

BAWMerkblatt zur Bewertung der Tragfähigkeit bestehender Stahlwasserbauverschlüsse (Entwurf)

Dipl.-Ing. Martin Deutscher (BAW), Dipl.-Ing. Uwe Enders (BAW)

1 Einführung

Das Merkblatt zur Bewertung der Tragfähigkeit bestehender Stahlwasserbauverschlüsse im Bereich der Bundeswasserstraßen, das sich derzeit noch in einem BAW-internen Entwurfsstadium befindet, gilt als Ergänzung zu der eingeführten Normenreihe DIN EN 1993 (2010-12) und der Norm DIN 19704-1 (2014-11). Mit diesem Merkblatt sollen die Besonderheiten bei der statischen Bewertung von bestehenden Konstruktionen im Bereich des Stahlwasserbaus Berücksichtigung finden. Insbesondere sollen Vorgaben und Hinweise bezüglich der Lastannahmen, Werkstoffeigenschaften und Nachweisformate zu vergleichbaren Bewertungsmaßstäben führen. Weiter werden mit diesem Merkblatt die Anwendungen von Nachweisverfahren eröffnet, die über die Ansätze der DIN 19704-1 (2014-11) hinausgehen und die vorhandenen Tragwerksreserven deutlicher aufzeigen, ohne das Zuverlässigkeitsniveau abzusenken.

2 Aufbau des Merkblatts

Der Aufbau des Merkblatts ist im Wesentlichen vergleichbar mit dem Aufbau des Merkblatts für die Bewertung der Tragfähigkeit bestehender massiver Wasserbauwerke (BAW, 2016) und gliedert sich in folgende Kapitel:

Kapitel 1: Vorbemerkungen und Anwendungsbereich

Der Anwendungsbereich dieses Merkblatts wird wie in (Deutscher, 2015) beschrieben den Verschlusskörper aus Stahl oder Eisen umfassen, die nicht nach den oben genannten aktuellen Regelwerken bemessen wurden. Die wirklichkeitsnahe Bewertung der Verschlüsse erfolgt auf Basis aktualisierter Bestandsdaten und aktueller Tragwerkszustände, die vor Ort am Bauwerk gewonnen werden. Das Merkblatt darf ebenfalls im Rahmen von Instandsetzungs- und Verstärkungsmaßnahmen bestehender Stahlwasserbauverschlüsse angewendet werden.

Kapitel 2: Allgemeines

Die statische Überprüfung des Tragwerks erfolgt in Untersuchungsstufen mit zunehmendem Vertiefungsgrad (siehe Bild 1). Für die Nachweise zur Beurteilung der Stahlwasserbauverschlüsse wird differenziert zwischen dem Werkstoffverhalten bei tiefen Temperaturen (Sprödbbruch), der Tragfähigkeit bei Raumtemperatur (duktile Versagensformen) und der Tragfähigkeit unter Ermüdungsbeanspruchungen (Materialermüdung). Die Wahl der Stufentiefe ist objektspezifisch vorzunehmen, wobei die Nachweise der drei aufgeführten Versagensformen nicht zwingend in der gleichen Stufentiefe beginnen bzw. enden müssen. Die Aussagegenauigkeit, der Aufwand und die Komplexität nehmen von Stufe A nach Stufe C zu.

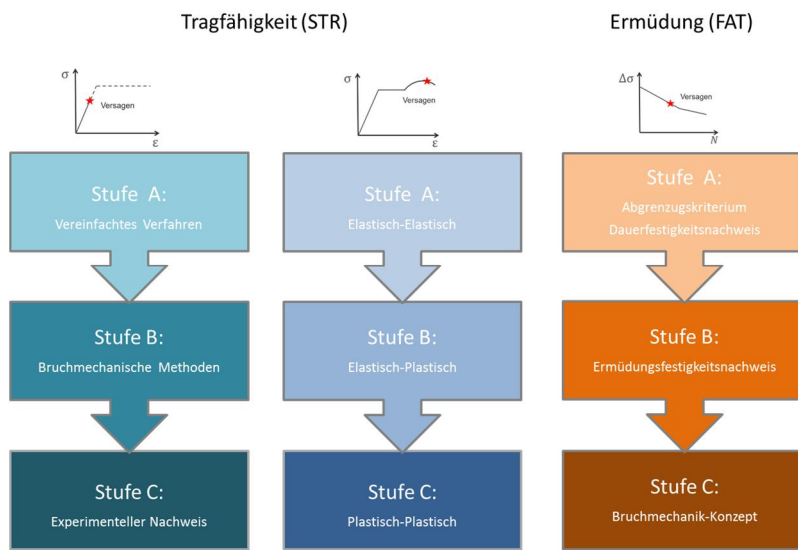


Bild 1: Untersuchungsstufen für den Nachweis der Tragfähigkeit

Kapitel 3: Grundlagen und Ausgangsbasis

Die Bewertung bestehender Verschlusskonstruktionen setzt die Kenntnis über den Zustand, das vorhandene Material und die damals angenommenen System- und Lastannahmen voraus. In diesem Kapitel werden daher Hinweise und Regelungen zur Zustands- und Schadensfeststellung sowie zu möglichen Einwirkungen und Werkstoffeigenschaften gegeben.

Neben der dominierenden Einwirkung aus dem Wasserdruck, spielt der Eisdruckansatz für den Nachweis bestehender Konstruktionen eine wesentliche Rolle, da für diese Einwirkung bis zur Einführung der ersten DIN 19704 (1958-06) keine einheitlichen Regelungen vorlagen, und die Lastansätze mit den folgenden Normengenerationen eine ständige Veränderung erfahren haben. Aktuell wird die Einwirkung, differenziert nach Binnen- und Küstengebiet, über einen Eisdruck und die zunehmende Eisdicke festgelegt. Neben einer, in Bezug auf die DIN 19704-1 (2014-11), eindeutigeren Auslegung des Eisdruckansatzes bei geeigneten Stauwänden enthält das Merkblatt TbVS einen Vorschlag für die standortgerechte Berücksichtigung der charakteristischen Eisdicke. Hierbei wird mittels eines empirischen Ansatzes (siehe Formel 1) die Eisdicke anhand von lokal festgestellten Kältesummen abgeschätzt.

$$h_E = \alpha_E \cdot 3,5 \cdot \sqrt{\sum |T_L|} \leq 30 \text{ [cm]} \quad (1)$$

Die Kältesumme eines Winters (November - März) ist hierbei der dimensionslose Betrag der Summe der negativen Tagesmitteltemperaturen ($T_L < 0^\circ\text{C}$). Als Bemessungswert ist der in den letzten fünfzig Jahren festgestellte Maximalwert zu verwenden. Der dimensionslose Proportionalitätsfaktor α_E berücksichtigt die lokalen klimatischen und hydraulischen Bedingungen (Barjenbruch, 2002). Die Auswertung verschiedener Eisdickenmessungen an ostdeutschen Wasserstraßen (Klü-

sendorf-Mediger, 1998), (Carstensen, 2008), und vom Neckar (Lutz, 1927) sowie der in ELWIS (www.elwis.de) dokumentierten Eislagen der letzten 10 Jahre zeigen einen typischen Wertebereich $0,4 \leq \alpha_E \leq 0,6$. Die maßgebenden Kältesummen (1966-2016) im Bereich relevanter Bundeswasserstraßen sind in Bild 2 dargestellt. Die Darstellung wurde aus Klimadaten einer öffentlich zugänglichen Datenbank des Deutschen Wetterdienstes (www.dwd.de/WESTE) generiert. Für eine bauwerksnahe Untersuchung wird daher empfohlen, die für die Örtlichkeit maßgebende Konstante α_E aus der Korrelation von konkreten Eisereignissen (Eisdicke) und den zeitlich zugehörigen Kältesummen zu bestimmen.

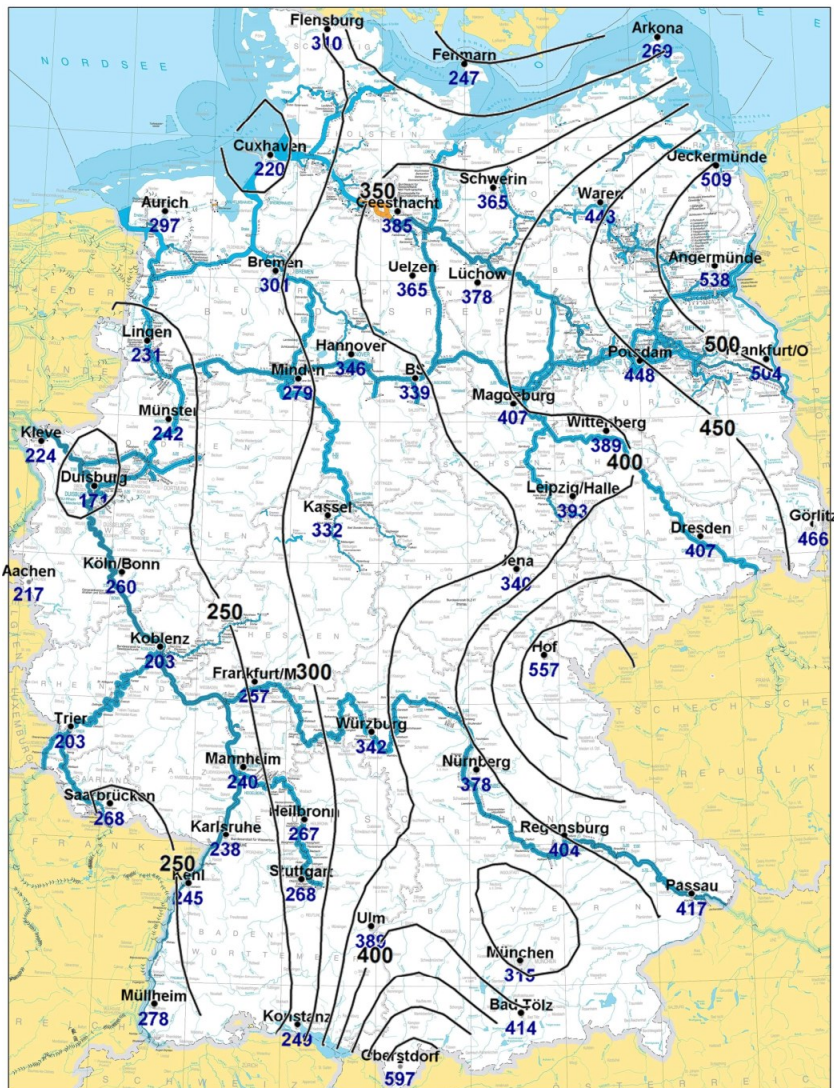


Bild 2: Maßgebende Kältesumme im Zeitraum von 1966-2016

Der Inhalt zu dem Abschnitt *Werkstoffe* wird in dem folgenden Vortrag **Altstähle im Stahlwasserbau**, von Dipl.-Ing. Thomas Hesse (BAW) dargestellt.

Kapitel 4: Statische Berechnung

Der bestehende Verschlusskörper ist für folgende Grenzzustände der Tragfähigkeit (GZT) nachzuweisen:

- Verlust der Lagesicherheit (EQU)
- Versagen des Tragwerks oder seiner Teile (STR)
- Ermüdungsversagen des Tragwerks oder seiner Teile (FAT)

Ist die Funktion des Verschlusses eingeschränkt oder werden Veränderungen in der Systemsteifigkeit oder der Lastgrößen vorgenommen, ist eine Bewertung für den Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit (GZG) vorzunehmen.

Die ermittelte Zuverlässigkeit von Stahlkonstruktionen mit den heute anzuwendenden Nachweis-konzepten ist nur belastbar, wenn diese eine Bewertung der Spröbruchneigung mit einschließt. Die Bewertung der Spröbruchsicherheit erfolgt nach diesem Merkblatt in Stufen. Kann keine ausreichende Spröbruchsicherheit mit dem vereinfachten Verfahren (siehe Vortrag T. Hesse) nachgewiesen werden, ist eine Bewertung mit Hilfe von bruchmechanischen Methoden vorzunehmen. Im Gegensatz zu den Festigkeitsnachweisen geht die Bruchmechanik von defekten Bauteilen (Risse) aus. Die Beurteilung über einen stabilen oder instabilen Rissfortschritt erfolgt durch Untersuchungen in direkter Umgebung der Rissspitze. Die Grundlagen für die Bewertung bestehender Flussstahlkonstruktionen wird in dem Vortrag **Zur Spröbruchsicherheit alter Stahlkonstruktionen** von Prof. Dr.-Ing. Richard Stroetmann, Dr.-Ing. Lars Sieber (TU Dresden) vorgestellt.

Die aktuellen Bemessungsregeln des Eurocode 3 gelten nur, wenn ein duktilen Versagen vorausgesetzt werden kann, da die vereinfachten Bemessungsmodelle aus Versuchen mit entsprechenden Werkstoffeigenschaften hergeleitet wurden (Stranghöner und Kühn, 2012). Daher wird in DIN EN 1993-1-1 (2010-12) die Einhaltung entsprechender Duktilitätskriterien gefordert, die auch bei der Bewertung bestehender Verschlüsse zu beachten sind.

In den weiteren Abschnitten werden Vorgaben zur Verwendung der Teilsicherheitsbeiwerte gegeben. Bei genauer Ermittlung des Eigengewichts darf eine Anpassung des Teilsicherheitsbeiwertes vorgenommen werden. Eine Ausnahme bilden untergeordnete Verschlüsse, bei deren Versagen weder Menschen gefährdet noch die Schifffahrt eingeschränkt wird. Dort soll nach derzeitigem Bearbeitungsstand für die Einwirkungen in der ständigen Bemessungssituation gemäß DIN EN 1990 (2010-12), Anhang B ein Beiwert von $K_{FI} = 0,9$ zur Reduzierung der Teilsicherheitsbeiwerte berücksichtigt werden.

Die Teilsicherheitsbeiwerte für die Beanspruchbarkeit werden für die Querschnittsnachweise ($\gamma_{M0,alt}$), Stabilitätsnachweise ($\gamma_{M1,alt}$) und das Bruchversagen ($\gamma_{M2,alt}$) in Abhängigkeit der Herstellungszeit der Stähle vorgegeben. Wie auch für Neukonstruktionen im Stahlwasserbau üblich,

sind für Querschnittsnachweise und Stabilitätsnachweise die gleichen Teilsicherheitsbeiwerte anzunehmen.

Bei Anwendung von Stabilitätsnachweisen wird auf die Anpassung des Bezugsschlankheitsgrades in Abhängigkeit der angesetzten Streckgrenze hingewiesen. Im Weiteren erfolgt für die Querschnittsklassifizierung eine Definition der anzunehmenden Beulfeldgrößen genieteter Konstruktionen. Der Nachweis über die Querschnittsklassifizierung nach DIN EN 1993-1-1 (2010-12), Tabelle 5.2 stellt einen vereinfachten Beulnachweis unter Normalspannungen dar. Die Grenzwerte der Tabelle sollen bei der Überarbeitung angepasst werden. Die Vorschläge zu den angepassten Grenzwerten sind in (Kuhlmann et al., 2014) dargestellt. Um eine ausreichende „Knickfestigkeit von Rohren“ (Wehrwalzen) zu erreichen, wurde damals die Anordnung der Längsaussteifungen und der Ringversteifungen in Abhängigkeit der Walzengröße, der Blechstärke und der vorhandenen Blechspannung gewählt. Dies ist bei der statischen Bewertung zu beachten, wenn beispielsweise die Blechdicken durch Korrosion vermindert wurden oder aufgrund von Lasterhöhungen höhere Spannungen, begleitet durch Materialanalyse, zugelassen werden sollen. In dem Vortrag **Stabilitätsnachweise im Stahlwasserbau** von Dr.-Ing. Benjamin Braun (SPACE STRUCTURES GmbH, Berlin) wird über die Nachweisführung beulgefährdeter Stahlwasserbaukonstruktionen aus heutiger Sicht berichtet.

Eine für den Stahlwasserbau neue, jedoch aus Sicht der BAW erforderliche Öffnung der Nachweismöglichkeit für vorhandene Stahlwasserbaukonstruktionen, besteht aus der Nutzung plastischer Querschnittsreserven. Bleibt die Betrachtung auf der Annahme eines elastischen Werkstoffverhaltens beschränkt, kann in vielen Fällen eine mögliche Tragfähigkeitsreserve nicht dargestellt werden. Diese stellt jedoch Anforderungen an die Material- (Duktilität) und Konstruktionseigenschaften (Querschnittsklasse). Grenzdehnungen bei Verwendung der bilinearen Spannungsdehnungslinie werden vorgegeben. Bei Nietkonstruktionen und insbesondere bei zusammengesetzten Querschnitten wird eine höhere Spannungsausnutzung durch die Anschlüsse selbst und durch die erforderliche „Verankerungslänge“ für den voll nutzbaren angeschlossenen Teilquerschnitt beschränkt. Neue Stahlwasserbaukonstruktionen sind nach wie vor nach der Elastizitätstheorie zu bemessen.

Bei ermüdungsbeanspruchten Bauteilen kann ein Bauteilversagen unterhalb der statischen Festigkeitsgrenze auftreten. Daher sind Stahlwasserbauverschlüsse hinsichtlich der vorhandenen Ermüdungsfestigkeit zu bewerten. In der Stufe A wird für den Nachweis der Ermüdungsfestigkeit überprüft, ob aufgrund der vorhandenen Spannungsschwingbreiten und der vergangenen und zukünftigen Lastspielzahlen ein Ermüdungsnachweis nach Stufe B überhaupt erforderlich wird. Entgegen der Regelung in DIN 19704-1 (2014-11) können bei der Bewertung bestehender Konstruktionen in Abhängigkeit der Schadensfolge differenzierte Teilsicherheitsbeiwerte zur Anwendung kommen. Für den Nachweis genieteter Bauteile (Scher-Lochleibungsverbindungen) kann vereinfachend der Kerbfall 71 in Anlehnung an (Kühn et al., 2008) angenommen werden. Die Nachweisformate der DIN EN 1993-1-9 (2010-12) unterstellen einen ausreichenden Korrosionsschutz während der ge-

samen Lebensdauer. Da dies bei Stahlwasserbauwerken nicht immer zutrifft, ist die Absenkung der Ermüdungsfestigkeit unter Korrosionsbedingungen von Interesse. Um eigene Erfahrungen auf diesem Gebiet zu sammeln, wurden Stahlproben sowohl in Süß- als auch in Salzwasser über einen längeren Zeitraum ausgelagert. Die korrodierten Proben wurden anschließend einer Ermüdungsfestigkeitsprüfung unterzogen. Über die Ergebnisse wird in dem Vortrag **Einfluss der Korrosion auf die Ermüdungsfestigkeit von Konstruktionen des Stahlwasserbaus** von Prof. Dr.-Ing. Thomas Ummenhofer (KIT – Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine) berichtet.

Kapitel 5: Robustheitsbewertung

Kann ein ausreichendes Sicherheitsniveau nicht in allen Bauteilen nachgewiesen werden, ist der Einfluss des lokal versagten Bauteils auf die gesamte Verschlusskonstruktion zu untersuchen. Die üblichen Nachweisformate für Verschlusskonstruktionen zeigen nicht, ob nach einem Bauteilausfall eine Lastumlagerung und „alternative Lastpfade“ für einen Lastabtrag zur Verfügung stehen. Daher ist eine ergänzende Robustheitsbewertung vorzunehmen, bei der die Tragfähigkeit der Konstruktion nach Ausfall eines Konstruktionselementes untersucht wird. Dabei dürfen irreversible Bauteilverformungen und Materialfließen eintreten. Die Annahme eines gleichzeitigen Ausfalls von mehreren kritischen Konstruktionsteilen ist in der Untersuchung nicht anzunehmen. Die Folgen lokalen Versagens wird nach DIN EN 1990 (2010-12) als außergewöhnliche Situation eingestuft (siehe Bild 3).

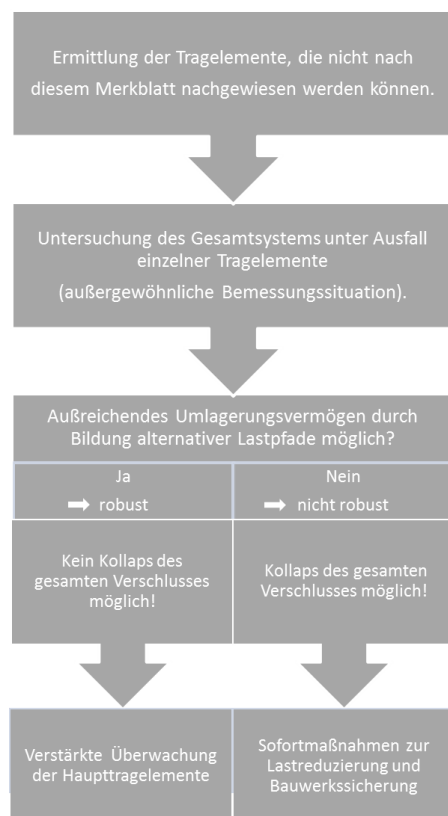


Bild 3: Robustheitsbewertung des Verschlusses

Kapitel 6: Zusammenfassende Bewertung der Tragfähigkeit

In diesem Kapitel wird gefordert, die neuralgischen Stellen der Tragkonstruktion mit hohen Auslastungsgraden und erhöhtem Ermüdungsrisiko in den Planunterlagen zu kennzeichnen. Die Darstellung erfolgt bei ermüdungsbeanspruchten Bauteilen getrennt nach Auslastungsgraden der Querschnittstragfähigkeit und der Ermüdungsfestigkeit. Kann keine ausreichende Ermüdungsfestigkeit nachgewiesen werden, sind in Abhängigkeit der Berechnungsergebnisse gegebenenfalls die Intervalle der Bauwerksinspektion zu verringern (<6 Jahre). Eine Empfehlung für das angepasste Inspektionsintervall gehört ebenfalls in die zusammenfassende Bewertung. Neben der Benennung von Einhaltung/Nichteinhaltung der Duktilitätsanforderungen ist in Abhängigkeit der Untersuchungsergebnisse zu bewerten, ob mit einem duktilen oder spröden Tragwerksversagen gerechnet werden muss.

Kapitel 7: Sicherungs- und Ertüchtigungsmaßnahmen

In Kapitel 7 werden Hinweise zu Sicherungs- und Ertüchtigungsmaßnahmen aufgeführt. Insbesondere wird auf angerissene Bauteile eingegangen, bei denen konstruktiv für einen Rissarrest zu sorgen und die Schadensursache zu klären ist. Ohne Kenntnis des Rissauslösers sind Instandsetzungsmaßnahmen in der Regel nicht zielführend. Zur Verlängerung der Lebensdauer von Schweißnähten können Verfahren der Schweißnahtnachbehandlungen zur Anwendung kommen. Wie mit Hilfe des Höherfrequenten Hämmerns die Lebensdauer von geschweißten Konstruktionen erhöht werden kann, wird in dem Beitrag Steigerung der Ermüdungsfestigkeit von neuen und vorhandenen Konstruktionen durch Nachbehandlung mit höherfrequenten Hämmerverfahren von Prof. Dr.-Ing. Ulrike Kuhlmann und Dipl.-Ing. Stephanie Breunig (Universität Stuttgart) dargestellt.

3 Ausblick

Während der Bearbeitung des Merkblatt-Entwurfs waren ergänzende Betrachtungen und Untersuchungen erforderlich (u. a. Themen der externen Vorträge), deren Ergebnisse ausgewertet und für eine Implementierung im Merkblatt aufbereitet werden. Nach einer Endkontrolle des Entwurfs innerhalb der Bundesanstalt für Wasserbau wird der Entwurf dem Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) zur Abstimmung und Einleitung eines Gelbdruckverfahrens übergeben. Parallel zum Gelbdruckverfahren sollen für drei ausgewählte Stahlwasserbaukonstruktionen Tragfähigkeitsbewertungen nach dem Merkblatt durchgeführt werden. Nach Bearbeitung der Einsprüche und Auswertung der Vergleichsrechnungen wird die finale Fassung erstellt und per Erlass durch das BMVI für die Anwendung im Internet freigegeben. Aus heutiger Sicht wird das Merkblatt kein statisches Papier bleiben können, sondern ist durch zusätzlich gewonnene Erfahrungen, Untersuchungen und gegebenenfalls auch Schadensfällen dem aktuellen Kenntnisstand in geeigneten Zeitabschnitten anzupassen.

4 Literaturverzeichnis

- Barjenbruch, U. (2002): Eisbildung und Eisstärkenvorhersage in Schifffahrtskanälen. Bundesanstalt für Gewässerkunde. Koblenz (BFG-JAP-Nr.:2528, 2510).
- BAW, 2016: Bewertung der Tragfähigkeit bestehender massiver Wasserbauwerke (TbW). Hg. v. Bundesanstalt für Wasserbau (BAW). Karlsruhe.
- Carstensen, D. (2008): Eis im Wasserbau. Theorie, Erscheinungen, Bemessungsgrößen. Dresden: Selbstverl. der TU Dresden (Dresdner wasserbauliche Mitteilungen, 37).
- Deutscher, M. (2015): Tragfähigkeitsbewertung bestehender Stahlwasserbauverschlüsse. In: Tagungsband BAW-Kolloquium 27. und 28. Oktober 2015, S. 77–81.
- DIN 19704-1 (2014-11): DIN 19704-1 Stahlwasserbauten-Teil 1: Berechnungsgrundlagen. DIN Deutsches Institut für Normung e.V. Berlin.
- DIN 19704 (1958-06): DIN 19704 Berechnungsgrundlagen für den Stahlwasserbau. Deutscher Normenausschuss. Berlin W 15 und Köln.
- DIN EN 1990 (2010-12): Eurocode: Grundlagen der Tragwerksplanung; Deutsche Fassung EN 1990:2002 + A1:2005 + A1:2005/AC:2010. Normenausschuss Bauwesen (NABau). Berlin.
- DIN EN 1993-1-1 (2010-12): Eurocode : Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten - Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau; Deutsche Fassung EN 1993-1-1:2005 + AC:2009. Normenausschuss Bauwesen (NABau). Berlin.
- DIN EN 1993-1-9 (2010-12): Eurocode : Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten - Teil 1-9: Ermüdung; Deutsche Fassung EN 1993-1-9:2005 + AC:2009. Normenausschuss Bauwesen (NABau). Berlin.
- Klüsendorf-Mediger, J. (1998): Prognose von Eiserscheinungen auf Ostdeutschen Wasserstraßen. Hg. v. Bundesanstalt für Wasserbau (BAW), (Mitteilungsblatt, 79).
- Kuhlmann, U.; Feldmann, M.; Lindner, J.; Müller, Ch.; Stroetmann, R. (2014): Eurocode 3. Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten Band 1: Allgemeine Regeln und Hochbau, DIN EN 1993-1-1 mit Nationalem Anhang, Kommentar und Beispiele. Unter Mitarbeit von Adrian Just. 1. Aufl. Berlin: Beuth; Wilhelm Ernst & Sohn.
- Kühn, B.; Lukic, M.; Günther, H.-P.; Helmerich, R.; Herion, S.; Kolstein, M.H. et al. (2008): Assessment of Existing Steel Structures: Recommendations for Estimation of Remaining Fatigue Life. Background documents in support to the implementation, harmonization and further development of the Eurocodes (JRC Scientific and Technical Reports).
- Lutz, W. (1927): Zur Frage der Eisabführung an Wehren (4). In: Die Bautechnik (37), S. 516–517.
- Stranghöner, N.; Kühn, B. (2012): Auswahl der Stahlsorte auf Basis der DIN EN 1993-1-10. In: Stahlbau 81 (4), S. 315–323.