
BS-P	1,0	1,3
BS-T	1,0	1,2
BS-A	1,0	1,0

Tabelle 1: Teilsicherheitsbeiwerte γ_E der Effekt-Faktorisierung

Die Effekte der Einwirkungskombination beeinflussen das Bemessungsergebnis je nach Nachweisformat qualitativ unterschiedlich. Bei der Effekt-Faktorisierung ist zwischen günstig und ungünstig wirkenden Komponenten der Effekte zu differenzieren. Je nach Wirkungsweise sind integrale Teilsicherheitsbeiwerte – $\gamma_{E,inf}$ für günstig wirkende und $\gamma_{E,sup}$ für ungünstig wirkende Effekte – nach Tabelle 1 zu wählen. Die Inkonsistenz, dass Effekte derselben Einwirkung innerhalb eines Nachweises mit unterschiedlichen Teilsicherheitsbeiwerten berücksichtigt werden, ist vertretbar, da dieses Vorgehen in Übereinstimmung mit EC0, Abschnitt 6.4.3.1 (5) steht.

5.4 Vorgehen und Nachweisformate bei der Effekt-Faktorisierung

Die Nachweisformate und die Bestimmung des Widerstandes entsprechen dem üblichen Vorgehen gemäß EC2 bzw. TbW (2016). Die Formelbezeichnungen bleiben

bestehen. Durch die nachgelagerte Anwendung der Teilsicherheitsbeiwerte auf der Einwirkungsseite werden die Effekte (z. B. Schnittgrößen, Spannungen etc.) zunächst als charakteristische Werte bestimmt. Die Teilsicherheitsbeiwerte werden auf Nachweisebene angewendet. Da die Effekte den Bemessungswert des Widerstands teilweise beeinflussen, werden die Nachweisformate und die Positionierung der Teilsicherheitsbeiwerte der Effekt-Faktorisierung im Folgenden beschrieben.

5.4.1 Bestimmung der Spannungen (Effekte)

Die Bestimmung der charakteristischen Schnittgrößen und der Druckzonenhöhen bzw. der klaffenden Fugen k (Bild 2) erfolgt unter Berücksichtigung der in den Bemessungssituationen anzusetzenden charakteristischen Einwirkungen sowie des charakteristischen inneren Wasserdrucks gemäß DIN 19702. Auf Grundlage der charakteristischen Größen werden die vorhandenen Spannungen bestimmt.

5.4.2 Grenzzustand der Tragfähigkeit (GZT)

5.4.2.1 STR: Betondruckversagen

Die Betondruckspannung wird zunächst charakteristisch bestimmt und anschließend gemäß Gleichung (5) mit dem integralen Teilsicherheitsbeiwert faktorisiert.

Nachweis:

$$\gamma_{E,sup} \cdot \sigma_{ck} \leq f_{cd} \quad (5)$$

Analog zum BAWMerkblatt TbW (2016) darf bei klaffender Fuge in den betrachteten Querschnitten die dreieckförmige Druckspannungsverteilung in einen rechteckförmigen Spannungsblock ($\sigma_{ck} = 3/4 \cdot \sigma_{ck,max}$) umgerechnet werden.

5.4.2.2 STR: Gleiten in der Arbeitsfuge (Schubkraftübertragung in Fugen)

Die Schubkrafttragfähigkeit in der Druckzone hängt von der mittleren Normalspannung $\sigma_{n,k}$ (Effekt) ab. Die integralen Teilsicherheitsbeiwerte γ_E sind je nach Wirkungsweise der Effekte differenziert auf die mittlere

Normalspannung $\sigma_{n,k}$ gemäß Gleichung (7) und auf die charakteristische Scherspannung in der Fuge gemäß Gleichung (8) anzusetzen.

Scherspannung in der Fuge:

$$v_{Eki,E} = \frac{\sum V_k}{A_{cc,k}} \quad (6)$$

Widerstand in Anlehnung an EC2, Abschnitt 6.2.5:

$$v_{Rdi,E} = c \cdot f_{ctd} + \mu \cdot \sigma_{n,k} \cdot \gamma_{E,inf} \leq 0,5 \cdot v \cdot f_{cd} \quad (7)$$

Nachweis:

$$\gamma_{E,sup} \cdot v_{Eki,E} \leq v_{Rdi,E} \quad (8)$$

5.4.2.3 STR: Querkraft (Schubversagen)

Gemäß BAWMerkblatt TbW (2016) kann der Nachweischnitt bei Gewichtsstützwänden i. d. R. im Abstand $h/2$ von den direkten Auflagerbereichen, d. h. oberhalb des Bemessungsschnittes für den Druck- bzw. Gleitnachweis, geführt werden. Bei ausreichender Tragfähigkeitsreserve ist der Nachweis der Querkraft vereinfachend im gleichen Nachweischnitt möglich.

Bei der Bestimmung des Bemessungswertes der Betonfestigkeit unter Querkraft und Druck $f_{cvd,E}$ geht nach den Gleichungen (12) und (13) die vorhandene Betondruckspannung $\sigma_{cp,E}$ (Effekt) ein. Die Betondruckspannung wird mit der charakteristischen Normalkraft unter Berücksichtigung des inneren Wasserdrucks nach BAWMerkblatt TbW (2016) ermittelt und gemäß Gleichung (10) mit dem Teilsicherheitsbeiwert $\gamma_{E,inf}$ beaufschlagt. Die charakteristische Schubspannung wird gemäß Gleichung (9) bestimmt und nach Gleichung (14) mit dem Teilsicherheitsbeiwert $\gamma_{E,sup}$ erhöht.

Berechnung der Schubspannung nach EC2, Abschnitt 12.6.3.

Für Rechteckquerschnitte gilt:

$$\tau_{cp,k} = 1,5 \cdot \frac{V_{Ek}}{A_{cc,k}} \quad (9)$$

Widerstand in Anlehnung an EC2, Abschnitt 12.6.3:

$$\sigma_{cp,E} = \gamma_{E,inf} \cdot \frac{N_{wk}}{A_{cc,k}} \quad (10)$$

$$\sigma_{c,lim} = f_{cd,pl} - 2 \cdot \sqrt{f_{ctd,pl} \cdot (f_{ctd,pl} + f_{cd,pl})} \quad (11)$$

Wenn $\sigma_{cp,E} \leq \sigma_{c,lim}$:

$$f_{cvd,E} = \sqrt{f_{ctd,pl}^2 + \sigma_{cp,E} \cdot f_{ctd,pl}} \quad (12)$$

Wenn $\sigma_{cp,E} > \sigma_{c,lim}$:

$$f_{cvd,E} = \sqrt{f_{ctd,pl}^2 + \sigma_{cp,E} \cdot f_{ctd,pl} - \left(\frac{\sigma_{cp,E} - \sigma_{c,lim}}{2}\right)^2} \quad (13)$$

Nachweis:

$$\gamma_{E,sup} \cdot \tau_{cp,k} \leq f_{cvd,E} \quad (14)$$

Das in diesem Kapitel vorgestellte und in Bild 3 (Seite 8) visualisierte Gefahrenkonzept zur Bewertung der Ergebnisse von Nachrechnungen nach BAWMerkblatt TbW (2016) ermöglicht in Verbindung mit den Empfehlungen dieses BAWBriefs die Kategorisierung der Gefährdung und eine objektive Priorisierung der erforderlichen Maßnahmen. Die drei Stufen des Gefahrenkonzepts werden nachfolgend erläutert.

Bei statischen Nachrechnungen sind bekannte tragwerksrelevante Schäden zu berücksichtigen. Nachweise für untergeordnete Bauteile oder Einbauteile sowie deren Befestigung, die keine Relevanz für die Tragfähigkeit des Haupttragwerks oder sicherheitsrelevante Funktionen im Revisionszustand haben, können zur Einschätzung der Gefahrenstufe entfallen.

5.4.3 Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit (GZG) – Begrenzung der Fugenklaffung

Die Begrenzung der Fugenklaffung ist in der **häufigen** Einwirkungskombination nachzuweisen. Dabei ist die Klaffung k gemäß Gleichung (15) auf maximal 80 % der Querschnittshöhe h zu begrenzen. Die Begrenzung der Fugenklaffung im GZG dient auf Querschnittsebene als Nachweis für eine ausreichende Duktilität des Systems bzw. für eine Mindestdruckzonengröße. Es dürfen adäquate Kombinationsbeiwerte festgelegt werden. Falls keine genaueren Werte vorhanden sind, sind die Kombinationsbeiwerte nach DIN 19702 zu wählen.

Nachweis:

$$k \leq 0,8 \cdot h \quad (15)$$

6 Bewertung rechnerischer Defizite der Tragfähigkeit

Mit dem Gefahrenkonzept werden rechnerische Defizite aus der Nachrechnung nach Gefahrenstufen bewertet. Die Gefahrenstufen legen die Bewertungskriterien sowie den daraus resultierenden sicherheitsbezogenen Handlungsbedarf fest. Bewertungsmaßstab der Defizite ist der Auslastungsgrad ALG , der sich als Quotient aus vorhandener und aufnehmbarer Beanspruchung ergibt.

6.1 Gefahrenstufe „Keine Gefahr“

Kann ein regelwerkskonformer Nachweis mit den regelwerksspezifischen Sicherheitsbeiwerten geführt werden, gilt das Bauwerk als ausreichend tragfähig und kann ohne Einschränkungen betrieben werden. Durch übliche Unterhaltungsmaßnahmen ist sicherzustellen, dass dieser Zustand erhalten bleibt und keine tragfähigkeitsrelevanten Schäden durch mangelnde Dauerhaftigkeit entstehen.

6.2 Gefahrenstufe „Abstrakte Gefahr“

Von einer „abstrakten Gefahr“ ist auszugehen, wenn die regelwerkskonforme Nachweisführung (i. d. R. das BAWMerkblatt TbW (2016) und die hier vorgestellten Ergänzungen) mit allen darin enthaltenen Einwirkungen und Sicherheitsbeiwerten – also Nachweis mit Designwerten – nicht erbracht werden kann und somit zu einem Design-Auslastungsgrad $ALG_d > 1,0$ führt. Da eine Statik einen Prognosecharakter über die geplante Nutzungsdauer hat, bedeutet dies, dass das angestrebte Sicherheitsniveau für die nach Regelwerk angedachte Nutzungsdauer nicht erreicht wird. Das Bauwerk kann jedoch noch für einen kurz- bis mittelfristigen Zeitraum, der für die Herstellung eines regelwerkskonformen Zustands zu nutzen ist, betrieben werden. Dafür sind weitere statische Bewertungen erforderlich, die den Handlungsbedarf näher bestimmen. Je nach Art und Umfang der identifizierten

	Randbedingungen	Bewertungskriterien und Folgerungen		Maßnahmen
Akute Gefahr Abstrakte Gefahr Keine Gefahr	<i>E</i> und <i>R</i> charakteristisch - Kein Ansatz von Verkehrslasten, Eislasten und lokalen Lasten - Belastender Erddruck nur als aktiver Erddruck $\gamma = 1,0$	$ALG_k > 1,0$	- Tragfähigkeit nicht gegeben - Sofortige gutachterliche Bewertung erforderlich - Rücksprache mit der BAW	- Entscheidung über die unverzügliche Außerbetriebnahme - Priorisierung nicht möglich - Einleitung sofortiger Sicherungsmaßnahmen (z. B. Flutung, Auflasten, Entlastungen)
	<i>E</i> und <i>R</i> mit Teilsicherheits - beiwerten Berücksichtigung regelwerks - konformer Einwirkungen γ gemäß TbW (2016)/ BAWBrief (2026)	$ALG_k < 1,0$ $ALG_d > 1,0$	- Eingeschränkte Tragfähigkeit - Über weiterführende statische Untersuchungen und Bewertungen zu bestimmender Handlungsbedarf - Einleitung begleitender Maßnahmen (z. B. intensivierte Bauwerks - inspektion, Monitoring, Entlastungsmaßnahmen)	- Kurz- bis mittelfristiger Nutzungszeitraum zur Herstellung eines regelwerkskonformen Zustands möglich - Priorisierung der weiterführenden statischen Bewertung aufgrund der identifizierten Defizite (Vorankündigung, Robustheit) und möglichen Versagensfolgen
		$ALG_d \leq 1,0$	- Das Bauwerk ist ausreichend tragfähig - Der Betrieb ist ohne Einschränkungen möglich	- Durch übliche Unterhaltungsmaßnahmen ist sicherzustellen, dass der Bauwerks - zustand erhalten bleibt und sich durch mangelnde Dauerhaftigkeit keine tragfähigkeitsrelevanten Schäden entwickeln. - Priorisierung nicht erforderlich.

Dabei ist
E Einwirkung;
R Widerstand.

Bild 3: Abstufung von Gefahren und sicherheitsbezogener Handlungsbedarf bei bestehenden massiven Wasserbauwerken

Defizite sollte mittels gutachterlicher Bewertung geprüft werden, ob verstärkte Überwachungsmaßnahmen oder betriebliche Entlastungen notwendig sind.

Mehrere Bauwerke, die in den Bereich der „abstrakten Gefahr“ einzuordnen sind, können in Bezug auf ihren Handlungsbedarf priorisiert werden. Kriterien hier-

für können beispielsweise eine Bewertung der identifizierten Defizite im Hinblick auf die Gegebenheiten einer Versagensankündigung bzw. die Robustheit des Tragwerks und die möglichen Versagensfolgen (Gefährdungspotenzial) oder die Nachweisbarkeit mit reduzierten Sicherheiten (beispielsweise nur auf der Widerstandsseite) sein.

6.3 Gefahrenstufe „Akute Gefahr“

Von einer „akuten Gefahr“ ist auszugehen, wenn eine Nachweisführung nach dem Bezugs-Regelwerk (i. d. R. das BAWMerkblatt TbW (2016) und die hier vorgestellten Ergänzungen) mit charakteristischen Werten auf der Einwirkungs- und Widerstandsseite sowie unter Vernachlässigung vermeidbarer veränderlicher Einwirkungen (Eislast, Verkehrslasten, lokale Lasten wie beispielsweise Trossenzug oder Schiffsanlegestoß) und bei einem Ansatz eines rein aktiven, belastenden Erddrucks nicht möglich ist, was dann zu einem charakteristischen Auslastungsgrad ALG_k höher als 1,0 führt.

Bei Bekanntwerden einer akuten Gefahr besteht sofortiger Handlungsbedarf, um Gefahren für Leib und Leben bzw. für Sachgüter und die Umwelt abzuwehren. Es muss unverzüglich dafür Sorge getragen werden, dass die nicht nachweisbare Bemessungssituation nicht eintritt und eine entsprechende Gefährdung abgewendet wird. Dies kann beispielsweise durch eine Außerbetriebnahme oder gegebenenfalls die Überwachung von Wasserständen geschehen. Die festgestellten Defizite müssen baulich behoben werden. Dauerhafte Überwachungsmaßnahmen (Bauwerksmonitoring) sind bei Vorliegen von akuter Gefahr für die Kompensation rechnerischer Defizite nicht zulässig.

7 Zusammenfassung und Empfehlung

Die Bewertung der Tragfähigkeit bestehender massiver Wasserbauwerke gemäß BAWMerkblatt TbW (2016) und den hier vorgestellten Ergänzungen ermöglicht eine verbesserte Nutzung der rechnerischen Tragreserven durch die wasserbaugerechte Anpassung der Bemessungsgrößen. Das Sicherheitskonzept der Effekt-Faktorisierung berücksichtigt die spezifischen Tragwerksbedingungen unbewehrter Querschnitte des massiven Wasserbaus.

Die vorgestellten Ansätze führen zu den folgenden Empfehlungen. Diese gelten allgemein für den Anwendungsbereich des BAWMerkblatts TbW (2016). Das Sicherheitskonzept der Effekt-Faktorisierung gilt jedoch ausschließlich für unbewehrte Querschnitte.

- **Wasserdruck:**
Bei Beanspruchungen durch Oberflächenwasser und Grundwasser können die Teilsicherheitsbeiwerte ständiger Einwirkungen angesetzt werden. Für jede Bemessungssituation sind die maßgebenden Wasserstände zu berücksichtigen.
- **Reibungsbeiwert:**
Für den Reibungsbeiwert kann ein Bemessungswert von $\mu = 1,0$ angesetzt werden, sofern keine genaueren Untersuchungsergebnisse vorliegen.
- **Sicherheitskonzept Effekt-Faktorisierung für **unbewehrte** Querschnitte:**
Das Sicherheitskonzept für unbewehrte Querschnitte massiver Wasserbauwerke ermöglicht durch die Anwendung der Teilsicherheitsbeiwerte auf die Effekte der Einwirkungen (Auswirkungen) eine tragwerksgerechte Bemessung.
- **Gefahrenkonzept:**
Mit dem Gefahrenkonzept werden rechnerische Defizite aus der Nachrechnung nach Gefahrenstufen bewertet. Die Gefahrenstufen legen die Bewertungskriterien sowie den daraus resultierenden sicherheitsbezogenen Handlungsbedarf fest.

Die aufgelisteten Empfehlungen sind bauaufsichtlich abgestimmt und sind im Bereich der Bundeswasserstraßen anzuwenden. Die bestehenden Regelungen des BAWMerkblatts TbW (2016) bleiben weiterhin gleichwertig anerkannt.

Die hier vorgestellten Inhalte bilden die Grundlage für die derzeitige Überarbeitung des BAWMerkblatts TbW (2016). Neben der Einbindung neuer Forschungsergebnisse wird diese Überarbeitung auch die weitere Konkretisierung tragwerksgerechter Bemessungsparameter, die Modifikation des Sicherheitskonzepts sowie eine konzeptionelle Anpassung in der Nachweisführung enthalten.

8 Literaturverzeichnis

8.1 Normen und Regelwerke

EC0	DIN EN 1990:2021-10: Eurocode 0: Grundlagen der Tragwerksplanung. Berlin: Beuth Verlag GmbH.
EC0/NA	DIN EN 1990-1/NA: 2010-12: Nationaler Anhang – National festgelegte Parameter – Eurocode: Grundlagen der Tragwerksplanung. Berlin: Beuth Verlag GmbH.
EC2	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. Berlin: Beuth Verlag GmbH.
EC2/NA	DIN EN 1992-1-1/NA: Nationaler Anhang – National festgelegte Parameter – Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken – Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau. Berlin: Beuth Verlag GmbH.
EC7	DIN EN 1997-1:2009-09: Eurocode 7: Entwurf, Berechnung und Bemessung in der Geotechnik – Teil 1: Allgemeine Regeln. Berlin: Beuth Verlag GmbH.
EC7/NA	DIN EN 1997-1/NA:2010-12: Nationaler Anhang – National festgelegte Parameter – Eurocode 7: Entwurf, Berechnung und Bemessung in der Geotechnik – Teil 1: Allgemeine Regeln.
DIN 1054	DIN 1054:2021-04: Baugrund – Sicherheitsnachweise im Erd- und Grundbau – Ergänzende Regelungen zu DIN EN 1997-1. Berlin: Beuth Verlag GmbH.
DIN 19702	DIN 19702:2013-02: Massivbauwerke im Wasserbau – Tragfähigkeit, Gebrauchstauglichkeit und Dauerhaftigkeit. Berlin: Beuth Verlag GmbH.

TbW (2016) Bundesanstalt für Wasserbau (Hg.) (2016): BAWMerkblatt Bewertung der Tragfähigkeit bestehender, massiver Wasserbauwerke

8.2 Literatur

BAW (Hg.) (2019): Scherfestigkeit von Beton und Mauerwerk an bestehenden Wasserbauwerken. FuE-Abschlussbericht B3951.03.04.70014. Karlsruhe: Bundesanstalt für Wasserbau.

<https://hdl.handle.net/20.500.11970/107389>

Fleischer, Helmut; Schlegel, Roger; Eckardt, Stefan (2020): Standsicherheitsberechnungen an bestehenden Gewichtsstützwänden. In: Bautechnik 97 (6). S. 387–394.

<https://hdl.handle.net/20.500.11970/110802>

Malárics-Pfaff, Viktória; Höffgen, Jan P.; Stephan, Christoph (2022): Schertragverhalten in Arbeitsfugen: Stand der BAW-Forschung und erste Anwendungsbeispiele. In: Bautechnik 99 (5). S. 350–357.

<https://hdl.handle.net/20.500.11970/112807>

Stephan, Christoph; Kotan, Engin (2024): Zwischen Bestandserhaltung und Sicherheitsanforderungen – Herausforderungen bei der Tragfähigkeitsbewertung bestehender Wasserbauwerke. In: Bundesanstalt für Wasserbau (Hg.): Erhaltung gestalten. Karlsruhe: Bundesanstalt für Wasserbau. S. 52–58.

<https://hdl.handle.net/20.500.11970/114215>

Babje Rothe
Dr. Christoph Stephan
Bundesanstalt für Wasserbau
Abteilung Bautechnik
Referat Massivbau (B1)
Telefon: 040 81908-495
E-Mail: babje.rothe@baw.de

Anlage 1:

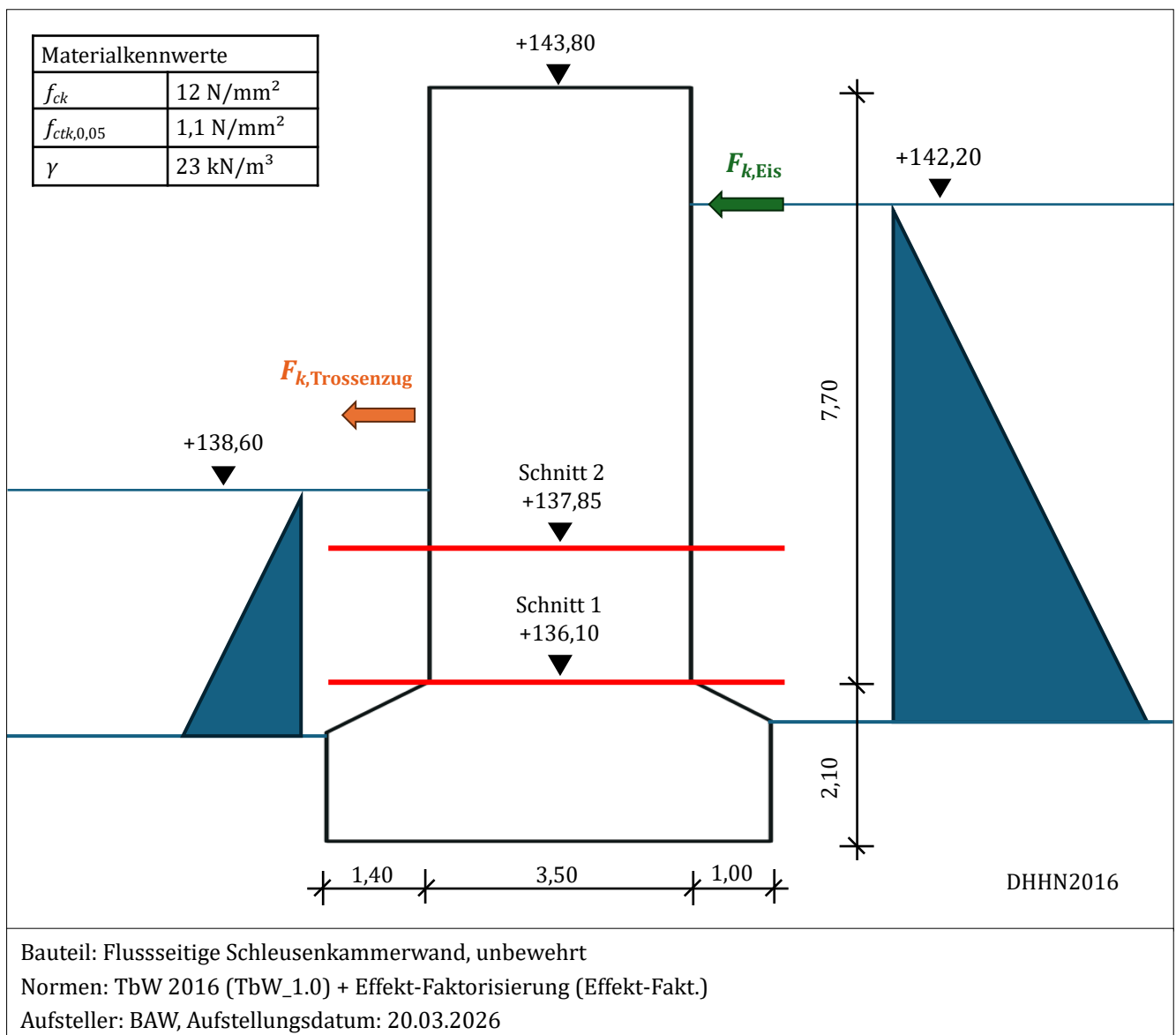
Beispiel: Gegenüberstellung der Nachrechnung nach TbW (2016) und der Effekt-Faktorisierung einer flussseitigen Schleusenammerwand

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Nachrechnung einer flussseitigen Schleusenammerwand nach TbW (2016) und der Effekt-Faktorisierung (Effekt-Fakt.) gemäß der Vorstellung des BAWBriefs gegenübergestellt.

Die flussseitige Schleusenammerwand mit für Wasserbauwerke typischen Querschnittsabmessungen ist als unbewehrte Konstruktion mit geringer Betondruck-

festigkeit ausgeführt. Die Kammerwand wird beidseitig durch Wasserdruck beansprucht, der aus den unterschiedlichen Wasserständen des Fließgewässers und dem Wasserstand innerhalb der Schleusenammer resultiert. Weitere Einwirkungen wie Eisdruck und Trossenzug werden in den jeweiligen Einwirkungskombinationen berücksichtigt. Beide Einwirkungen werden betriebsbedingt nicht kombiniert. Der Kombinationsbeiwert wird auf der sicheren Seite liegend zu $\psi_1 = 1,0$ gesetzt.

Das Beispiel zeigt, dass die Anwendung der Effekt-Faktorisierung aufgrund ihres tragwerksgerechteren Ansatzes der Einwirkung das Erfüllen der Nachweise erheblich begünstigt. Dieser Ansatz verbessert die Bestimmung des Gleichgewichtszustandes zur Schnittgrößenermittlung.



Nr.	Schnitt/ Bereich/ Punkt	BS/EK	GZ	Nachweisart	ALG (η_{ALG})	Bemerkungen/Abweichungen/ Besonderheiten	LF- Nr.
1	1	BS-P	STR	Betondruckversagen	0,05	TbW _1.0	1
2					0,05	Effekt-Fakt.	1
3	1	BS-P	STR	Gleiten in AF	0,47	TbW _1.0	1
4					0,43	Effekt-Fakt.	1
5	2	BS-P	STR	Schubversagen	0,08	TbW _1.0	1
6					0,08	Effekt-Fakt.	1
7	1	BS-P	STR	Betondruckversagen	>1	TbW _1.0 – einseitiger Eisdruck	2
8					0,19	Effekt-Fakt. – einseitiger Eisdruck	2
9	1	BS-P	STR	Gleiten in AF	>1	TbW _1.0 – einseitiger Eisdruck	2
10					0,52	Effekt-Fakt. – einseitiger Eisdruck	2
11	2	BS-P	STR	Schubversagen	>1	TbW _1.0 – einseitiger Eisdruck	2
12					0,21	Effekt-Fakt. _2.0 – einseitiger Eisdruck	2
13	1	BS-P	STR	Betondruckversagen	0,14	TbW _1.0 – Trossenzug	3
14					0,06	Effekt-Fakt. _2.0 – Trossenzug	3
15	1	BS-P	STR	Gleiten in AF	0,62	TbW _1.0 – Trossenzug	3
16					0,49	Effekt-Fakt. – Trossenzug	3
17	2	BS-P	STR	Schubversagen	0,15	TbW _1.0 – Trossenzug	3
18					0,12	Effekt-Fakt. – Trossenzug	3
19	1	quasi- ständige	GZG	Fugenklaffung	0,44	TbW _1.0	4
20		häufige			0,99	Effekt-Fakt. – einseitiger Eisdruck	5
21		häufige			0,43	Effekt-Fakt. – Trossenzug	6
...							

Legende der wichtigsten Abkürzungen

BS Bemessungssituation (BS-P (ständig);
BS-T (vorübergehend); BS-A (außergewöhnlich);
BS-E (Erdbeben); ...)

EK Einwirkungskombination (Grundkombination;
ständige EK; häufige EK; quasi-ständige EK)

GZ Grenzzustände (EQU; STR; GEO-2; GEO-3; UPL;
HYD; FAT, GZG)

GZT Grenzzustand der Tragfähigkeit (EQU; STR;
GEO-2; GEO-3; UPL; HYD; FAT)

GZG Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit

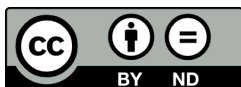
ALG Auslastungsgrad

LF Lastfall (Definition nach DIN EN 1990:2010-12
1.5.2.11)

BAW-Brief 01/2026

Impressum

Herausgeber (im Eigenverlag):
Bundesanstalt für Wasserbau (BAW)
Kußmaulstraße 17, 76187 Karlsruhe
Telefon: +49 721 9726-0
E-Mail: info@baw.de
www.baw.de



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

Soweit nicht anders gekennzeichnet, stehen die Inhalte der Beiträge unter der Creative Commons Lizenz BY-ND 4.0 (Namensnennung – Keine Bearbeitungen 4.0 International). Bei anderweitiger Kennzeichnung unterliegen die entsprechenden Inhalte dem urheberrechtlichen Schutz und dürfen nicht weiterverwendet werden.

ISSN 2196-5900

Karlsruhe · August 2026