

# HENRY

Hydraulic Engineering Repository

Ein Service der Bundesanstalt für Wasserbau

---

Conference Paper, Published Version

**Lutz, Matthias; Kiesel, Annika**

## **Besonderheiten bei der Nachrechnung bestehender Wehranlagen**

---

Verfügbar unter/Available at: <https://hdl.handle.net/20.500.11970/105304>

Vorgeschlagene Zitierweise/Suggested citation:

Lutz, Matthias; Kiesel, Annika (2018): Besonderheiten bei der Nachrechnung bestehender Wehranlagen. In: Bundesanstalt für Wasserbau (Hg.): Entwicklungen und Fortschritte im Brücken- und massiven Verkehrswasserbau. Karlsruhe: Bundesanstalt für Wasserbau. S. 101-108.

### **Standardnutzungsbedingungen/Terms of Use:**

Die Dokumente in HENRY stehen unter der Creative Commons Lizenz CC BY 4.0, sofern keine abweichenden Nutzungsbedingungen getroffen wurden. Damit ist sowohl die kommerzielle Nutzung als auch das Teilen, die Weiterbearbeitung und Speicherung erlaubt. Das Verwenden und das Bearbeiten stehen unter der Bedingung der Namensnennung. Im Einzelfall kann eine restriktivere Lizenz gelten; dann gelten abweichend von den obigen Nutzungsbedingungen die in der dort genannten Lizenz gewährten Nutzungsrechte.

Documents in HENRY are made available under the Creative Commons License CC BY 4.0, if no other license is applicable. Under CC BY 4.0 commercial use and sharing, remixing, transforming, and building upon the material of the work is permitted. In some cases a different, more restrictive license may apply; if applicable the terms of the restrictive license will be binding.



## Besonderheiten bei der Nachrechnung bestehender Wehranlagen

Dipl.-Ing. Matthias Lutz (BAW)

Annika Kiesel M.Sc. (BAW)

### Einleitung

Die Stauregelung an den Bundeswasserstraßen erfolgt durch über 300 feste und bewegliche Wehranlagen. Sie gewährleisten die Schiffbarkeit des Gewässers und dienen der Abführung von Hochwasser. Die Anlagen weisen eine große Vielfalt auf, was die Anzahl der Wehrfelder, ihre Stauhöhe und die Art und Ausbildung der Verschlüsse betrifft. Von festen Wehren über kleine Schlauchwehre mit Stauhöhen von wenigen Metern bis hin zu großen, mehrfeldrigen Anlagen mit Stauhöhen von 6-9 m sind die unterschiedlichsten Bauwerke vertreten (Bild 1).

Der Beitrag konzentriert sich auf den Massivbau von beweglichen Wehranlagen.

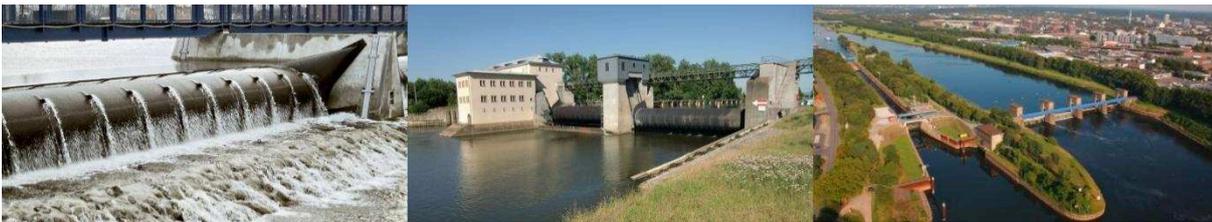


Bild 1: Überblick über verschiedene Arten von Wehranlagen: Schlauchwehr Marklendorf, Wehr Viereth, Ruhrwehr Duisburg (von links)[Quelle: BAWBildarchiv]

### Einwirkungen auf Wehrpfeiler

Gemäß DIN EN 1990 (Abschnitt 3.2 „Bemessungssituationen“) sind die Grenzzustände der Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit für verschiedene Bemessungssituationen nachzuweisen, wobei jeweils die *maßgebende* Bemessungssituation zu bestimmen ist [DIN EN 1990: 2010-12].

Obwohl Wehrpfeiler zunächst in ihrer häufig äußerst massiven Ausbildung recht unspektakulär wirken, sind sie komplexen Einwirkungskombinationen ausgesetzt, sodass die Bestimmung maßgebender Bemessungssituationen nicht trivial ist.

Einige Einwirkungen haben mehrere Richtungskomponenten, weshalb nicht direkt ersichtlich ist, ob sie für einen Nachweis einen günstigen oder ungünstigen Einfluss haben. Liegen in beiden Wehrfeldern unterschiedliche Verschlüsse und/oder verschiedene Verschlussstellungen vor, führt dies zu unsymmetrischen Belastungssituationen, sodass unterschiedliche Kombinationen verglichen werden müssen. Weitere unsymmetrische Lastsituationen können bei Trockenlegung eines Wehrfeldes oder bei nur in einem Wehrfeld vorhandenen Eislasten auftreten.

## Ansatz von Riss- und Porenwasserdruck

Eine Einwirkung, die in der Vergangenheit häufig vernachlässigt wurde, ist der Riss- und Porenwasserdruck. Gemäß DIN 19702 ist bei massiven Bauteilen, die von Wasser berührt werden, mit Risswasserdruck in offenen Fugen oder Rissen sowie Porenwasserdruck im ungeschädigten Betonkörper zu rechnen (Bild 2). Die Beanspruchung durch inneren Wasserdruck führt zu einer Vergrößerung der klaffenden Fuge bei unbewehrten Bauteilen bzw. zu einer Vergrößerung der Zugzone bei Stahlbetonbauteilen. Sie sind zu den Beanspruchungen aus äußeren Lasten zu addieren, wobei in der klaffenden Fuge von Mauerwerks- oder unbewehrten Betonbauteilen der volle hydrostatische Wasserdruck anzusetzen ist [DIN 19702: 2013-02].

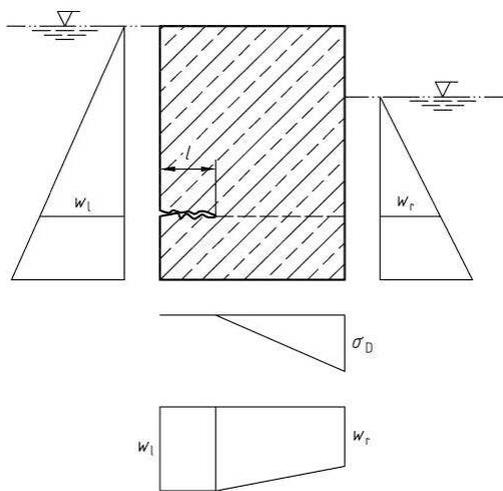


Bild 2: Ansatz von innerem Wasserdruck gemäß DIN 19702

Die in DIN 19702 und ergänzend im **BAW** Merkblatt „Bewertung der Tragfähigkeit bestehender, massiver Wasserbauwerke (TbW)“ (BAW 2016) zur Verfügung stehenden Rechenansätze eignen sich für die Anwendung auf Querschnitte unter Druck und einachsiger Biegung. Bei Wehrpfeilern liegen jedoch häufig Lastsituationen vor, die zu Druck und zweiachsiger Biegung führen, weshalb weiterführende Überlegungen zur Ermittlung der klaffenden Fuge sowie der auftretenden Wasserdruckverteilung notwendig werden. Die Tiefe der klaffenden Fuge ist iterativ in Abhängigkeit der im Oberwasser und Unterwasser anstehenden Wasserdrücke zu ermitteln. Für einfache Berechnungen können auf der sicheren Seite liegende Annahmen getroffen werden, wie beispielsweise ein Klaffen bis zu einer fiktiven Dichtungslinie, die auf Höhe des Verschlusses verläuft. Es ist jedoch zu berücksichtigen, dass je nach Nachweis der Wasserdruck auf der Unterwasserseite günstig oder ungünstig wirken kann. Zudem ist für den Nachweis der Sohlpressungen eine Überschätzung der Fugenklaffung ggf. zu ungünstig.

Eine Möglichkeit, den inneren Wasserdruck rechnergestützt anzusetzen, wird am Beispiel des Ruhrwehrs Duisburg für den Lastfall Revision erläutert.

Das Ruhrwehr regelt den Wasserspiegel der Haltung Duisburg bis zur Staustufe Raffelberg und dient der Abführung des Ruhrhochwassers in den Rhein. Mit dem Bau des Ruhrwehrs wurde 1942 begonnen. Aufgrund kriegsbedingter Unterbrechungen konnte die Anlage erst 1956 fertiggestellt werden. Die Anlage besitzt vier Wehrröffnungen mit einer lichten Weite von jeweils 30,00 m. Die Konstruktion wurde innerhalb von Spundwandkästen flach gegründet.

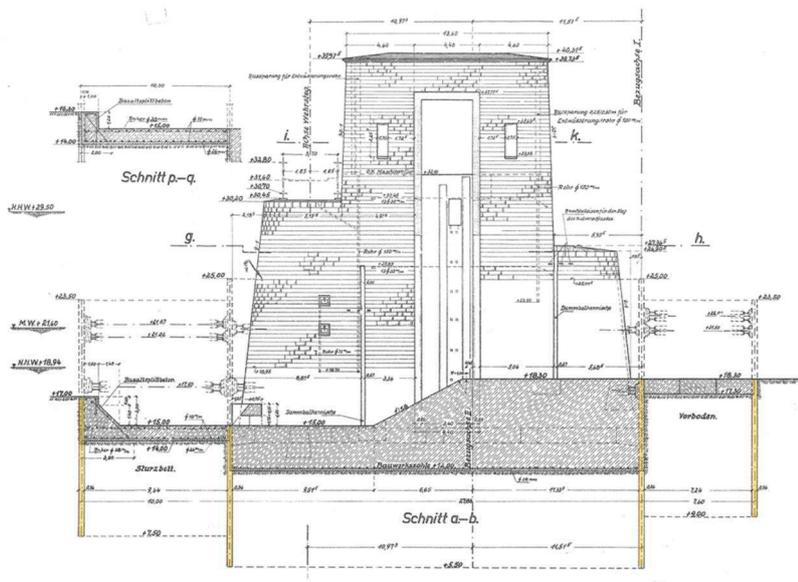


Bild 3: Darstellung des Strompfeilers mit Maschinenhaus, Wehrsteg und Lage der Spundwände

Als Verschlussystem kommt in allen Wehrfeldern ein Doppelhakenschütz mit Trapezkasten als Unterschütz und hakenförmigem Oberschütz zum Einsatz.

Es wurde ein zweistufiges Vorgehen entwickelt, bei dem zunächst die Normalspannungsverteilung im zu untersuchenden Querschnitt infolge der äußeren Einwirkungen ermittelt wird (Stephan, 2016). In Abhängigkeit dieser Verteilung wird der innere Wasserdruck aufaddiert. In einem zweiten Schritt, der an dieser Stelle nicht weiter erläutert wird, kann die Scherspannungsverteilung in Abhängigkeit der Normalspannungen sowie der Querkräfte  $V_y$  und  $V_z$  und des Torsionsmoments  $M_T$  ermittelt werden. Auf diese Weise wird ein rechnergestützter Nachweis gegen Gleiten in der Arbeits- bzw. Gründungsfuge möglich.

Die Ermittlung der Normalspannungsverteilung basiert auf der Annahme eines starren Querschnitts sowie der Variation der Dehnungsebene gemäß [Killing, 2014] und [Busjaeger et. al., 1990]. Die Normalkraft  $N$  entspricht dem Integral der Normalspannungen über die Querschnittsfläche. Entsprechend sind die Biegemomente  $M_y$  und  $M_z$  wie folgt definiert:

- $N = \int \sigma(y, z) \, dA$
- $M_y = \int \sigma(y, z) \cdot z \, dA$
- $M_z = - \int \sigma(y, z) \cdot y \, dA$

Über ein beliebiges, nichtlineares Materialgesetz ist die Normalspannungsverteilung  $\sigma(y,z)$  mit einer zugehörigen Dehnungsverteilung  $\varepsilon(y,z)$  verknüpft. Die Dehnung kann bei Annahme ebenbleibender Querschnitte für jede Querschnittsstelle durch die drei Parameter Längsdehnung  $\varepsilon_0$ , Verkrümmung um die y-Achse  $\kappa_y$  und Verkrümmung um die z-Achse  $\kappa_z$  beschrieben werden. Diese definieren die sogenannte Dehnungsebene.

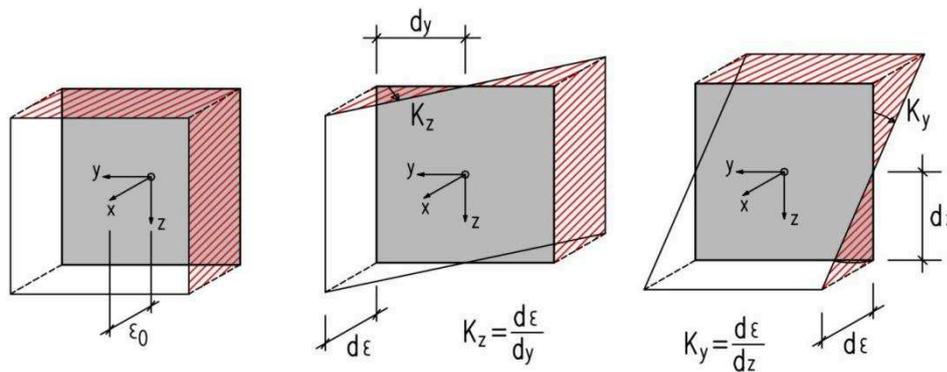


Bild 4: Komponenten der Dehnungsebene [Killing, 2014]

Die Berechnung erfolgt iterativ im Programmsystem MatLab in einem von [Stephan, 2016] geschriebenen Modul. Die Dehnungsebene wird iterativ so lange variiert, bis die resultierenden Schnittgrößen den zuvor vorgegebenen entsprechen. Die Berechnung erfolgt diskret in einem Dreiecksnetz mittels Newton-Verfahren. Für das Ruhrwehr Duisburg ergibt sich für die vorübergehende Bemessungssituation (Revision) zunächst die in Bild 5 dargestellte Normalspannungsverteilung.

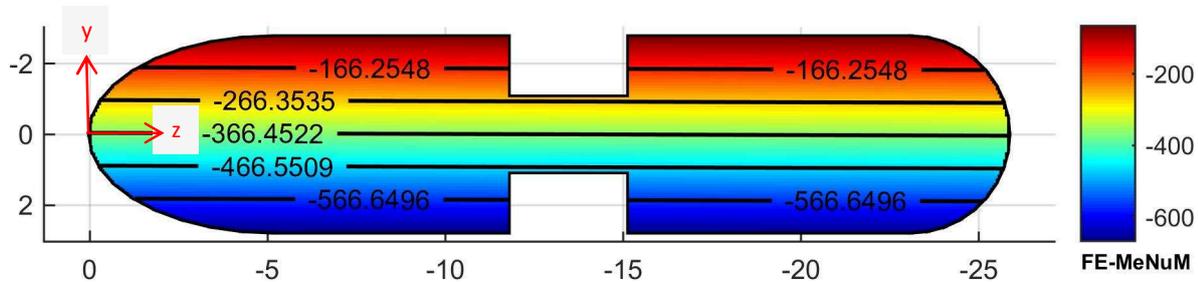


Bild 5: Normalspannungsverteilung im Querschnitt aus äußeren Lasten [kN/m<sup>2</sup>]

Aus der Verteilung des inneren Wasserdrucks  $\sigma_w^*(y,z)$  ergeben sich zusätzliche Schnittgrößen, die für die Nachweise zu den Schnittgrößen aus äußeren Lasten addiert werden müssen:

$$N_w = \int \sigma_w^*(y,z) dA$$

$$M_{y,w} = \int \sigma_w^*(y,z) \cdot z dA$$

$$M_{z,w} = -\int \sigma_w^*(y,z) \cdot y dA$$

Bei der Querschnittseingabe werden Stützstellen an den Querschnittsrändern definiert, für die der anstehende Wasserdruck vorgegeben wird. Entsprechend der Vorgaben in DIN 19702 wird die Vertei-

lung des Wasserdrucks zwischen den Stützstellen linear über die Querschnittsfläche interpoliert. Diese Annahme entspricht einem ungerissenen Querschnitt.

Das im Beispiel verwendete nichtlineare Materialgesetz basiert auf einer linear-elastischen Spannungs-Dehnungsbeziehung im Druckbereich sowie einem vollständigen Zugausfall. In den gerissenen Bereichen wird unabhängig der auftretenden Rissweite der volle hydrostatische Wasserdruck angesetzt. Die auftretende Fugenklaffung wird dabei iterativ berechnet. Mit jedem Iterationsschritt wird unter Berücksichtigung aktueller Wasserdrücke die Verteilung des Wasserdrucks ermittelt (Bild 6). Die resultierende Normalspannungsverteilung unter Berücksichtigung inneren Wasserdrucks ist in Bild 7 dargestellt.

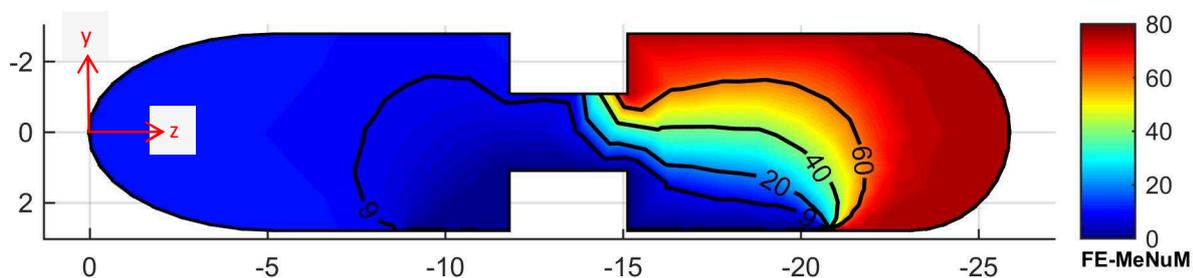


Bild 6: Verteilung des inneren Wasserdrucks im Querschnitt [kN/m<sup>2</sup>]

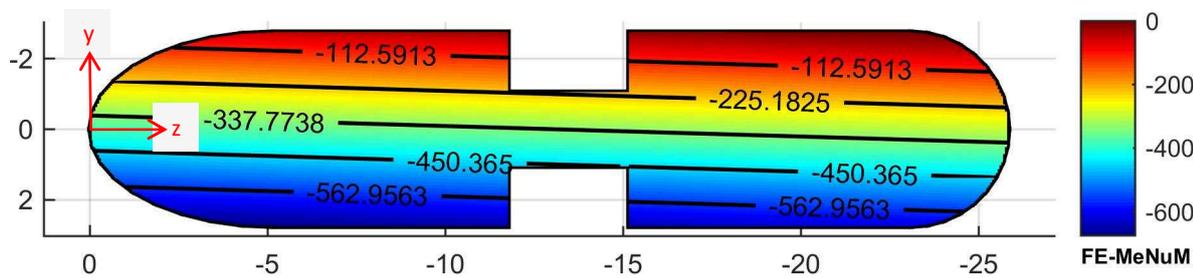


Bild 7: Normalspannungsverteilung im Querschnitt unter Berücksichtigung inneren Wasserdrucks [kN/m<sup>2</sup>]

### Ansatz von Eisdruck

Für die Nachrechnung bestehender Wasserbauwerke im Binnenbereich, die erfahrungsgemäß keiner exponierter Eisbelastung ausgesetzt sind, kann die Einwirkung aus Eisdruck nach TbW mit einer horizontalen Linienlast von 45 kN/m berücksichtigt werden, während die Verwendung der EAU im Allgemeinen höhere Werte liefert.

In der DIN 19702 von 1992 wurden die Angaben zu Eiseinwirkungen am Ende gar verbal abgeschwächt: „Nach Beobachtungen sowohl im Binnenland als auch im Küstenbereich sind Massivbauwerke des Wasserbaus durch Einwirkung von Eis bislang nicht nennenswert beschädigt worden.“



*Sektor bei Eisführung hochgefahren*

*Eis bei hohem Wasserstand*

*Bild 8: Eis am Wehr Geesthacht. Quelle: WSA Lauenburg*

Dagegen werden die Lastansätze gängiger Regelwerke zur Abschätzung der Eislasten am Wehr Geesthacht durch das mitunter massive Eisaufliegen den tatsächlich vorliegenden Verhältnissen nicht gerecht. Bedingt durch den Tideeinfluss im Unterwasser aber auch durch Eisaufliegen aus dem Oberwasser treten hier Eisverwerfungen mit Eis- bzw. Packeisdecken auf, die mit bis zu 2,50 m Packeisdicke weit über den Eingangswerten zur Berechnung von Eislasten nach gängigen Regelwerken liegen: In der EAU (2012) sowie der DIN 19704-1 wird im Küstenraum von Eisdicken bis etwa 0,8 m ausgegangen, während im Binnenbereich gewöhnlich 0,3 m angesetzt werden.

Da die Eisdicke neben der Eisfestigkeit der maßgebende Eingangsparameter für die Größe der Bemessungswerte ist, ergeben gebräuchliche Lastansätze unrealistisch hohe Kräfte, wenn die beobachteten Eisdicken blindlings in die gängigen Berechnungsformeln eingesetzt werden. Für die Ermittlung von Eislasten für den Massivbau des Wehrs Geesthacht wurde daher ein Ansatz zur Diskussion gestellt, der davon ausgeht, dass die Festigkeiten mächtiger Packeislagen geringer als die des Kerneises sind und die Bemessungskräfte damit nicht im selben Maß mit der Dicke ansteigen.

Bild 9 zeigt einen grafischen Vergleich der horizontalen Bemessungslasten, die sich unter Verwendung durchschnittlicher Eingangsparameter nach EAU (2012) unter Verwendung der Vorgaben für breite Bauwerke und den Angaben nach TbW und DIN 19704-1 abhängig von den Eisdicken ergeben.

Darüber hinaus kann es am Wehr Geesthacht bei starker Eisfracht abhängig von der Wasserführung zu Eisständen im Ober- oder Unterwasser kommen, wobei Eisbarrieren mit Querschnittseinschränkungen verbunden mit einem Anstieg des Oberwasserspiegels möglich sind.

Werden in diesem Fall größere Mengen von Eisschollen an den Pfeilern angestaut und bilden diese eine Barriere, ist die Übertragung von Kräften zu berücksichtigen, die über die Werte einer maximalen Eisdicke von 2,50 m hinausgehen.

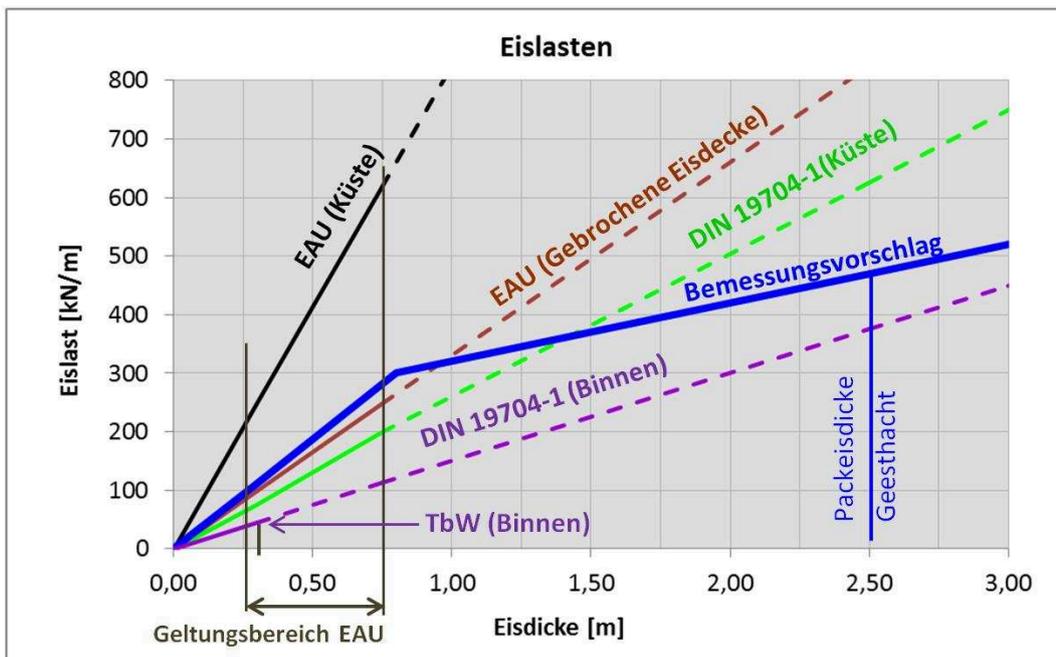


Bild 9: Unterschiedliche Eislastansätze abhängig von der Eisdicke als Linienlast dargestellt

Insgesamt stellt der Ansatz für den Massivbau im Bereich der Wehrsohle ausreichend Reserven bis über ein fiktives Versagen des Verschlusses hinaus sicher und berücksichtigt das im Gegensatz zu den Stahlwasserbaukonstruktionen weitgehend starre Bauteilverhalten.

## Literatur

- BAW (2016): **BAW**Merkblatt „Bewertung der Tragfähigkeit bestehender, massiver Wasserbauwerke (TbW)“, Ausgabe Juli 2016.
- Busjaeger, D. et al. (1990): Programmgesteuerte Berechnung beliebiger Massivbauquerschnitte unter zweiachsiger Biegung mit Längskraft (Programm MASQUE). [Buchverf.] Deutscher Ausschuss für Stahlbeton. Heft 415. Berlin: Beuth Verlag GmbH, 1990.
- DIN 19702: 2013-02: Massivbauwerke im Wasserbau – Tragfähigkeit, Gebrauchstauglichkeit und Dauerhaftigkeit. Normenausschuss Wasserwesen im DIN. Beuth Verlag, Berlin.
- DIN EN 1990: 2010-12: Eurocode: Grundlagen der Tragwerksplanung. Normenausschuss Bauwesen im DIN. Beuth Verlag, Berlin.
- Killing, L. (2014): Normalspannungsberechnung an allgemeinen Querschnitten unter Berücksichtigung beliebiger nichtlinearer Materialgesetze. Wuppertal : Masterarbeit, Bergische Universität Wuppertal, LuFG Baumechanik und Numerische Methoden, 2014.
- Stephan, C. (2016): Einfluss des Torsionsmoments auf die Scherspannungsverteilung, unveröffentlicht
- EAU (2012): Empfehlungen des Arbeitsausschusses „Ufereinfassungen“ Häfen und Wasserstraßen EAU 2012, Ernst & Sohn, 2012
- DIN 19704-1: 2014-11: Stahlwasserbauten –Teil 1: Berechnungsgrundlagen im DIN. Beuth Verlag, Berlin.
- Schuh, A. (2011): Eishochwasser an Oder und Elbe aus historischen und meteorologischen Gesichtspunkten und im Hinblick auf mögliche Gefährdungen. Dissertation.

Carstensen, D. (2007): Eis im Wasserbau – Theorie, Erscheinungen, Bemessungsgrößen, Wasserbauliche Mitteilungen, Heft 37, 2007

Lattermann, E. (2007): Wasserbau – Praxis mit Berechnungsbeispielen, 3.Auflage 2010. Bauwerk Verlag

Hager, M. (2001): Eisdruck. In: Grundbau-Taschenbuch Teil 1, 6. Auflage 2001. Ernst & Sohn