

## Schwingungsanregung eines Schiebetores infolge Undichtigkeit am Drempel

F. Büsching, Braunschweig

### 1 Einleitung

Bereits zwei Jahre nach Inbetriebnahme einer Hafenschleuse an einem westdeutschen Tidefluß waren Schäden an den Laufrollen des Unterwagens des äußeren Schiebetores aufgetreten mit der Folge, daß die Schleuse für den Zeitraum der Reparatur stillgelegt werden mußte. Bei der Suche nach den Ursachen der insbesondere an der Lagerung der Laufrollen festgestellten Schäden wurden als Besonderheiten Undichtigkeits- und Schwingungserscheinungen des betreffenden Tores (verbunden mit Schlägeräuschen) ermittelt, deren Ausmaße markant von der am Tor in seiner Schließstellung vorhandenen Wasserspiegeldifferenz abhängig waren. Insbesondere mit Bezug auf die sich mit der Tide relativ zum Schleusenwasserstand ändernde Wasserspiegeldifferenz

$$H = OW - UW$$

konnten die betreffenden Erscheinungen drei Phasen etwa wie folgt zugeordnet werden:

*Phase I:*  $H < 0,6$  m; Undichtigkeit am Drempel; keine Schwingungen des Torkörpers;

*Phase II:*  $0,6 \leq H \leq 1,1$  m; Undichtigkeit am Drempel; Schwingungen des Torkörpers in Richtung der Schleusenachse mit einer Frequenz  $f \approx 2$  Hz und Amplituden  $\max A = \pm 2,5$  cm und

*Phase III:*  $H > 1,1$  m; keine Undichtigkeit; keine Schwingungen.

Da die betreffenden Schäden unter anderem auch durch die in Phase II vorhandenen Schwingungen begründet werden können, war für eine nachhaltige Schadensbeseitigung die Erklärung des Anregungsmechanismus unerlässlich.

### 2 Auflager- und Dichtungskonfiguration des Schiebetores

Da Schwingungen nur im Falle eines höheren Außenwasserstandes (im Vorhafen) relativ zum Kammerwasserstand aufgetreten waren, ist im Bild 1 auch nur dieser Lastfall des (beidseitig kehrenden) Schiebetores in der Aufsicht vereinfacht dargestellt. Demnach ist der Torkörper bezüglich der Wasserlast am Massivbauwerk der Schleusenammer in der Art eines Balkens auf zwei Stützen aufgelagert. Dabei sind als Auflagerelemente an beiden Seiten tropische Hartholzbalken (Bongossiholz) vorhanden, die gleichzeitig die Funktion der Seitendichtung übernehmen.

An der Unterkante des Tores ist demgegenüber eine Federblechdichtung vorhanden, die bei Schiebetoren noch immer eine übliche Konstruktion darstellt (Bild 2).

In der Schließposition des Tores (Bild 1) soll hierbei bekanntlich die Dichtigkeit an der Torunterkante durch den hydrostatischen Wasserdruck auf der Oberwasserseite (hydraulisches Dichtungsprinzip) erzielt werden. Im vorliegenden Fall war die sich aus der Geometrie des Tores ergebende horizontale Wasserlast mit der Kinematik zur Aufnahme des Toreingewichtes in der Weise abgestimmt, daß bereits rechnerisch eine Wasserspiegeldifferenz von

$$H < = 0,10$$
 m

ausreichen sollte, um nach Ausführung einer Translationsbewegung von 25 mm das Tor in die planmäßige Schließlage zu bringen. Eine Verformung des Federblechs – wie etwa in Bild 2 dargestellt – sollte hierzu nicht erforderlich sein.

Wie bereits eingangs dargelegt, wurde hingegen eine befriedigende Schließlage bei Wasserspiegeldifferenzen

$$H < = 1,1$$
 m

tatsächlich nicht erreicht. Die Undichtigkeit an der Torunterkante war dabei durch Abweichungen der Drempelecke von der örtlich unterschiedlichen Position der Federblechdichtung bedingt und war durch Schlickaufwirbelung deutlich nachweisbar.



Bild 1. Anordnung des Schiebetores im Grundriß

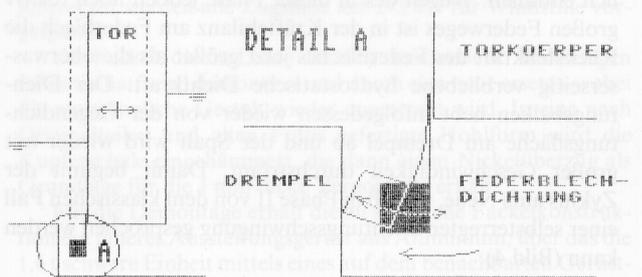
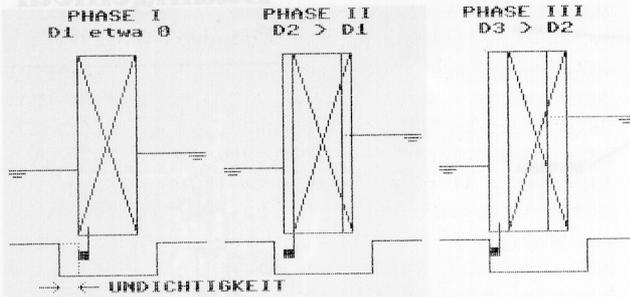


Bild 2. Schwingungsbewegungen von Torkörper und Federblech in Phase II

Prof. Dr.-Ing. F. Büsching vertritt seit 1984 das Fachgebiet Wasserbau und Wasserwirtschaft an der FH Bielefeld, Abteilung Minden, Fachbereich Bauingenieurwesen.



**Bild 3.** Verringerung der Undichtigkeit am Drempel infolge zunehmender Torkörperdurchbiegung  $D$

**3 Mechanismus der Schwingungsanregung**

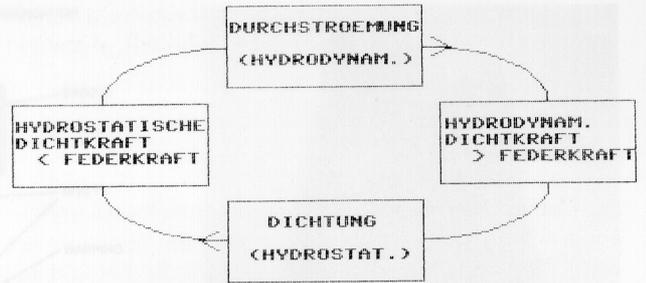
Im Gegensatz zu den insbesondere aus dem Wehrbau bekannten Schwingungsanregungsmechanismen bei planmäßiger Über-, Unter- oder auch gleichzeitiger Über- und Unterströmung der Stahlwasserbaukonstruktion ist im vorliegenden Falle die Ursache der beobachteten Schwingungsanregung offenbar in der *unplanmäßigen* Umströmung der Federblechdichtung zu suchen. Wie nachfolgend dargestellt wird, ist auch hier, wie bei den meisten aus der Literatur bekannten Dichtungsschwingungen [1, 3] die elastische Verformung auch der Stahlkonstruktion als ganzer von besonderer Bedeutung.

Im Bild 3 ist die Änderung der relativen Lage der Federblechdichtung zur Gegendichtungsfläche an der Drempelkante in Abhängigkeit von der mit zunehmender Wasserspiegeldifferenz zunehmenden Torkörperdurchbiegung  $D$  dargestellt. Demnach können die Verhältnisse der Phase I dadurch erklärt werden, daß die Wasserspiegeldifferenzen  $H < 0,6$  m nur sehr kleine Torkörperdurchbiegungen erzeugen und dementsprechend der relativ große Spalt mit kleiner Geschwindigkeit durchströmt wird. Darüber hinaus ist auch die Steifigkeit des Federbleches gegenüber den bei der Durchströmung auftretenden hydraulischen Kräften am Dichtungsbalken zu groß, als daß Dichtung erzielt werden könnte.

Nimmt der Wasserstand außen zu, so liegt mit  $D2 > D1$  ein Zustand vor, in dem – einerseits wegen des verkleinerten Durchströmquerschnittes und andererseits bedingt durch die größere Wasserspiegeldifferenz am Tor – der Spalt mit wesentlich größerer Geschwindigkeit durchströmt wird. Im Spalt tritt jetzt – insbesondere verbunden mit der hinter der scharfen Kante des Dichtungsbalkens zu erwartenden Ablösungszone – ein Unterdruck auf mit der Folge, daß die in Schließrichtung wirkenden hydraulischen Kräfte an der Federblechdichtung momentan größer werden als die Federkraft (Rückstellkraft). Das Federblech wird ausgelenkt und der Spalt ist (örtlich) geschlossen (Bild 2).

In diesem Moment liegen aber annähernd hydrostatische Verhältnisse am Dichtungsbalken vor, und die in Schließrichtung wirkende hydrodynamische Sogkraft ist augenblicklich entfallen. Wegen des in dieser Phase jedoch noch relativ großen Federweges ist in der Kräftebilanz am Federblech die Rückstellkraft des Federbleches jetzt größer als die oberwasserseitig verbliebene hydrostatische Dichtkraft. Der Dichtungsbalken hebt infolgedessen wieder von der Gegendichtungsfläche am Drempel ab und der Spalt wird wieder mit großer Geschwindigkeit durchströmt. Damit beginnt der Zyklus aufs Neue, so daß in Phase II von dem klassischen Fall einer selbsterregten Dichtungsschwingung gesprochen werden kann (Bild 4).

Bezüglich der Schwingbewegung des gesamten Torkörpers (in seiner 1. Eigenfunktion als gelenkig aufgelagerter Balken auf zwei Stützen) ist hinzuzufügen, daß neben den vom Feder-

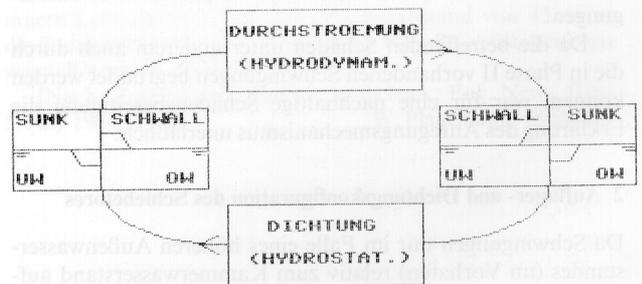


**Bild 4.** Selbsterregung am Federblech infolge von Durchflußschwankungen

blech ausgehenden periodischen Kraftwirkungen noch ein weiterer hydraulischer Effekt beteiligt ist: Die mit dem beschriebenen Mechanismus (an der Federblechdichtung) erzeugten Durchflußschwankungen stellen im Zusammenhang mit der Strömungsträgheit ober- und unterwasserseitig die Ursache für Druckänderungen an den Stauwänden des Torkörpers noch in beträchtlicher Entfernung vom Ort der Durchströmung dar [2].

Dementsprechend kommen jeweils entgegengesetzte Wasserspiegelauslenkungen in Ober- und Unterwasser zustande, je nachdem, ob der Dichtungsspalt plötzlich geöffnet oder geschlossen wird. Die auf diese Weise erzeugten Schwall- und Sunkerscheinungen stellen einerseits selbst bereits Wellen dar, unterstützen andererseits aber noch die beobachteten horizontalen Torauslenkungen (in Richtung der Schleusenachse), die ihrerseits zur Wellenerzeugung in Ober- und Unterwasser beitragen. Demnach kann auch bezüglich der Torkörperbewegung von einer selbsterregten Schwingung (durch Rückkopplung) gesprochen werden.

Im zugehörigen Kreislaufdiagramm (Bild 5) sind der Übersicht halber Schwall- und Sunkerscheinungen nur prinzipiell (bezogen auf gleiche Momentanwasserstände in Ober- und Unterwasser) dargestellt. Tatsächlich liegt jedoch wegen des im zeitlichen Mittel höheren Oberwasserstandes eine Schwellbelastung des Torkörpers vor.



**Bild 5.** Selbststeuerung der Torkörperschwingung infolge von Durchflußschwankungen

In der Phase III ist schließlich bei der Wasserspiegeldifferenz  $H > 1,1$  m ein solches Durchbiegungsmaß  $D3 > D2$  erreicht, daß sich eine Auslenkung des Federbleches gegebenenfalls vollständig erübrigt, um Dichtigkeit am Drempel zu erzielen. Zumindest ist aber der verbleibende Spalt so klein, daß die bei dessen Abdichtung erzeugte Federkraft ständig von der oberwasserseitigen hydrostatischen Dichtigkeit überdrückt wird. Umgekehrt ist aber auch denkbar, daß – bei weiterem Anstieg der Wasserspiegeldifferenz – die Federblechdichtung infolge übermäßiger Durchbiegung des Torkörpers

sogar durch die Behinderung am Drempel negativ, d. h., entgegen der Richtung der hydraulischen Dichtkraft, ausgelenkt wird.

#### 4 **Schlußfolgerungen**

Die Gefahr des Auftretens hydroelastischer Schwingungen ist bei Stahlwasserbaukonstruktionen trotz der im Laufe der Jahre gesammelten Erfahrungen bezüglich der Formgebung derartiger Strukturen auch heute noch aktuell. Dies hat u. a. damit zu tun, daß mit der Anwendung aufwendigerer statischer Berechnungsverfahren und durch den Konkurrenzkampf der Herstellerfirmen die Konstruktionen immer leichter geworden sind. Bei der gleichzeitig zu beobachtenden Entwicklung zu immer größeren Bauwerksdimensionen (Stützweiten, Druckhöhen) dürfte sich im Hinblick auf die Steuerung instationärer Anregungskräfte die Frage nach den Steifigkeitsverhältnissen auch in Zukunft stets aufs Neue stellen – ganz zu schweigen davon, daß selbstverständlich eine vorherige Berücksichtigung unplanmäßiger Lastzustände nicht möglich ist.

Im vorliegenden Falle ist als Schwingungsursache die Undichtigkeit am Drempel einerseits auf eine unzureichende Maßhaltigkeit der Drempelkante und/oder andererseits auf das von der Vorausberechnung abweichende Durchbiegungs-

maß des Torkörpers zurückzuführen. Nachdem diese Ursachen einmal bekannt waren, hat der Bauherr auch nahezu vollständige Dichtigkeit – und damit die Beseitigung der Schwingungen – dadurch erreichen können, daß der Dichtungsbalken den Unregelmäßigkeiten der Drempelkante angepaßt und darüber hinaus die Steifigkeit des Federblechanschlusses am Torkörper herabgesetzt wurde. Kritisch bleibt jedoch zu bemerken, daß die im Normalfall bei einer Federblechdichtung erforderliche Verarbeitung dreier unterschiedlicher Werkstoffe (Stahl, tropisches Hartholz und Gummi) immer zu einer unübersichtlichen Beanspruchung der gesamten Dichtungskonfiguration führt. Diese hat in der Vergangenheit wiederholt die Folge gehabt, daß die eigentlich als robust bekannte Federblechdichtung an ihren Verbindungsmitteln versagt hat.

#### **Literatur**

1. Kolkman, P. A.: Development of vibration-free gate design: Learning from experience and theory. IAHR-IUTAM Symp. Karlsruhe 1979. Berlin, Heidelberg, New York: Springer 1980
2. Miller, C.: Ein Beitrag zur Bestimmung der Schwingungserregenden Kräfte an unterströmten Wehren, Inst. für Wasserbau, Univ. Stuttgart, Publ. 42, 1977
3. Petrikat, K.: Seal vibrations. IAHR-IUTAM Symp. Karlsruhe 1979. Berlin, Heidelberg, New York: Springer 1980