

Physikalische Modellversuche für das Sperrwerk in der Ems

Dipl.-Ing. S. Dunker, Dipl.-Ing. J. Hinsch, Dipl.-Ing. C. Lichy, Dipl.-Ing. T. Linke, Dr.-Ing. H. Schwarze, Dipl.-Ing. O. Stoschek, Dipl.-Ing. G. Streich, Prof. Dr.-Ing. C. Zimmermann

1. Aufgabenstellung

Das Land Niedersachsen, vertreten durch das PROJEKTEAM "BAU EINES EMSSPERRWERKES" der BEZIRKSREGIERUNG WESER-EMS in Oldenburg als Träger des Vorhabens, baut seit 1998 im Rahmen von Küstenschutzmaßnahmen als Alternative zur Erhöhung und Verstärkung der Deiche des Emsästuars die Errichtung eines Sturmflutsperrwerkes in der Ems bei Gandersum (Ems-km 32,2, Abb. 1). Des weiteren soll durch das Sperrwerk - bei gleichzeitiger Staufunktion nach oberstrom - eine höhere Flexibilität des Schifffahrtsweges Unterems, z.B. zur Überführung großer Werftschiffe von Papenburg zur See, erreicht werden.

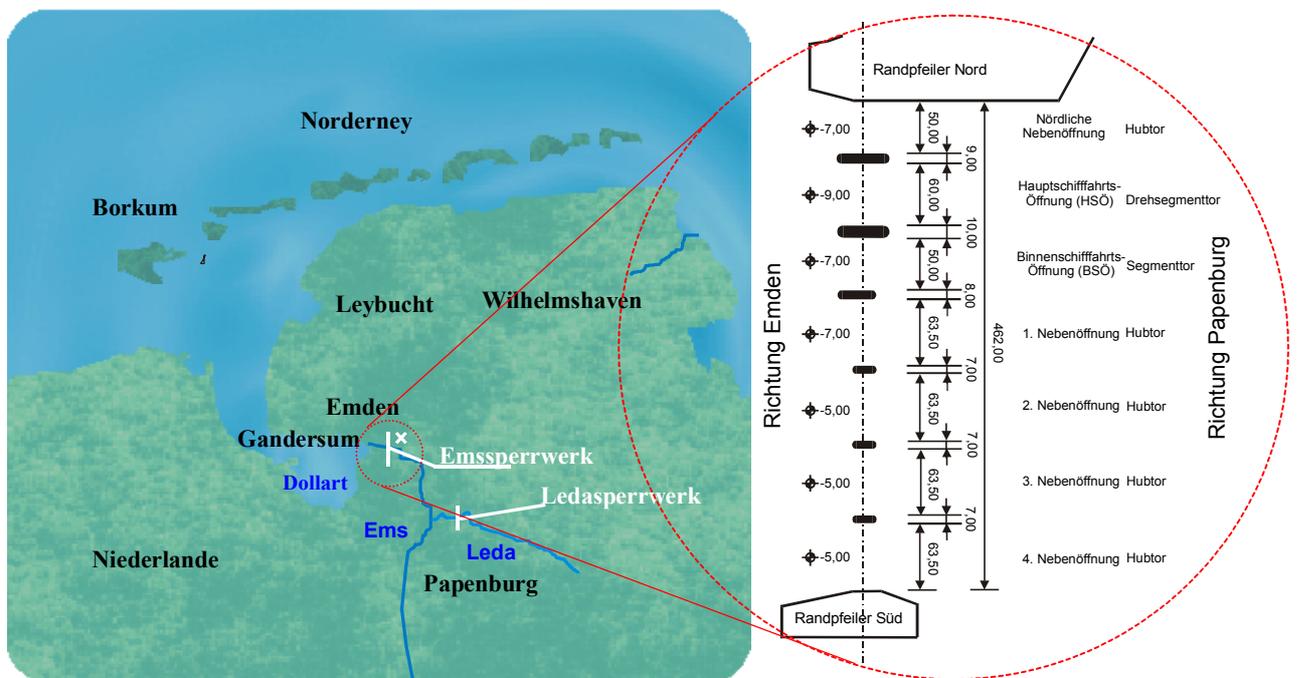


Abb. 1: Lageplan des Emssperrwerkes

Im Rahmen der Planung und Errichtung des Emssperrwerkes werden im FRANZIUS-INSTITUT FÜR WASSERBAU UND KÜSTENINGENIEURWESEN DER UNIVERSITÄT HANNOVER hydraulische Untersuchungen in verschiedenen physikalischen Modellen durchgeführt. Die Ergebnisse sollen Grundlage für den sicheren Betrieb des Sperrwerkes, für die Beurteilung der Sicherheit und Leichtigkeit des Schiffsverkehrs und die Überströmung der Vorland- und Uferbereiche sowie für die Bemessung des erforderlichen Sohlschutzes am Sperrwerk sein.

Mit diesen Modelluntersuchungen von Strömungen und Wasserständen im Nahbereich des Sperrwerkes werden die bei der BUNDESANSTALT FÜR WASSERBAU, AUBENSTELLE KÜSTE (BAW AK), Hamburg, durchgeführten numerischen Simulationen des Sperrwerkeinflusses auf Wasserstände und Strömungsverläufe in der Tideems und in der Außenems bei normalen Tiden und bei Sturmfluten ergänzt.

Die Modelluntersuchungen wurden und werden durchgeführt für:

- verschiedene Bauzustände des Sperrwerkes
- verschiedene Betriebsarten und Betriebszustände des Sperrwerkes
 - Sperrwerk zur Sturmflutkehrung
 - Sperrwerk zur Entlastung besonders hoch auflaufender Sturmfluten
 - Sperrwerk als Stauwehr (Überführung von Werftschiffen mit besonders großem Tiefgang von Papenburg emsabwärts)
- verschiedene Zustände, in denen eine oder mehrere Sperrwerkstore nicht betrieben werden können (n-1)-, (n-2)-Fälle)
- Belastungen von Sperrtorelementen durch Seegang und strömungsbedingte Schwingungen.

Entsprechend den beschriebenen Aufgaben wurden verschiedene physikalische Modelle für die Untersuchung der Strömungsverhältnisse eingesetzt.

2. Durchführung der Modelluntersuchungen

2.1 Voruntersuchungen mit einem aerodynamischen Modell

In den Sperrwerksöffnungen und in den Bereichen ober- und unterhalb der Öffnungen werden aufgrund der zum nördlichen Ufer zunehmenden anteiligen Durchflüsse in der Ems in den vier nördlichen Sperrwerksöffnungen, mit tiefer liegenden Drepeln als in den vier südlichen, unterschiedliche Durchflüsse und Strömungen in den einzelnen Sperrwerksöffnungen auftreten. Die Beaufschlagung kann auch noch dadurch verändert werden, wenn ein oder mehrere Tore gar nicht ((n-1)-, (n-2)-, ...Fall) geschlossen oder geöffnet werden können. Während der Bauzeit des Sperrwerkes werden in den einzelnen Bauphasen bestimmte Bereiche des Emsquerschnittes durch eingespundete Baugruben verbaut. Dadurch werden in den verbleibenden Querschnittsteilen größere Durchflüsse als im unverbauten Querschnitt herrschen.

Aus diesem Grund sollen die verschiedenen Betriebs- und Bauzustände in einem aerodynamischen Modell untersucht werden, um qualitative Aussagen über die Strömungsverläufe machen zu können. Für die Untersuchungen wurde ein aerodynamisches Modell des Emsbereiches von 1.000 m oberhalb bis 1.500 m unterhalb des Sperrwerkes im Maßstab 1:750 aufgebaut. Aufgrund der Entwicklung besonderer konstruktiver Maßnahmen ist dieses Modell geeignet, für stationäre Wasserstände, Strömungsgeschwindigkeiten und -richtungen (Flut- und Ebbestrom) zu verschiedenen Tidephasen eingesetzt zu werden. Zur Beurteilung der Sohlströmungsverhältnisse wurde ein Erosionsverfahren verwendet. Dieses wurde durch Auftragen eines Öl-Pigment-Gemisches auf die Modelloberfläche realisiert. Eine Luftströmung bewirkt, daß das Öl-Pigment-Gemisch über die Modelloberfläche fließt. Hierbei entstehen streifenförmige Pigmentablagerungen, die den Stromlinien folgen (Abb. 2).

Die Modellversuche haben qualitative Hinweise besonders auf kritische Durchfluß- und Strömungszustände in bestimmten Betriebszuständen und Tidephasen geliefert, die u.a. Grundlage für die Aufstellung des Versuchsprogramms für Untersuchungen in einem hydraulischen Tidemodell waren.

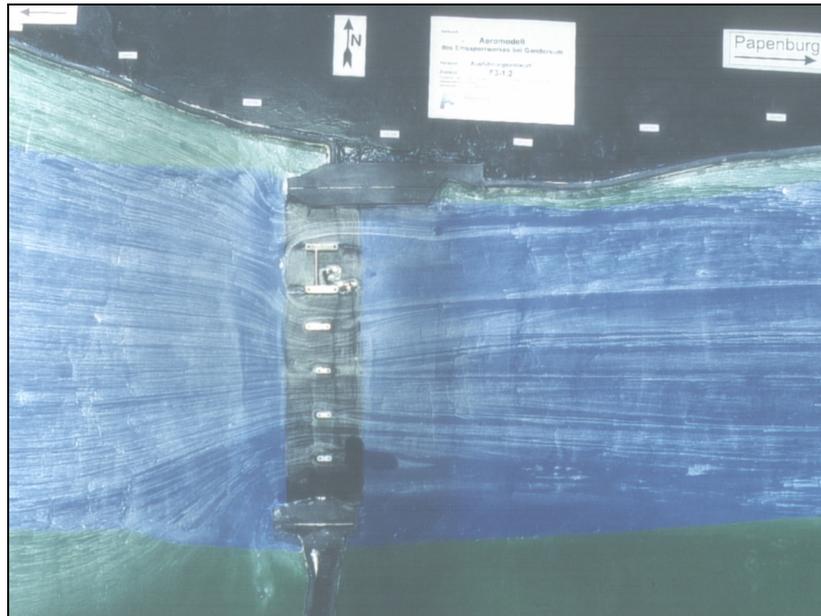


Abb. 2: Sohlstromlinien im (n-1)-Fall mit geschlossener Hauptschiffahrtsöffnung (Flutstrom, Sturmflut)

2.2 Strömungsgeschwindigkeiten zur Sicherung der Sohle im Bereich des Sperrwerkes

Während der Öffnungs- und Schließvorgänge können unter den Verschlüssen sowie unmittelbar ober- und unterhalb der Drempe sehr hohe Strömungsgeschwindigkeiten auftreten. Sie können zu Erosion in der Emssohle (Kolken) führen, wenn nicht besondere Maßnahmen zum Schutz der Flußsohle durchgeführt werden. Grundlage für die Bemessung der notwendigen Sohlenschutzsysteme sind die maximal auftretenden Strömungsgeschwindigkeiten im Sperrwerksbereich, die bei den unterschiedlichen Betriebsarten des Sperrwerkes während der jeweiligen instationären Betriebsabläufe herrschen. Durch Untersuchungen im hydraulischen Modell sollten die für den Sohlenschutz maßgeblichen Strömungsgeschwindigkeiten in einzelnen Sperrwerksabschnitten mit jeweils unterschiedlicher Gestaltung und Durchflußbeaufschlagung ermittelt werden.

Dazu wurden in einer Strömungsrinne des FRANZIUS-INSTITUTS Untersuchungen im Maßstab 1:25 zur Ermittlung der Strömungsverteilungen (Geschwindigkeiten und Richtungen) im Nahbereich des Sperrwerkes und in den Sperrwerksöffnungen in Abhängigkeit von Wasserständen ober- und unterhalb des Sperrwerkes (Wassertiefen, Wasserstandsunterschiede) und von den Öffnungshöhen der Sperrwerksverschlüsse als Grundlage für die Festlegung der notwendigen Sohlensicherungen in stationären Zuständen durchgeführt. Die hydrologischen Randbedingungen (Wasserstände, Durchflüsse) wurden nach hydraulischen Berechnungen festgelegt.

In einer 2,68 m breiten und 14 m langen Strömungsrinne mit einer Meßstrecke von 7 m Länge wurde jeweils ein Sperrwerkspfeiler mit beiderseits je einer halben Sperrwerksöffnung eingebaut (Abb. 3). Die unterschiedlichen Sperrwerksverschlüsse (Hubtore, Segmentverschlüsse und Drehsegmentverschluß) mit entsprechenden Drempehöhen in den Öffnungen und Pfeilerausbildungen werden berücksichtigt. Die Modellsohle ist entsprechend der in der Natur erforderlichen Sohlensicherung mit verklammertem Steinschotter (rd. 15 mm) nachgebildet. In dem Modell konnten stationäre Durchflüsse und Wasserstände entsprechend der ausgewählten Szenarien eingestellt werden. Strömungsgeschwindigkeiten und -richtungen wurden mit einer 3D-Ultraschall-Strömungssonde an insgesamt ca. 180 Meßpunkten jeweils 5 cm (1,25 m in der Natur) über der Sohle gemessen (Abb. 4). Grundlage

für die Festlegung der Versuchsvarianten zur Ermittlung der Strömungsverhältnisse im Sperrwerksbereich sind die o.g. verschiedenen Betriebsarten des Sperrwerks.

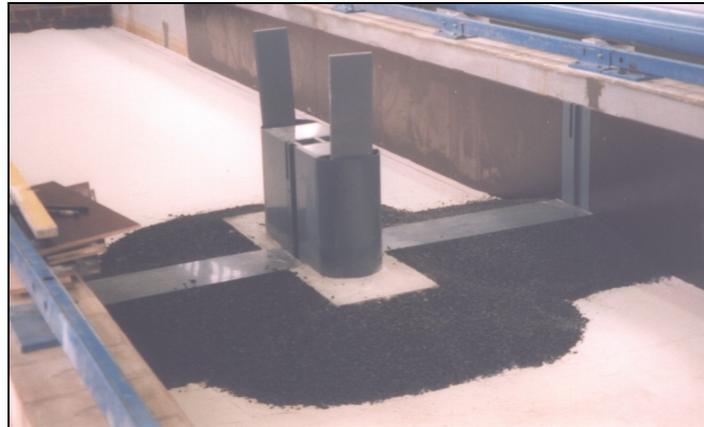


Abb. 3: Modellaufbau, 2D-Strömungsrinne

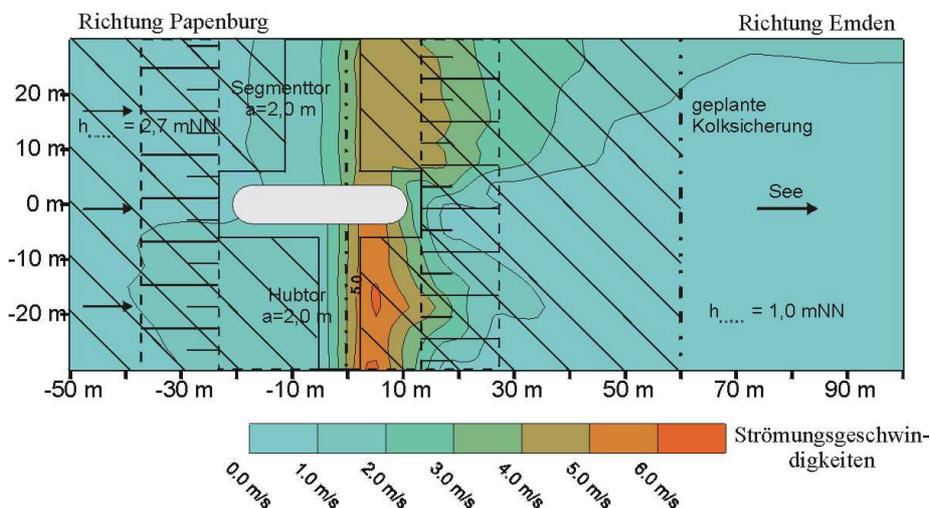


Abb. 4: Pfeiler mit Segment- und Hubtor in den Sperrwerksöffnungen, Stauraumentleerung

Die größten Strömungsgeschwindigkeiten in den Sperrwerksöffnungen wurden mit $v=8,4\text{ m/s}$ unmittelbar unterhalb der Sperrtorunterkante noch über dem Betondrempel gemessen. Infolge der Ausbreitung des Durchflußstrahles insbesondere nach oben, aber auch auf der an den Drempel anschließenden Sohlenböschung nach unten, nimmt die Strömungsgeschwindigkeit rasch ab. Eine entsprechend bemessene Sohlensicherung kann rd. 45 m unterhalb (Stauraumentleerung) bzw. oberhalb (Sturmflutentlastung) der Sperrwerksachse mit der notwendigen Sicherung in die normale Emssohlen übergehen.

2.3 Instationäre Strömungszustände in der Ems und im Sperrwerk beim Betrieb des Sperrwerkes

Im Hinblick auf den sicheren Betrieb des Sperrwerkes, auf die Standfestigkeit der Sohlensicherung ober- und unterhalb des Sperrwerkes, auf die Sicherheit und Leichtigkeit des Schiffsverkehrs und auf die Überströmung der Vorland- und Uferbereiche müssen die instationären Strömungsgeschwindigkeiten und -richtungen, die sich während der verschiedenen Betriebsarten im Bereich ober- und unterhalb des Sperrwerkes einstellen, sowie im di-

rekten Nahbereich des geplanten Sperrwerkes, ermittelt werden. Es werden für Normaltiden und Sturmflutereignisse instationäre Durchflüsse und Strömungen bei folgenden Bauzuständen, Betriebsarten und Betriebszuständen im Modell untersucht:

1. Bauphasen des Sperrwerkes
 - Sperrwerk im Bauzustand in Bauphasen mit dem größten Verbau des Emsquerschnittes durch Baugrubeneinfassungen bei Normaltiden und bei Sturmflut
 - Wasserstandsmessungen im Bereich der Baugrube der Hauptschiffahrtsöffnung
2. Vollständig geöffnetes Sperrwerk bei Normaltiden und bei auflaufender Bemessungssturmflut bis zum Sperrwasserstand
3. Teilweise geschlossenes Sperrwerk ((n-1)-, (n-2)-Fälle) bei Normaltiden
4. Betrieb des Sperrwerkes zur Sturmflutkehrung
 - Planmäßiges Schließen bei auflaufender Bemessungssturmflut
 - Schließen bei offener Hauptschiffahrtsöffnung (HSÖ) bzw. bei offener Hauptschiffahrtsöffnung und Binnenschiffahrtsöffnung (HSÖ und BSÖ)
 - Schließen und zeitweises Öffnen des Sperrwerkes bei einer besonders hoch auflaufenden Sturmflut (Bemessungssturmflut der Niederländer) zur Sturmflutentlastung
 - Öffnen des Sperrwerkes bei ablaufender Sturmflut nach Erreichen des Ausspiegelungswasserstandes
5. Betrieb des Sperrwerkes für den Aufstau der Ems oberhalb des Sperrwerkes
 - Schließen des Sperrwerkes zur Stauroauffüllung
 - Öffnen des Sperrwerkes nach Abschluß der Stauphase zur Abführung des Aufstauvolumens
6. Auswertungen von Querströmungen entlang eines angenommenen Schiffsfahrweges für die Betriebsfälle (n-1) und (n-2)
7. Entwicklung eines Spülbetriebes zur Beseitigung von Sedimentablagerungen im Bereich der HSÖ.

Die Untersuchungen werden in einem hydraulischen Tidemodell mit fester Sohle im Maßstab 1:60 durchgeführt. In dem Modell wird ein Bereich der Ems von rd. 1.500 m unterhalb und rd. 1.000 m oberhalb des geplanten Emssperrwerkes nachgebildet. Das Sperrwerk mit den Pfeilern, Drepeln und Toren wurde aus Beton bzw. Alu- oder Kunststoffteilen voll funktionsfähig naturähnlich nachgebaut (Abb. 5).

Die maßgebenden Tideverhältnisse, wie Normaltide und verschiedene Sturmfluten, werden nach den Simulationen der BAW-AK an der unterstromigen Modellgrenze durch eine Wasserstandssteuerung und an der oberstromigen Modellgrenze über eine Durchflußsteuerung kontrolliert. Die flächenhaften Strömungsverteilungen werden nach Luftbildaufnahmen von Treibkörpern mit einer Videokamera in Zeitraffertechnik und mit Fotokameras als Einzelbilder zu verschiedenen Tidezeiten ermittelt (Abb. 6). Punktuelle Strömungsmessungen werden mit entsprechenden Strömungssonden durchgeführt.

Für den Betrieb des Sperrwerkes in den verschiedenen Betriebsarten und -zuständen werden, insbesondere unter Beachtung der für Sohlensicherung zulässigen maximalen Strömungsgeschwindigkeiten, Vorschläge für den Ablauf des Schließens und des Öffnens der Sperrwerkstore in den dafür jeweils vorgesehenen Zeiten ermittelt.

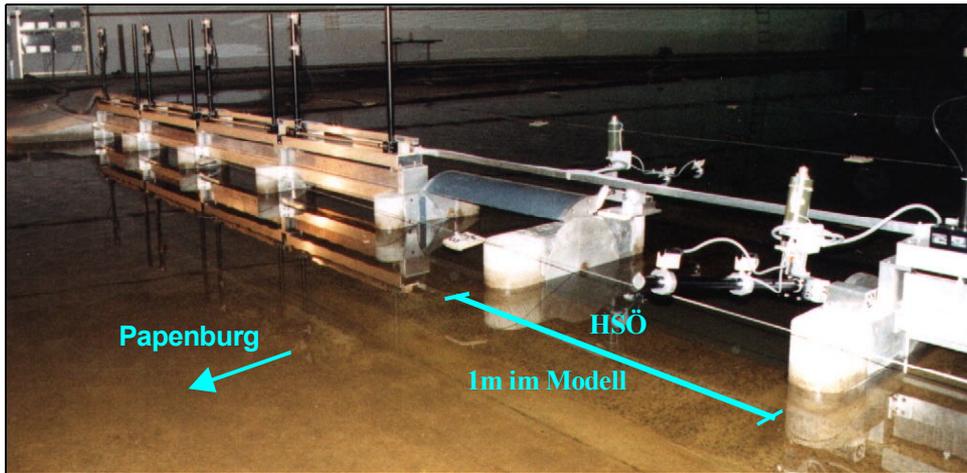


Abb. 5: Modell des Emssperrwerkes

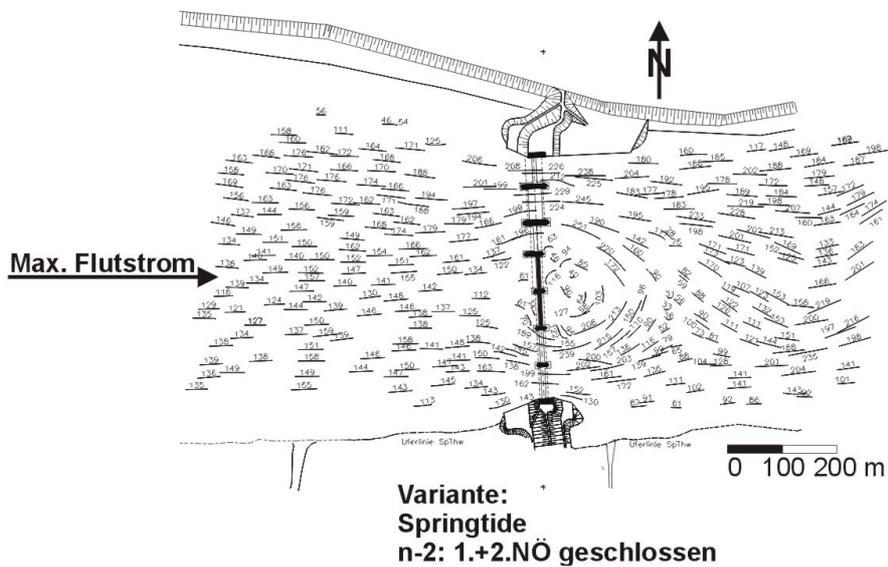


Abb. 6: Ergebnis aus den Untersuchungen am Tidemodell

2.4 Belastungen des Drehsegmenttores in der Hauptschiffahrtsöffnung im abgesenkten Zustand durch Wellen

Das Emssperrwerk wird in der Hauptschiffahrtsöffnung einen als Drehsegmenttor ausgebildeten Verschlusskörper erhalten. Das Segment ist seitlich an kreisförmigen, geschlossenen Scheiben gehalten. Für den Lastfall „abgesenkter Verschluss bei Seegang“ sind Druckunterschiede am Scheibenkörper infolge unterschiedlicher Wasserstände auf der dem Seegang unmittelbar ausgesetzten Scheibenvorderseite und dem Wasserstand an der Scheibenrückseite in der Pfeilernische nicht auszuschließen (Abb. 7a). Da die auftretenden Strömungs- und Ausgleichvorgänge zwischen den wellenbedingten Wasserstandsänderungen vor der Scheibe und in der Nische durch einen rd. 0,2 m breiten Spalt zwischen Nischen- und Scheibenrand sehr komplex sind und nicht mit Standardverfahren beurteilt werden können, wurden zur Einschätzung der infolgedessen auftretenden horizontalen Lagerkräfte hydraulische Modelluntersuchungen durchgeführt .

Neben Belastungen aus Seegang können auch langperiodische, auf die Seitenscheiben auftreffende Schiffswellen, zu horizontalen Belastungen infolge dabei auftretender Druckunterschiede zwischen Scheibenvorderseite und der

Scheibenrückseite in der Pfeilernische führen. Das Untersuchungsprogramm wurde daher auf die grundsätzlichen Auswirkungen der Belastungen durch langperiodische Wellen erweitert, wobei besonders der Einfluß von Entlastungsöffnungen in den Seitenscheiben untersucht werden sollte.

Als Seegang sollten dabei zunächst regelmäßige Wellen mit Wellenparametern der maximal zu erwartenden Wellen eingesteuert werden. Als weiterer wichtiger Parameter für die Belastung der Seitenscheiben war in den Untersuchungen der Wasserstand am Sperrwerk zu variieren. Die Untersuchungen wurden im 2,20m breiten Wellenkanal des FRANZIUS-INSTITUTS am Schneiderberg im Maßstab 1:25 durchgeführt. Der zu untersuchende Pfeiler der Hauptschiffahrtsöffnung des Emssperrwerkes (Abb. 7b) wurde in der 118m langen Rinne in rd. 30m Abstand vom Wellenerzeuger installiert. Zur Messung der horizontalen Kraftkomponenten auf die freigelagerte Scheibe infolge von Wasserstandsunterschieden zwischen der Schiffahrtsöffnung und der Pfeilernische wurden insgesamt drei Wägezellen benutzt.

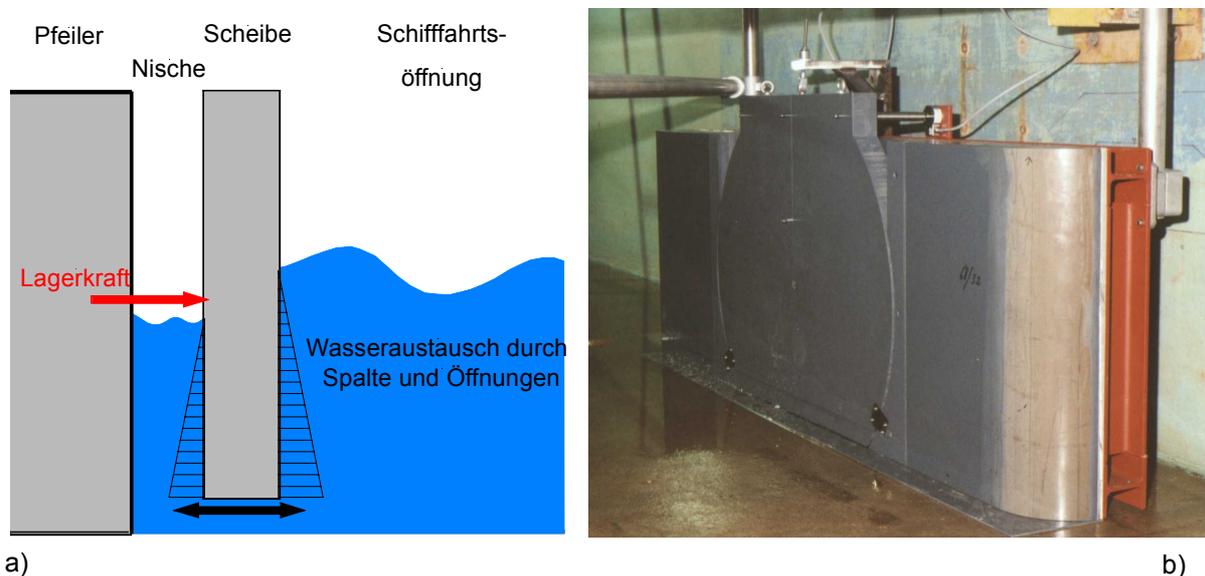


Abb. 7: a) Kräfte an der Scheibe der Hauptschiffahrtsöffnung,
 b) Modell des Pfeilers der Hauptschiffahrtsöffnung im Wellenkanal des FRANZIUS INSTITUTS

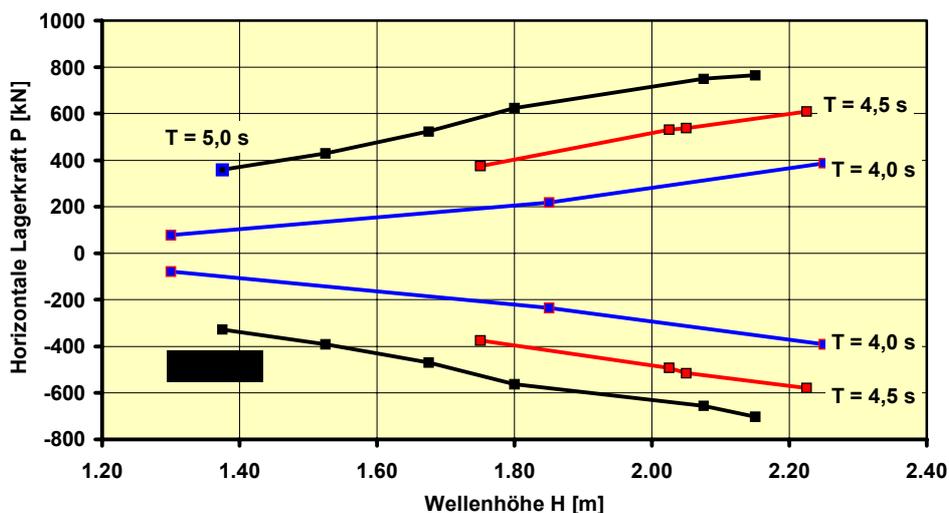


Abb. 8: Einfluß von Wellenhöhe und -periode auf die Lagerkräfte

Maximale horizontale Lagerkräfte können bei Wellen mit einer Periode von $T=5s$ und einer Wellenhöhe von $H=2,15m$ mit $P \approx \pm 700kN$ auftreten. Die horizontalen Lagerkräfte nehmen nahezu linear mit zunehmender Wellenhöhe und -periode zu (Abb.8).

2.5 Gefährdung der Verschlüsse durch strömungsinduzierte Schwingungen:

In der Planungsphase des Emssperrwerkes stellte sich unter anderem die Frage nach Betriebs- und Strömungszuständen bei unterschiedlichen Stellungen der Verschlußorgane der Durchflußöffnungen, die zu strömungsinduzierten Anfachungen von Schwingungen führen können (Abb. 9). Diese können u. a. durch formbedingte Strömungsablösungen an den Verschlußorganen, die Druckschwankungen hervorrufen, entstehen. Die Auswirkungen der Schwingungen hängen von ihrer Frequenz und Amplitude ab (Abb. 10) und können, z. B. an den Dichtungen der Verschlußorgane, oder sogar am Bauwerk insgesamt wirksam sein.

Am geplanten Emssperrwerk werden drei verschiedene Typen von Verschlußorganen in den Durchflußöffnungen eingesetzt. Durch die Betriebsweise bedingt, können lediglich die Hubtore und das Segmenttor, die beim Öffnen und Schließen unterströmt werden, einer strömungsinduzierten Anfachung von Schwingungen ausgesetzt sein.

Eine mathematische Erfassung einer möglichen strömungsinduzierten Schwingungsanfachung einer Struktur ist aufgrund der Komplexität der sie beschreibenden Zustandsgleichungen nicht möglich, weswegen physikalische Modelluntersuchungen unerlässlich sind, in denen jedoch aus verfahrenstechnischen Gründen nicht das Schwingungsverhalten der Struktur, sondern lediglich die sie bedingenden Kräfte bzw. Drücke erfaßt werden können. Aus diesem Grund wurden physikalische Modelluntersuchungen in einer Strömungsrinne des FRANZIUS-INSTITUTS durchgeführt, in die zweidimensionale Ausschnittmodelle des Segmenttors und stellvertretend für alle Hubtore des Hubtors der Nebenöffnung 1, nachgebildet im Maßstab 1:15, eingebaut wurden. An ausgewählten Stellen der Verschlußorgane wurde der zeitliche Verlauf des Druckes mit Druckmeßdosen erfaßt. Zusätzlich wurden die Druckverteilungen über die Höhe an den Toren beiderseits der Verschlußorgane mit Druckanbohrungen aufgenommen. Untersucht wurden die vorgesehenen Betriebsarten Schließen bei Sturmflut, Sturmflutentlastung und Stauraumentleerung unter stationären Verhältnissen. Um die Entwicklung möglicher schwingungsanfacher Druckschwankungen in Abhängigkeit von der Öffnungsweite bei den verschiedenen Betriebsfällen erfassen zu können, wurden diskrete Zwischenzustände bis zum Erreichen der maximal zulässigen Öffnungsweite eines jeden Betriebsfalls untersucht.

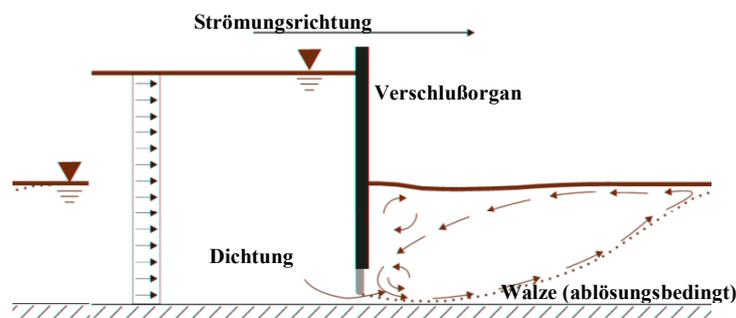


Abb. 9: Formbedingte Strömungsablösung (prinzipiell, nach NAUDASCHER, 1991)

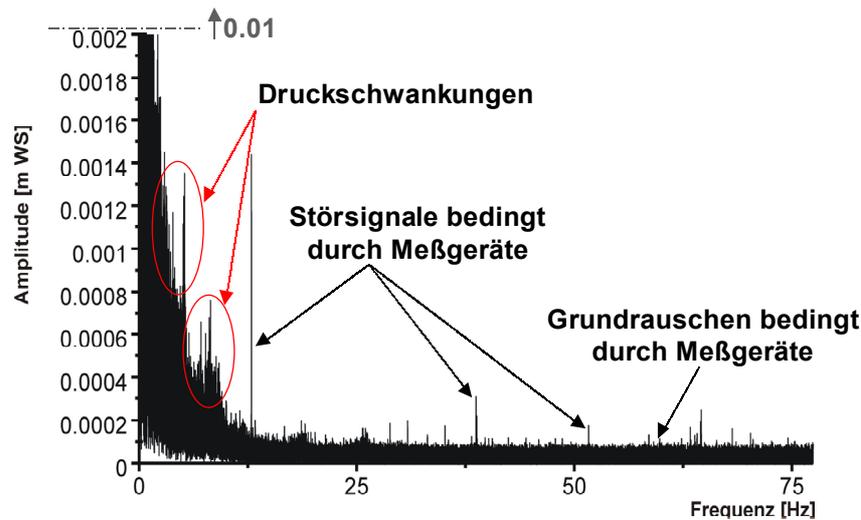


Abb. 10: Amplitudenspektrum des Druckes (exemplarisch für einen Versuch am Hubtor)

Unabhängig vom Typ des Verschlußorganes zeigen sich grundsätzlich Druckschwankungen im Frequenzbereich zwischen 0 Hz und 10 Hz mit einer maximalen Amplitudengröße von 0,011 mWS. Die Eigenfrequenzen der Verschlußorgane sind nicht bekannt, jedoch ist davon auszugehen, daß die Amplituden der Druckschwankungen durch Dämpfungseffekte am Bauwerk weiter reduziert werden, so daß eine Anfachung der Hub- sowie der Segmenttore bzw. von Teilen dieser durch Schwingungen nicht zu erwarten ist.

LITERATUR:

- [1] BUNDESANSTALT FÜR WASSERBAU: Sturmflutsperrwerk Ems bei Gandersum, Gutachten zur Tidedynamik, Hamburg, 1997
- [2] BUNDESANSTALT FÜR WASSERBAU: Sturmflutsperrwerk Ems bei Gandersum, Analyse der Sturmflutscheitelwasserstände in der Unter- und Außenems, Hamburg, 1997
- [3] BEZIRKSREGIERUNG WESER-EMS, PROJEKTTEAM „BAU EINES EMSSPERRWERKES“, NORDEN: Machbarkeitsstudie zur Errichtung eines Sperrwerkes in der Ems bei Gandersum. Starke, W., (1997), unveröffentlicht
- [4] IMS INGENIEURGESELLSCHAFT MBH: Überlegungen zum Kolkchutz, Hamburg, (1997), unveröffentlicht
- [5] NAUDASCHER, E. : Hydrodynamic Forces. A.A. Balkema, Rotterdam, Brookfield, 1991
- [6] ZIMMERMANN, SCHWARZE, LICHY: Untersuchungen der Strömungsverläufe im Sperrwerksbereich in einem Aerodynamischen Modell, Teil 1, Franzius-Institut, Hannover, (1998), unveröffentlicht
- [7] ZIMMERMANN, SCHWARZE, DUNKER, STREICH: Strömungsuntersuchungen im hydraulischen Tidemodell, Teil 2, Franzius-Institut, Hannover, (1999), unveröffentlicht
- [8] ZIMMERMANN, SCHWARZE, STOSCHEK, SCHULZ: Untersuchungen zu Strömungen an der Sohle im Bereich der Sperrwerksöffnungen, Teil 3, Franzius-Institut, Hannover, (1998), unveröffentlicht
- [9] ZIMMERMANN, SCHWARZE, HINSCH: Hydraulische Modellversuche zur Bestimmung der horizontalen Belastung der Seitenscheiben der Hauptschiffahrtsöffnung des Emssperrwerkes durch Wellen, Franzius-Institut, Hannover, (1999), unveröffentlicht
- [10] ZIMMERMANN, SCHWARZE, LINKE: Untersuchungen zu strömungsinduzierten Schwingungen an den Verschlußorganen des geplanten Emssperrwerkes, Franzius-Institut, Hannover, (1999), unveröffentlicht