

Schleusen, Wehre, Schiffshebewerke (1.3)

Mit oder ohne Fugen – Vorteile, Erfahrungen und Machbarkeit für eine neue Schleuse

Dipl.-Ing. Jörg Bödefeld

Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe

Dipl. Ing. Rainer Ehmann

Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe

1. Vorteile der fugenlosen Bauweise

1.1 Statische Robustheit

Fugenbehaftete Konstruktionen verhalten sich bei unterschiedlichen Setzungen einzelner Bereiche wie eine Gliederkette. Das Bauwerk entzieht sich der Zwangsbeanspruchung durch Verformung. Wenn diese Verformungen aus unterschiedlichen Gründen nicht aufgenommen werden können, kann nicht fugenbehaftet gebaut werden. Das dann erforderliche fugenlose Bauwerk hat eine sehr starke Robustheit gegenüber unterschiedlichen Setzungen, unvorhergesehenen Setzungen z.B. infolge von Bodenentzug und Setzungen bzw. Setzungsdifferenzen im allgemeinen. Fugenlose Bauteile haben ein großes Umlagerungsvermögen und sind damit sehr robust für unvorhergesehene Einwirkungen. Beispiele dafür sind:

- Kraftwerksbauten, deren Fundamentplatte auf Grund aufgesetzter Anlagenteile, die nur minimal unterschiedliche Setzungen vertragen können, fugenlos ausgebildet wurden;
- Wehranlagen, die auf Grund ihrer sensiblen Wehrklappen bzw. Wehrklappensteuerung verformungsarm auf einer monolithischen Sohlplatte gegründet wurden;
- Schiffsschleusenanlagen, die fugenbehaftet so große gegenseitige Verformungen einzelner Blöcke erzeugt hätten, dass die Fugen mit einer Breite von >10 cm hätten ausgebildet werden müssen, was mit Fugenbändern nicht mehr abzudichten ist. Mit fugenlosen Sohlen wurde das Problem bewältigt.

1.2 Erleichterungen bei der Herstellung des Bauwerks

Fugenkonstruktionen erfordern bei der Herstellung von der ausführenden Firma und der Überwachung des Auftraggebers eine hohe Sorgfalt. Besonders folgende Punkte sind zu beachten:

- Da die Fugenbänder zur Vermeidung von Baustellenstößen bereits in der Sohle in ganzer Länge eingebaut werden, ist eine sorgfältige Lagerung zur Vermeidung von Beschädigungen häufig über Jahre hinweg zu gewährleisten.
- Die Bereiche der Fugenbänder erfordern eine besondere Bewehrungsführung.

- Der Betoneinbau ist im Bereich der Fugenbänder sehr sorgfältig vorzunehmen, da auf Grund der Fugenbänder und der sie umgebenden Bewehrung die Einbausituation schwierig ist.

Die fugenlose Bauweise kennt diese Probleme nicht. Eine Einteilung in Betonierabschnitte erfolgt in Längsrichtung der Schleuse durch Arbeitsfugen, die mit Streckmetall und durchlaufender Bewehrung sicher ausgebildet werden können. Die einzelnen Betonierabschnitte können dabei wesentlich freier gewählt werden, was in der Praxis zu größeren Betonierabschnitten geführt hat.



Bild 1: Aufwändige Fugenbandkonstruktion

Die aufgezeigten Vorteile bei der Erstellung von fugenlosen Bauwerken werden von den Neubaudienststellen der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung bestätigt. Die unter Umständen auftretenden Mehrmengen an Bewehrung sowie der teilweise etwas größere Aufwand bei der Ausführungsstatik werden durchweg als gering in Bezug zu den Gesamtkosten eingestuft.

1.3 Vorteile im Rahmen der Bauwerksunterhaltung

Die großen Vorteile der fugenlosen Konstruktion liegen in ihrer Robustheit in der Unterhaltung während der gesamten Nutzungsdauer. Die Bundesanstalt für Wasserbau wird im Rahmen ihrer gutachterlichen Tätigkeit häufig mit Problemen an Fugenkonstruktionen bzw. mit Problemen auf Grund von undichten Fugenkonstruktionen konfrontiert. Beispielsweise seien an dieser Stelle aufgezählt:

- Schiefstellung von einzelnen Kammerblöcken auf Grund undichter Fugen
- Sackungen an der Geländeoberfläche infolge von Bodenentzug durch undichte Fugen
- abgeplatzte Fugenkanten an Fugenkonstruktionen
- zahlreiche Instandsetzungen an undichten Fugen

Diese Erkenntnis wird gestützt von Ergebnissen der Bauwerksinspektion. Die Wasser- und Schifffahrtsämter führen im 6-Jahres-Turnus Bauwerksprüfungen an Verkehrswasserbauwerken durch und dokumentieren vorgefundene Schäden. Statistische Auswertungen dieser Prüfberichte weisen ebenfalls einen größeren Anteil von Schäden an Fugenkonstruktionen aus.

Binnenschifffahrt, Binnenwasserstraßen und Binnenhäfen (1)

Mit oder ohne Fugen – Vorteile, Erfahrungen und Machbarkeit für eine neue Schleuse

Alle aufgezeigten Probleme treten bei fugenlosen Bauwerken nicht auf. Die Robustheit der Konstruktion in der Unterhaltung zeigt sich damit durch den Wegfall einer gesamten Schadensgruppe und - damit einhergehend - den Wegfall sehr aufwändiger Instandsetzungsmaßnahmen. Da die Folgeschäden z.B. durch Schiefstellung einzelner Bauteile sehr groß sein können und Instandsetzungen von Fugen sehr aufwändig sind, ist das wirtschaftliche Einsparpotential sehr groß.



Bild 2: Schaden an einem Fugenband

Die aufgezeigten Punkte werden von den Wasser- und Schifffahrtsämtern bestätigt. Im Zuständigkeitsbereich von 24 Ämtern (es gibt 27 Ämter mit fugenbehafteten Schleusen) sind bereits Schäden an Fugen aufgetreten. 17 der 24 Ämter mit Fugenschäden haben bereits Instandsetzungsmaßnahmen mit teilweise erheblichem Aufwand durchgeführt.

2 Historie der fugenreduzierten Bauweise

Die fugenreduzierte Bauweise stellt für Verkehrswasserbauwerke keine neue Technik dar. Bereits im 19. Jahrhundert wurden im Verkehrswasserbau Schleusen ohne Fugen gebaut. Beispiel dafür sind:

- Kleine Schleuse Kiel-Holtenau, Baujahr 1884 in Mauerwerksbauweise, 207 m lang und 77 m breit
- Seeschleuse Emden, Baujahr 1913 als verkleinertes Stampfbetonbauwerk, 300 m lang
- Schlepplugschleusen am Dortmund-Ems-Kanal, Baujahr ab 1910, teilbewehrter Beton als Trogrammen ohne Fugen, 190 m lang

- Schleuse Eisenhüttenstadt, Baujahr 1924 als Stahlbetonkonstruktion mit einer monolithischen Sohle und reduzierten Fugen in den Wänden, monolithische Sohle 105 m

Prinzipiell hat die fugenreduzierte Bauweise in den 90er Jahren des letzten Jahrhunderts eine Renaissance erfahren, da man auf Grund weitere Erkenntnisse über das Materialverhalten von Beton und moderner, Computer gestützter Rechenverfahren in der Lage ist, die Beanspruchung dieser Konstruktionen besser zu erfassen. Hervorzuheben sind dabei Fundamentplatten von Kraftwerken und monolithische Behälter.

In der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung wurde in jüngerer Zeit diese Konstruktionsart aufgegriffen:

- Weserwehr Bremen mit monolithischer Sohlplatte, in Betrieb seit 1993
- Schleuse Rothensee, längere Sohlabschnitte von ca. 45 m, in Betrieb seit 2001
- Schleuse Hohenwarthe, komplett monolithische Sohlplatte, in Betrieb seit 2003
- Schleuse Uelzen II, monolithische Sohlplatte mit monolithischen Wänden bis zur Unterkante integrierter Sparbecken (Betrieb ab 2006 geplant)
- Schleuse Sülfeld, monolithische Sohle und reduzierte Fugen in den Wänden (bis ca. 45 m Wandabschnitte), in Bau
- Schleuse Fankel, komplett monolithische Schleuse, Baubeginn in Kürze
- weitere komplett monolithische Schleusen befinden sich in Planung

3 Machbarkeitsstudie

Gegenüber der konventionellen, fugenbehafteten Konstruktion verändert sich beim fugenlosen Schleusenbauwerk im Wesentlichen nur die Beanspruchung in Schleusenlängsrichtung. Die Fugen werden in der Regel angeordnet, um eine auf das Bauwerk wirkende Zwangsbeanspruchung durch mögliche Verformungen aufzunehmen. Zu dieser Zwangsbeanspruchung zählen

- die Beanspruchung durch abfließende Hydrationswärme beim Abbinden des Betons (früher Zwang),
- die Setzungmulde des Gesamtbauwerks und
- die Beanspruchung durch saisonale Temperaturunterschiede im ausgehärteten Beton (später Zwang).

Bei fugenloser Stahlbetonbauweise muss diese Beanspruchung durch Beton und Bewehrung aufgenommen werden und ist folglich Gegenstand der durchzuführenden Untersuchungen. Der frühe Zwang wird dabei getrennt vom späten Zwang betrachtet. Schwinden und Kriechen spielen bei massiven Verkehrswasserbauwerken keine Rolle.

Die Dimensionierung der erforderlichen Bewehrung zur Beschränkung der Rissbreite bei frühem Zwang (abfließende Hydrationswärme) erfolgt getrennt für die Sohle und charakteristische Wandabschnitte gemäß „Merkblatt Früher Zwang“ der Bundesanstalt für Wasserbau. Machbarkeitsstudien der BAW weisen für die Sohle

einen etwas erhöhten Bewehrungsgehalt durch den Wegfall der Fugen aus. Die Größenordnung beträgt in Abhängigkeit des Untergrundes zwischen $30 \text{ cm}^2/\text{m}$ und $50 \text{ cm}^2/\text{m}$. Bei fugenbehafteter Bauweise reicht für die Sohlplatte (tragfähiger Untergrund vorausgesetzt) demgegenüber in der Regel die konstruktive Mindestbewehrung aus (maximal $25 \text{ cm}^2/\text{m}$). Für die Wände beeinflusst der Wegfall der Fugen die Beanspruchung bei abfließender Hydratationswärme nicht, da bereits die herkömmliche Blocklänge von 15 m zu lang ist, um die erforderliche Bewegung für den Abbau des Zwangs zu ermöglichen.

Die Beanspruchung aus Setzung muss am Gesamtmodell ermittelt und mit einer resultierenden Schnittgröße aus Temperatur am Querschnitt überlagert werden, siehe Bild 3. Zur Berechnung der Setzung sind heute standardmäßige FEM-Software und Halbraummodelle (Steifzifferverfahren) im Einsatz. Bei fugenbehafteter Bauweise sind diese Berechnungen ebenfalls erforderlich, um die Beanspruchungen der Fugenbänder zu bestimmen und diese richtig zu dimensionieren. Bei der fugenlosen Bauweise werden die Beanspruchungen im Bauwerk ermittelt. Die Bemessung erfolgt nach DIN 1045-1, 2001, als Nachweis im Grenzzustand der Tragfähigkeit, wobei auf Grund der Zwangsbeanspruchung der Teilsicherheitsbeiwert für die Einwirkungen auf 1,0 gesetzt wird.



Bild 3: Gesamtmodell der Schleuse mit veränderlichen Querschnitten

Zum Nachweis der Gebrauchstauglichkeit wird zuletzt noch überprüft, dass die rechnerische Rissbreite aus Setzungsbeanspruchung überlagert mit spätem Zwang $w_k = 0,25 \text{ mm}$ nicht überschreitet. Dabei wird vorausgesetzt, dass der Querschnitt aus frühem Zwang gerissen ist und somit bei spätem Zwang eine zusätzliche Beanspruchung nur aus dem Wirkungsbereich der Bewehrung auf die Bewehrung übertragen werden kann (abgeschlossene Rissbildung). Es ergeben sich damit bei 2-2,50 m dicken Querschnitten Bewehrungsgehalte von ca. $60 \text{ cm}^2/\text{m}$. Da das für die Problematik des späten Zwang angewendete Modell zur Zeit konservativ gewählt wurde ist mit zunehmendem Erfahrungsgewinn mit einer Reduktion der Bewehrung zu rechnen. Die Problematik ist zur Zeit Gegenstand von Forschungs- und Entwicklungstätigkeit, wozu auch eine messtechnische Begleitung der Vorhaben in situ gehört.

4 Zusammenfassung

Auf Grund von negativen Erfahrungen mit Fugenkonstruktionen im Verkehrswasserbau wurde in den vergangenen Jahren die monolithische Bauweise im Bereich der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes aufgegriffen und für Verkehrswasserbauwerke weiterentwickelt. Technisch sind monolithische Konstruktionen heute sowohl von der statisch-konstruktiven Planung als auch von der Baustofftechnologie her beherrschbar. Die bereits ausgeführten, fugenreduzierten Bauwerke belegen dies ebenso wie die durchweg positiven Erfahrungen der ausführenden Dienststellen. So wird es in naher Zukunft eine erste komplett monolithische Schleuse in Deutschland geben mit dem Anspruch, dass dieses Bauwerk die gleiche Robustheit aufweisen wird wie die monolithischen Schleusen, die bereits vor über 100 Jahren gebaut wurden.

Verfasser

Dipl.-Ing. Jörg Bödefeld
Referat Massivbau
Bundesanstalt für Wasserbau (BAW)
Kussmaulstrasse 17, 76187 Karlsruhe
Tel.: 0721 9726 – 3140
E-Mail: joerg.boedefeld@baw.de

Dipl.-Ing. Rainer Ehmann
Referat Massivbau
Bundesanstalt für Wasserbau (BAW)
Kussmaulstrasse 17, 76187 Karlsruhe
Tel.: 0721 9726 – 3760
E-Mail: rainer.ehmann@baw.de