

Ökobilanzielle Untersuchung des Massivbaus einer Beispielschleuse

Vincent Klessing M. Sc., Bundesanstalt für Wasserbau

Einleitung

Der Neubau von Verkehrswasserbauwerken wie Schleusen oder Wehren erfolgt in Deutschland vorwiegend in Massivbauweise unter Verwendung hoher Mengen treibhausgasintensiver Baustoffe wie z. B. Stahlbeton oder Baustahl. Um den aktuellen Herausforderungen zum Klima- und Ressourcenschutz auch im Verkehrswasserbau begegnen zu können, besteht die Möglichkeit, die bei der Herstellung derartiger Bauwerke entstehenden Emissionen durch geeignete Methoden wie beispielsweise der Ökobilanzierung zu quantifizieren und zu bewerten. Dabei dienen klimarelevante Indikatoren wie das Treibhauspotenzial (engl.: Global Warming Potential, GWP) als Kenngrößen für die Umweltauswirkungen.

Dieser Beitrag befasst sich mit ökobilanziellen Untersuchungen bezogen auf den Neubau von Schleusenbauwerken anhand einer Beispielschleuse. Mit Fokus auf den Massivbau werden ausgewählte Ergebnisse für das GWP von der Baustoff- über die Bauteil- bis zur Bauwerksebene präsentiert. Die vorgestellten Ergebnisse beruhen auf Berechnungen der Bundesanstalt für Wasserbau (BAW). Parallel hierzu wurden seitens des Instituts für Nachhaltigkeit im Bauwesen (INaB) der RWTH Aachen im Auftrag der BAW ebenfalls ökobilanzielle Betrachtungen zu der Beispielschleuse mittels Ökobilanzsoftware durchgeführt (Shokri und Traverso 2023).

Die Beispielschleuse als Bilanzierungsobjekt

Als Grundlage für die Ökobilanzierung von Verkehrswasserbauwerken im Geschäftsbereich der Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (WSV) erfolgte in einem ersten Schritt die Konzipierung einer Beispielschleuse als Bilanzierungsobjekt für die Betrachtung des (Ersatz)Neubaus einer möglichst großen Bandbreite vorhandener Schifffahrtsschleusen. Vor diesem Hintergrund wurde eine Einkammerschleuse mit einer Fallhöhe von unter 10 m für den Binnenbereich als monolithischer Halbrahmen in Stahlbetonbauweise gewählt. Die Kammergeometrie weist zukunftsorientiert mit 140 m Nutzlänge und 12,5 m Breite ausreichende Abmessungen zur Schleusung von übergroßen Großmotorgüterschiffen (üGMS) auf. Die Befüllung und Entleerung der Schleuse erfolgt gemäß Standardisierung für Schleusen mit einer Fallhöhe bis 10 m über ein Drehsegmenttor im Oberhaupt sowie ein Stemmtor mit Torschützen im Unterhaupt (Jander 2012, Wachholz 2015).

Zur Veranschaulichung ist in Abbildung 1 ein Kammerquerschnitt der Beispielschleuse dargestellt.

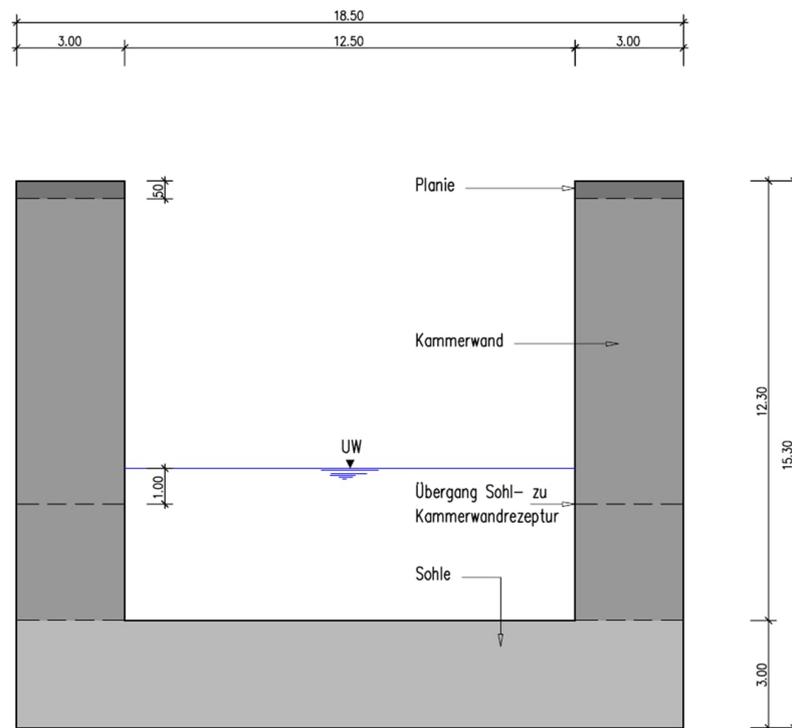


Abbildung 1: Kammerquerschnitt der Beispielschleuse (BAW)

Rahmenbedingungen der Ökobilanzierung

Die Grundlage für die Methode der Ökobilanz bildet die DIN EN ISO 14040:2021-02, in welcher bezogen auf den Ablauf der Ökobilanz zwischen den vier Phasen Festlegung von Ziel und Untersuchungsrahmen, Sachbilanz, Wirkungsabschätzung und Auswertung unterschieden wird.

Im vorliegenden Fall beinhaltet der Untersuchungsrahmen die Herstellung der Materialien für den Massivbau der beschriebenen Beispielschleuse mit dem Ziel, ein erstes besseres Verständnis für die Umweltauswirkungen im Zuge der Herstellung von Verkehrswasserbauwerken zu erhalten. Bezogen auf die Lebenszyklusphasen eines Bauprodukts nach DIN EN 15804:2022-03 umfasst die hier vorgestellte Ökobilanz vorerst die Phasen A1 bis A3, also die Herstellungsphasen der verwendeten Baustoffe, und verfolgt damit einen materialbezogenen „Von der Wiege bis zum Werkstor“-Ansatz für den Neubau der Beispielschleuse.

Als funktionelle Einheiten bzw. Bezugsgrößen dienen auf der Baustoffebene ein Kubikmeter Beton, auf der Bauteilebene ein Meter der Schleusenkammer und auf der Bauwerksebene der gesamte Massivbau unter Berücksichtigung, dass eine Nutzungsdauer von 100 Jahren für massive Verkehrswasserbauwerke gemäß DIN 19702:2013-02 bzw. ZTV-W LB 215 (Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung 2012) angestrebt wird.

Die im Rahmen der Sachbilanz für die zuvor genannten Lebenszyklusphasen ermittelten relevanten Materialien und Prozesse sind im Folgenden zusammengestellt.

A1 - Rohstoffbereitstellung

Die in diesem Beispiel für die Bilanzierung verwendeten und für den Verkehrswasserbau praxisrelevanten, exemplarischen Betonzusammensetzungen einschließlich des je Bauteil berücksichtigten Bewehrungsgrads sind in Tabelle 1 dargestellt. Für die wasserbauspezifischen Betone

existieren bspw. im Gegensatz zur Bewehrung keine expliziten Ökobilanzdatensätze, sodass diese Betonzusammensetzungen im Detail bilanziert werden. Zu beachten ist, dass die Sohlrezeptur entsprechend Abbildung 1 von der Oberkante der Sohle bis einen Meter unter die Unterwasserlinie auch für die Kammerwand angesetzt wird. Dieser Bereich wird bei der bauteilbezogenen Auswertung der Ökobilanzierung jedoch trotz Verwendung der Sohlrezeptur dem Bauteil Kammerwand zugeordnet.

Tabelle 1: Verwendete Betonzusammensetzungen und Bewehrungsgehalte für die Bilanzierung

Bauteil	Sohle	Kammerwand	Planie
Festigkeitsklasse	C20/25	C20/25	C30/37
Expositionsklasse	XC1	XC2/XC4, XF3, XM1	XC4, XF4, XD3, XM1
<i>Menge der Ausgangsstoffe in kg/m³</i>			
Zement (CEM III/A)	240	275	360
Flugasche	100	80	20
Wasser	164	165	160
Gesteinskörnung	1811	1693	1691
Fließmittel	1,44	1,10	2,88
Luftporenbildner	-	2,06	3,24
Bewehrungsgehalt	120	110	110

A2 – Transport der Betonausgangsstoffe zum Betonwerk

Der Transport der Betonausgangsstoffe zum Betonwerk wird mittels LKW bilanziert. Die Transportentfernungen werden entsprechend der Ansätze für die Branchen-Umweltproduktdeklarationen (engl. Environmental Product Declaration, EPD) für deutsche Betone angenommen (Becke et al. 2020).

A3 – Herstellung im Betonwerk

Die Berücksichtigung der Herstellungsprozesse im Betonwerk basiert auf Bestandsaufnahmen von sechs Betonwerken, die in Garrecht et al. (2015) dokumentiert sind. Der Energiebedarf für einen Kubikmeter Beton wird auf Grundlage dessen im Mittel mit ca. 7,5 kWh/m³ angesetzt.

Als Datengrundlage für die Überführung der Sachbilanz in Wirkungskategorien dient im Rahmen der für die Beispielschleuse durchgeführten Wirkungsabschätzung hauptsächlich die Datenbank ÖKOBAUDAT des Bundesministeriums für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen (2023). Darüber hinaus erfolgt die Bilanzierung der Zusatzmittel auf Basis von EPDs der European Federation of Concrete Admixtures Associations a.i.s.b.l. (EFCA) (2021a und 2021b) und der Ansatz der Flugasche nach dem Hintergrundbericht für das CO₂-Modul des Concrete Sustainability Councils (CSC) (2021).

Um den Herausforderungen des Klimawandels Rechnung zu tragen, beschränkt sich die Wirkungsabschätzung bezogen auf die Indikatoren der Ökobilanz nach DIN EN 15804:2022-03 auf das GWP, welches die freigesetzten Treibhausgasemissionen repräsentiert.

Ergebnisse

Die Darstellung der Ergebnisse erfolgt im weiteren Verlauf differenziert zwischen der Baustoff-, Bauteil- und Bauwerksebene.

In Abbildung 2 ist der Beitrag der einzelnen Ausgangsstoffe und Prozesse zum GWP am Beispiel des bilanzierten Sohlbetons einschließlich des angesetzten Bewehrungsgrads abgebildet. Hieraus lässt sich ableiten, dass die maßgebenden Emissionen aus dem Zement und der Flugasche mit insgesamt 55 %, der Bewehrung mit 33 % sowie den Transporten der Betonausgangsstoffe mit 8 % resultieren. Bezogen auf den unbewehrten Beton tragen der Zement und die Flugasche zusammen somit zu einem Hauptanteil von etwa 82 % zum GWP des Sohlbetons bei.

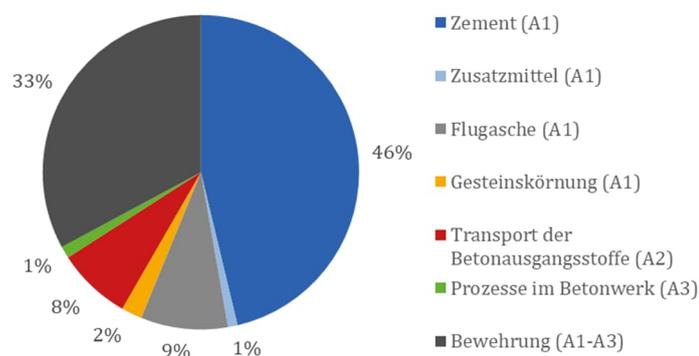


Abbildung 2: Prozentuale Anteile der Materialien und Prozesse am GWP des Sohlbetons (BAW)

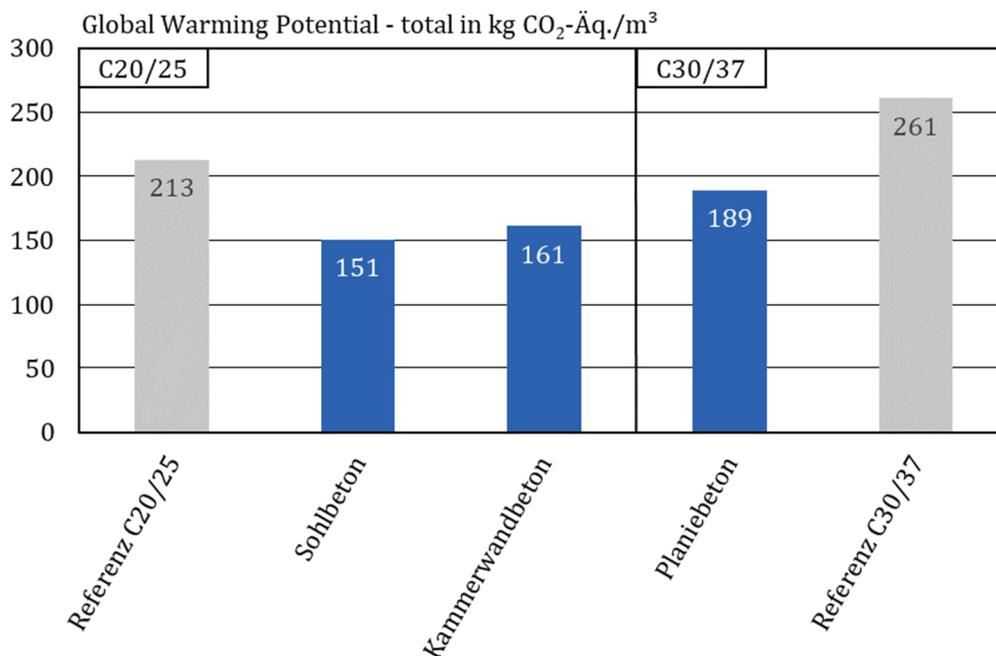


Abbildung 3: GWP der verwendeten Betone (unbewehrt) für die Phasen A1-A3 (blau); GWP der Branchenreferenzwerte für Betone der Festigkeitsklassen C20/25 und C30/37 der Phasen A1-A3 für die CSC-Zertifizierung (CSC 2021) zum Vergleich (grau) (BAW)

Abbildung 3 zeigt das GWP der bilanzierten unbewehrten Betone für die Beispielschleuse bezogen auf einen Kubikmeter Beton. Unter Berücksichtigung der Angaben in Tabelle 1 ergeben sich mit geringeren Anforderungen an die Festigkeit und Dauerhaftigkeit Verringerungen der spezifischen Emissionen der Betone. In Kombination mit den zuvor beschriebenen Erkenntnissen für den Sohlbeton entstehen diese Minderungen hauptsächlich durch den mit geringeren (Dauerhaftigkeits-) Anforderungen an den Beton einhergehenden verminderten Zementgehalt.

Zusätzlich sind in Abbildung 3 zur besseren Einordnung der bilanzierten Betone Branchenreferenzwerte aus der CSC-Zertifizierung (CSC 2021) für Betone der Festigkeitsklassen C20/25 und C30/37 dargestellt, für welche als Bindemittel ein Portlandzement in der Ökobilanz angesetzt wurde. Die Betone der Beispielschleuse weisen bezogen auf die jeweiligen Referenzen ein zwischen 52 und 72 kg CO₂-Äq./m³ geringeres GWP auf. Wichtig an dieser Stelle ist zu erwähnen, dass sich diese Differenzen auf den Vergleich gleichwertiger Festigkeitsklassen der Betone beschränken und unterschiedliche Anforderungen aus den Expositionsklassen vernachlässigen.

Insbesondere um die Hydratationswärmeentwicklung der massigen Betonbauteile zu reduzieren, werden im massiven Verkehrswasserbau traditionell entsprechend der für die Beispielschleuse bilanzierten Betone vorwiegend Hochofenzemente (insbesondere CEM III/A) mit bereits reduzierten Klinkergehalten in Kombination mit Flugasche und damit einhergehenden reduzierten CO₂-Emissionen verwendet. Das verbleibende Optimierungspotenzial der Zusammensetzungen verkehrswasserbaulicher Betone ist demnach als eher gering einzuschätzen. Im Hinblick auf das ungewisse Angebot an Flugasche und Hüttensanden ist die weitere Verfügbarkeit derartiger langjährig bewährter Betonzusammensetzungen jedoch zukünftig fraglich. Infolgedessen entsteht die Herausforderung, neuartige verfügbare Bindemittel und Betone mit vergleichbaren oder geringeren Emissionen sowie mit ausreichender technischer Eignung bezugnehmend auf die Anforderungen an massive Verkehrswasserbauwerke zu erschließen.

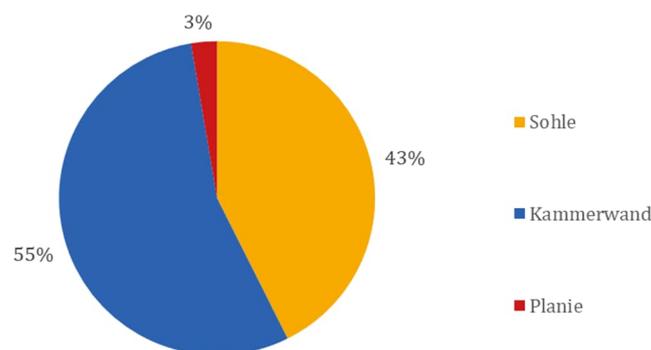


Abbildung 4: Prozentuale Anteile der Bauteile am GWP eines Meters Schleusenammer (BAW)

In einem weiteren Schritt stellt Abbildung 4 den prozentualen Anteil der bewehrten Bauteile Sohle, Kammerwand und Planie am GWP eines Meters des Kammerquerschnitts dar. Wie entsprechend der Darstellung in Abbildung 1 zu erwarten ist, spielt die Planie aufgrund der geringen erforderlichen Betonmengen im Verhältnis zu Sohle und Kammerwand eine untergeordnete Rolle. Im Vergleich zwischen der Kammerwand und der Sohle ergibt sich für die Beispielschleuse ein etwa 12 % höherer Anteil der Kammerwand am GWP. Bei konstanter Kammerbreite ist dieses

Verhältnis jedoch maßgebend von der Kammerwandhöhe bzw. Fallhöhe der Kammer abhängig und kann sich bei geringeren Höhen in Richtung eines höheren Beitrags der Sohle im Vergleich zur Kammerwand verschieben. Unabhängig hiervon liegt es im Hinblick auf die Betonzusammensetzung nahe, in einem ersten Schritt vorzugsweise eine Optimierung der Sohlbetonrezeptur hinsichtlich der Emissionen anzustreben, da die Dauerhaftigkeitsanforderungen dieses Bauteils im Vergleich zur Kammerwand signifikant geringer ausfallen.

Bezogen auf die gesamte Schleusen Kubatur von ca. 27.800 m³ Stahlbeton beträgt das Treibhauspotenzial für die Phasen A1-A3 des Massivbaus der Beispielschleuse ca. 6.300 t CO₂-Äq., wovon etwa 63 % der Emissionen der Schleusenkammer und der restliche Anteil den Häuptionen zugeordnet werden können. Demnach erscheint in einem nächsten Schritt die vergleichende Untersuchung sowohl etablierter als auch innovativer Kammerbauweisen zielführend, um weitere emissionsbezogene Einsparpotenziale zu untersuchen. Beispiele hierfür sind Bauweisen mit im Massivbau integrierten Baugrubenumschließungen (bspw. Schleuse Dörverden) oder die sich derzeit im Referat B1 der BAW in der Entwicklung befindliche Fertigteilbauweise für den Neubau von Schleusen geringer und mittlerer Fallhöhe (siehe bspw. Hasselder et al. 2022). Hierbei sind jedoch gleichzeitig die technischen Vor- und Nachteile der unterschiedlichen Bauweisen abzuwägen, um eventuell verringerte Nutzungsdauern oder erforderlichen Instandsetzungsbedarf sowie entstehende Risiken zu berücksichtigen und falls erforderlich in der Ökobilanz abbilden zu können. Insbesondere Entwicklungen wie sehr bzw. zu filigrane Bauweisen für Schleusenkammerwände, wie sie insbesondere in den 1970er und 1980er Jahren praktiziert wurden, sind dahingehend sehr kritisch zu bewerten.

Fazit und Ausblick

Die vorgestellten ökobilanziellen Untersuchungen geben einen ersten Eindruck bezogen auf den Beitrag der Ausgangsstoffe und Prozesse sowie weiterführend der Bauteile am GWP des Massivbaus der vorgestellten Beispielschleuse. Anzumerken ist, dass die vorgestellten Ergebnisse nur für die bilanzierte Beispielschleuse in Verbindung mit den hierfür getroffenen Annahmen gelten und aufgrund der sich stetig weiterentwickelnden Datengrundlage für die Ökobilanz Momentaufnahmen darstellen. Für die Beispielschleuse erfolgte die Bilanzierung mithilfe exemplarischer Betonzusammensetzungen. Weiterführend werden weitere Zusammensetzungen bilanziert, um die Bandbreite der in der Regel im Verkehrswasserbau verwendeten Betone über durchschnittliche Umweltauswirkungen abbilden zu können. Im weiteren Verlauf ist geplant, zusätzliche Bestandteile der Schleuse wie den Stahlwasserbau und die Baugruben einschließlich Baugrubenumschließung zu bilanzieren und den Anteil des Massivbaus an den gesamten grauen Emissionen einzuordnen. Außerdem sollen über die Phasen A1-A3 hinausgehende Lebenszyklusphasen nach DIN EN 15804:2022-03 unter Annahme realitätsnaher Szenarien einbezogen werden. Eine besondere Herausforderung stellen hierbei die Herstellungsprozesse auf der Baustelle dar, für welche bisher keine ausreichende Datengrundlage für die Ökobilanz vorhanden ist. Darüber hinaus werden über das Treibhauspotenzial hinaus weitere Wirkungskategorien nach DIN EN 15804:2022-03 bezüglich ihrer Relevanz für massive Verkehrswasserbauwerke untersucht.

Die Beispielschleuse dient zukünftig als Basis für vergleichende Untersuchungen alternativer Baustoffe und Bauweisen wie z. B. der Spundwandbauweise sowie zur gegenüberstellenden Betrachtung von Ersatzneubau und Grundinstandsetzung. Hierbei hat die Wahl der Systemgrenze für die Ökobilanzierung besonders sorgfältig zu erfolgen, um die Vergleichbarkeit der zu

untersuchenden Varianten angemessen zu gewährleisten. Durch die Bilanzierung weiterer beispielhafter Schleusen mit veränderter Kammerwandhöhe soll zusätzlich die Veränderung der ökobilanziellen Ergebnisse durch Variation der Fallhöhe ermittelt werden.

Literatur

- Becke, Alice; Reiners, Jochen; Phan, Andreas Tuan (2020): Umweltproduktdeklarationen für Beton – Erläuterungen zu den EPD's. InformationsZentrum Beton GmbH (Hg.). Erkrath: Verlag Bau+Technik GmbH. Online verfügbar unter <https://betonshop.de/media/wysiwyg/PDF/EPD-Begleitbroschuere-Beton-2020.pdf>, zuletzt geprüft am 13.11.2023.
- Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (Hg.) (2012): ZTV-W LB 215: Wasserbauwerke aus Beton und Stahlbeton (Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen – Wasserbau).
- Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen (Hg.) (2023): ÖKOBAUDAT - Version: 2023-I vom 15.06.2023 [Dataset]. Online verfügbar unter https://www.oekobaudat.de/no_cache/datenbank/suche/daten/db1.html#bereich1, zuletzt geprüft am 13.11.2023.
- Concrete Sustainability Council (2021): Hintergrundbericht – CO2-Modul. Berlin: Bundesverband der Deutschen Transportbetonindustrie e.V. (Hg.). Online verfügbar unter https://www.csc-zertifizierung.de/app/uploads/edd-free-downloads-cache/20211208_Hintergrundbericht_CSC-CO2-Modul.pdf, zuletzt geprüft am 13.11.2023.
- DIN 19702:2013-02: Massivbauwerke im Wasserbau - Tragfähigkeit, Gebrauchstauglichkeit und Dauerhaftigkeit. Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- DIN EN 15804:2022-03: Nachhaltigkeit von Bauwerken - Umweltproduktdeklarationen - Grundregeln für die Produktkategorie Bauprodukte; Deutsche Fassung EN 15804:2012+A2:2019 + AC:2021. Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- DIN EN ISO 14040:2021-02: Umweltmanagement - Ökobilanz - Grundsätze und Rahmenbedingungen (ISO 14040:2006 + Amd 1:2020); Deutsche Fassung EN ISO 14040:2006 + A1:2020. Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- European Federation of Concrete Admixtures Associations a.i.s.b.l. (EFCA) (2021a): Concrete admixtures – Air entrainers. Environmental Product Declaration EPD-EFC-20210193-IBG1-EN. Berlin: Institut Bauen und Umwelt e.V. (IBU) (Hg.). Online verfügbar unter https://muster-epd.deutsche-bauchemie.de/fileadmin/user_upload/EFCA-model-EPD_air_entrainers_final_2026-12-15.pdf, zuletzt geprüft am 13.11.2023.
- European Federation of Concrete Admixtures Associations a.i.s.b.l. (EFCA) (2021b): Concrete admixtures – Plasticizers and Superplasticizers. Environmental Product Declaration EPD-EFC-20210198-IBG1-EN. Berlin: Institut Bauen und Umwelt e.V. (IBU) (Hg.). Online verfügbar unter https://muster-epd.deutsche-bauchemie.de/fileadmin/user_upload/EFCA-model-EPD_plasticisers_superplasticisers_final_2026-12-15.pdf, zuletzt geprüft am 13.11.2023.

- Garrecht, Harald; Dorer, Christian; Hahn, Jakob (2015): Energetische Optimierung der Betonherstellung im Transportbetonwerk – Bestandsaufnahme und Ableitung von Optimierungspotenzialen. Stuttgart: Universität Stuttgart. Online verfügbar unter https://www.transportbeton.org/fileadmin/user_upload/Abschlussbericht_Energetische_Optimierung-2015-03-06.pdf, zuletzt geprüft am 13.11.2023.
- Hasselder, Marcel; Lühr, Stefan; Stephan, Christoph; Pahn, Matthias; Kaiser, Maximilian (2022): Fertigteile für den massiven Verkehrswasserbau - Entwicklung einer ressourcenschonenden, bedarfsgerechten und zukunftsorientierten Bauweise für Schleusenkammerwände. In: *punktum.betonbauteile* 6. S. 32-36. Online verfügbar unter <https://hdl.handle.net/20.500.11970/110700>.
- Jander, Albert (2012): Aktuelle Situation der Standardisierung von Schleusen. In: Bundesanstalt für Wasserbau (Hg.): *Innovation mit Tradition: Hydraulischer Entwurf und Betrieb von Wasserbauwerken*. Karlsruhe: Bundesanstalt für Wasserbau. S. 33-38. Online verfügbar unter <https://hdl.handle.net/20.500.11970/101985>.
- Shokri, Manouchehr; Traverso, Marzia (2023): Ökobilanzielle Untersuchung von Neubau- und Bestandswasserbauwerken – Bericht Modul 2 (unveröffentlichter Entwurf). Aachen: Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule (RWTH) Aachen.
- Wachholz, Thilo (2015): Standardisierung von Wasserbauwerken in der WSV. In: Bundesanstalt für Wasserbau (Hg.): *Wasserbauwerke - Vom hydraulischen Entwurf bis zum Betrieb*. Karlsruhe: Bundesanstalt für Wasserbau. S. 9-18. Online verfügbar unter <https://hdl.handle.net/20.500.11970/102268>.