Die Küste, 68 (2004), 143-163

Wellendruckschlagbelastungen auf historische Küstenbauwerke

Von Gerald Müller u. Guido Wolters

Zusammenfassung

Im 19. und frühen 20. Jahrhundert wurden viele Küstenschutzbauwerke als so genannte *‚blockwork structures‘* oder Blockbauwerke aus Granit- oder Betonblöcken gebaut. Eine große Zahl dieser Bauwerke ist auch heute noch in Gebrauch. Die an diesen Bauwerken kontinuierlich auftretenden Schäden sowie ein möglicher Anstieg der Wellenlasten durch verstärkte Sturmhäufigkeit bedeuten, dass Küstenbauingenieure für diese gelegentlich Reparaturmaßnahmen planen oder Risikoanalysen durchführen müssen. Erhältliche Informationen über diesen Bauwerkstyp sind jedoch beschränkt, und die Interaktion von Welle und Bauwerk ist nicht vollständig bekannt. Schäden an Blockbauwerken deuten darauf hin, dass Wellendruckschläge in wassergefüllte Spalten und Fugen eindringen können und die dadurch im Inneren hervorgerufenen Sprengdrücke einzelne Blöcke seewärts aus dem Verband drücken. Verschiedene Schadensfälle an Wellenbrechern und Kaimauern illustrieren diesen Mechanismus. Modellversuche zur Fortpflanzung von Druckstößen bestätigten, dass diese Druckwellen in wasser- und luftgefüllten Spalten verursachen, wobei die Geschwindigkeit der Druckwelle eine Funktion der Spaltbreite ist. Großmaßstabsversuche und Feldmessungen haben weitere Informationen über die Eigenschaften der Druckwellen geliefert. Ein ähnlicher Schadenverursachender Mechanismus ist möglicherweise für seeseitige Schäden an Deichen verantwortlich. Eine spannungsoptische und numerische Modellierung der Spannungsverteilung im Blockverband zeigte, dass diese stark von den üblichen Annahmen abweicht, weswegen die auf einzelne Blöcke wirkenden Haltekräfte weitaus geringer sein können als angenommen. Die Auswertung der Schadensfälle und der Versuche ergab, dass zur Bewertung des Versagensrisikos eines Blockbauwerkes nicht nur die Standsicherheit, sondern auch die Integrität des Bauwerks beachtet werden sollte.

Summary

During the 19th and the early 20th Century, many coastal structures were built from blockwork, i.e. large granite or concrete blocks. A large number of these structures are still in use. The continuous damage to blockwork structures, as well as a possible increase in wave loading due to increased storm activities, mean that coastal engineers occasionally have to develop repair and maintenance strategies or conduct risk assessments. The available information about this type of structures is however limited, and the interaction between waves and structure is not fully understood. A number of observed cases of damage indicate that wave impact induced pressure pulses may propagate into water or air filled joints or cracks, generating high pressure fluctuations inside of the structure. These pressures then push individual blocks out of their position into the sea. Several cases of damage to existing breakwaters illustrate this mechanism. Model tests showed that wave impacts can generate pressure pulses which then propagate into water and air filled cracks, whereby the speed of propagation increases with increasing crack width. Large scale tests and field measurements gave additional information about the characteristics of the pressure pulses. A similar damage mechanism is thought to be responsible for damage to sea dykes. Photoelastic and numerical models of blockwork walls showed that the stress distribution inside of such a wall deviates considerably from standard assumptions. The analysis of damage events and model tests showed that not only the stability but also the integrity of the structure should be considered for the risk-assessment of blockwork structures.

Die Küste, 68 (2004), 143-163

Keywords

Wellendruckschlag, Blockbauwerke, Wellenlasten, Druckausbreitung
Wave impact loads, wave loading, blockwork structures, pressure propagation

Inhalt

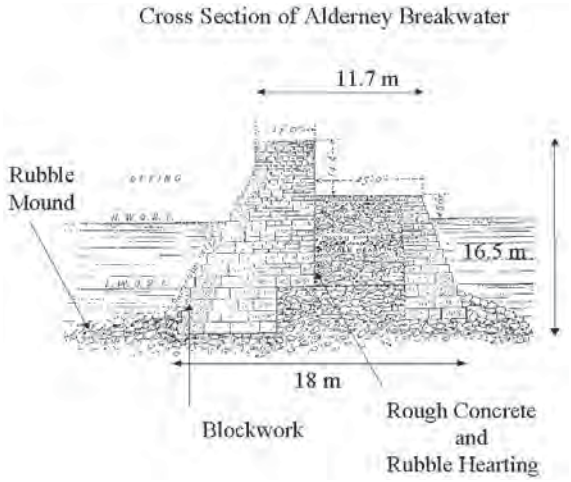
1. Einführung 144
2. Wellendruckschläge 146
3. Bestehende Blockbauwerke 147
3.1 Bedeutung 147
3.2 Schäden und Reparaturstrategien 147
3.4 Technische Richtlinien 149
3.5 Wirtschaftliche Aspekte 150
4. Schadensverursachende Mechanismen 150
4.1 Allgemeines 150
4.2 Fortpflanzung von Wellendruckschlägen 151
4.3 Eigenschaften der Druckwelle 152
4.4 Einfluss der Geometrie 153
4.5 Versuche im großen Wellenkanal und Feldversuche 154
4.6 Numerisches Modell 155
5. Statische Analyse des Bauwerks 157
6. Diskussion 158
7. Deiche und Deckwerke 159
8. Schluss 161
9. Danksagungen 161
10. Schriftenverzeichnis 162

1. Einführung

Viele Küstenbauwerke des 19. und frühen 20. Jahrhunderts wurden als so genannte ‚*blockwork structures*' ausgeführt, also aus großen Granit- oder Betonblöcken von 2,4 bis über 5 m Länge, 0,6 bis 2,1m Höhe und 0,9 bis 2,1 m Breite gebaut. Zwei typische Blockbauwerke, der Wellenbrecher Peterhead East (Betonblöcke 2,1 × 2,1 × 5,1 m) und der Admiralty Breakwater Alderney, sind in Abb. 1 gezeigt. Andere Beispiele sind Holyhead Breakwater (Wales), die Hafenmole St. Andrews (Schottland), die Wellenbrecher Madras/Indien, Ymuiden/Niederlande usw. In diesen Wellenbrechern gibt es Spalten, Risse oder auch Fugen im Bereich des Mittelwasserspiegels, die dem direkten Angriff brechender Wellen ausgesetzt sind. Schadensfälle beginnen oft in diesem Bereich. Schäden in aus Blöcken gebauten Wellenbrechern und Schutzwänden zeigen häufig ein eigenartiges Bild, in dem einzelne Blöcke aus ihrem Verband herausgelöst und dann in die See geworfen werden. Im Englischen hat sich für diesen Mechanismus die Bezeichnung ‚*pluck and throw*' eingebürgert. Die Schäden werden oft auf nicht direkt von außen, sondern auf von innen wirkende Kräfte zurückgeführt: *„Wo immer Fugen oder Spalten im Fels oder in Kunstbauwerken vorhanden sind, schreitet die chemische und mechanische Erosion am schnellsten fort. Abgesehen von dem natürlichen Schwachpunkt, den solche Fugen darstellen, werden das Wasser oder die Luft, welche in den Fugen eingeschlossen sind, wenn diese von einer Welle getroffen werden, in ein sehr zerstörerisches Medium verwandelt.“* (SHIELD, 1895).

Nachdem die ersten Blöcke aus dem Verband gelöst sind, ist es für die Wellen oft leicht, weitere Elemente zu entfernen, was schließlich zum Verlust der Integrität und zum Versagen des Bauwerks führen kann, so geschehen z.B. beim Admiralty Breakwater auf Alderney/Ka-

a. Peterhead Breakwater (Schottland)



b. Querschnitt Admiralty Breakwater auf Alderney/Kanalinseln

Abb. 1: Typische Blockbauwerke

nalinseln: „*Es wurde berichtet, dass die Höhe der Wassersäule, die durch den Aufschlag der Wellen in die Luft geworfen wurde, bis zu 200 Fuß (67 m) betragen hat. Die fürchterlichen Schläge entfernten zunächst Teile des Blockwerks der Seefront, zerstörten dann das Deck und schließlich den Wellenbrecher selbst … Die Risse im Bauwerk wurden durch die ungleichförmige Setzung des Wellenbrechers hervorgerufen. Das Eindringen von Wasser und Luft in die Risse, und die darauf folgenden Hammerschläge der Wellen führten zu ungeheuren inneren Sprengdrücken*“, auf die schließlich das Versagen des Wellenbrechers zurückgeführt wurde (MINIKIN, 1950). Die Abb. 2 zeigt eine auf den Wellenbrecher Louannec/Bretagne schlagende brechende Welle; die Aufnahme gibt einen lebendigen Eindruck der Gewalt des Wellenschlages.

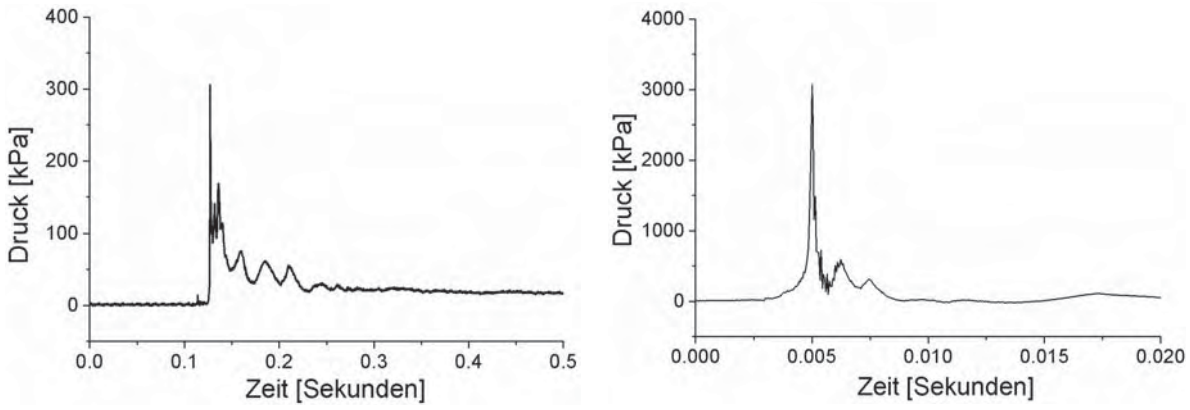
Abb. 2: Wellenbrecher Louannec/Bretagne (© VALÉRIE HACHE, mit freundl. Genehmigung)

Viele der im 19. und frühen 20. Jahrhundert gebauten Blockbauwerke werden auch heute noch genutzt, so dass die Frage nach schadensverursachenden Mechanismen und der Sicherheit der bestehenden Bauwerke gelegentlich an im Küstenbau tätige Ingenieure herangetragen wird. Nach Wissen der Autoren gibt es aber kaum veröffentlichte Informationen oder Richtlinien zu diesem Bauwerkstyp. Im Vereinigten Königreich arbeitet daher seit 1999 eine lose zusammengeschlossene Arbeitsgruppe (BloCSNet, siehe http://www.see.ed.ac.uk/~tbruce/blockwork/) bestehend aus Universitäten und beratenden Ingenieurbüros daran, eine Wissensbasis zum Thema Blockbauwerke zu schaffen, wobei diese Basis von der Aufnahme von Schadensbildern über die Grundlagen der Interaktion von Welle und Bauwerk bis hin zur Bauwerksanalyse und schließlich der Entwicklung von Reparaturempfehlungen reicht. Die vielfältigen Probleme bei der Bewertung von Blockbauwerken reichen dabei von den großen Unsicherheiten bei der Abschätzung der Wellendrucklasten bis hin zur Analyse der Bauwerksspannungen und der Entwicklung eines für diese Bauwerke spezifischen Versagensmechanismus. In diesem Beitrag wird der innerhalb des BloCSNet erreichte derzeitige Wissensstand zum Thema ‚Blockbauwerke' dargestellt.

2. Wellendruckschläge

Die durch brechende Wellen verursachten Druckschläge sind Druckstöße kurzer Dauer von hoher Intensität. Die gegenwärtig üblichen Formeln zur Berechnung der Höhe der Druckschläge (nach MINIKIN, 1950; BLACKMORE u. HEWSON, 1984) können wohl durchweg als im besten Fall unzuverlässig bezeichnet werden (MÜLLER u. WHITTAKER, 1996). Auch die in der EAK (2002) empfohlenen Verfahren liefern entweder statisch äquivalente Lasten für Caissons (TAKAHASHI, siehe EAK 2002), die wesentlich geringer als die tatsächlichen Wellendrucklasten sein können, oder sind komplex und noch mit Unsicherheiten verbunden (PROVERBS, siehe EAK 2002). Feldmessungen von Wellendruckschlägen an fast vertikalen Kaimauern im Jahr 1938 ergaben einen Maximalwert von 690 kPa bei einer Dauer von 10 ms (ROUVILLE et al., 1938), neuere Messungen aus den Jahren 1999 und 2002 einen von 396 kPa (BULLOCK et al., 1999, 2003). Ein zur Zeit laufendes gemeinsames Forschungsprogramm der Universitäten Plymouth, Bristol und Belfast befasst sich mit Großmaßstabs- und Feldmessungen von Wellendruckschlägen sowie deren Fortpflanzung in Bauwerksrissen. Dieses Forschungsvorhaben soll die für eine realistische Abschätzung der Wellendruckschläge sowie deren Auswirkungen auf Bauwerke unbedingt notwendigen Daten liefern (BULLOCK et al., 2003).

Die Abb. 3a zeigt einen 2002 gemessenen Druckschlag von 306 kPa Höhe und etwa 2,4 ms Steigzeit. Im Großmaßstabsversuch wurden im März 2003 an einem 1:4-Modell des Admiralty Breakwaters im Großen Wellenkanal (Hannover) Maximaldrücke von 3.500 kPa und einer Steigzeit von etwa 0,1 ms bei einer Wellenhöhe von 1,35 m gemessen; d.h. der Druckschlag überstieg den hydrostatischen Druck der Welle um den Faktor 260. Die Abb. 3b zeigt einen typischen Druckschlag von 3.070 kPa Höhe und einer Steigzeit von 0,75 ms. Diese sehr hohen Drücke sind allerdings stark örtlich begrenzt. Obwohl die gezeigten Schadensbeschreibungen und die Vermutungen über den möglichen Schadensmechanismus seit langem bekannt sind, gab es bis vor kurzem nur wenige Informationen zur Fortpflanzung von Druckstößen. SKLADNEV u. POPOV (1969) haben welleninduzierte Drücke auf und unterhalb von Deckwerksblöcken gemessen und festgestellt, dass, insbesondere wenn die Brecherzunge auf die Fuge zwischen zwei Blöcken schlägt fast gleichzeitig hohe Auftriebsdrücke unterhalb der Blöcke entstehen. Versuche von FÜHRBÖTER u. SPARBOOM (1988) zu



a. Druckschlag (Feldversuch), (BULLOCK et al., 2003)

b. Druckschlag (1:4 Modell, GWK), (BULLOCK et al., 2003)

Abb. 3: Wellendruckschlag (Feldmessung und GWK-Versuch)

diesem Problem zeigten, dass maximale Auftriebsdrücke vor dem Aufschlag der Brecherzunge auftreten; bei diesen Versuchen wurden allerdings durch Druckschläge verursachte dynamische Drücke vernachlässigt. Versuche, bei denen durch Wellendruckschlag verursachter Auftrieb an Caissons gemessen wurde, zeigten schließlich, dass Wellendruckschläge sich als Kompressionswellen in einer wassergesättigten Schüttung fortpflanzen können (KORTENHAUS et al., 1994).

3. Bestehende Blockbauwerke

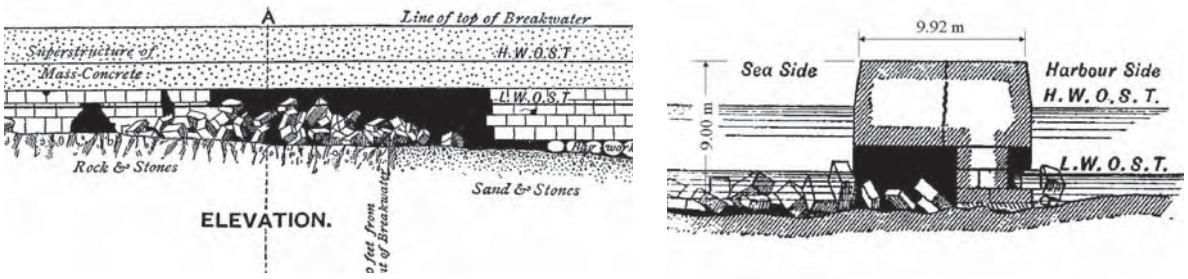
3.1 Bedeutung

Eine große Anzahl von Blockbauwerken ist heute noch in Gebrauch; diese sichern oft sehr bedeutende Häfen wie Dover oder Teesside. Die häufig wiederkehrenden Schäden an den Bauten haben zu Fragen nach der besten Reparaturstrategie sowie zur Risikoabschätzung der bestehenden Bauwerke geführt. Der letzte Punkt ist insbesondere wegen der Zunahme der Sturmhäufigkeit und -intensität im Nordatlantik von Bedeutung. Reparaturmaßnahmen sind hierbei oft kostengünstiger als Neubauten. Gleichzeitig zeigen die heute angewandten Reparaturmaßnahmen sehr unterschiedliche Erfolge bei doch recht hohen durchschnittlichen Kosten. Das zunehmende Alter der Bauwerke lässt zumindest gleichbleibende Unterhaltungskosten erwarten. Eine genauere Abklärung des schadensverursachenden Mechanismus ist daher von großer Bedeutung sowohl für das *risk-assessment* als auch für die Entwicklung einer rationalen Erhaltungstrategie für derartige Bauwerke.

3.2 Schäden und Reparaturstrategien

Einige für Blockbauwerke typische Schadensbilder sind in den folgenden Abb. 4 bis 6 gezeigt. Der Wellenbrecher Aberdeen wurde aus etwa 3 × 1,2 × 1,2 m großen Betonblöcken gebaut. Auf diesen Unterbau wurde eine 4,80 m dicke Ortbeton‚decke' aufgesetzt. Im Mittelteil des Wellenbrechers setzte sich der Unterbau geringfügig, was zur Rissbildung führte, da der feste Betonoberbau den Baugrundbewegungen nicht folgen konnte. Die Wellen-

druckschläge gelangten durch diese Risse ins Innere des Bauwerks, wo sie Sprengdrücke verursachten und einzelne Blöcke aus dem Verband lösten. Strömungskräfte bewegten diese Blöcke dann seewärts. Interessanterweise führten die Wellendruckschläge auch dazu, dass, obwohl die Blockwerkwand nicht durchbrochen wurde, Blöcke an der Hafenseite ebenfalls aus ihrem Verband gelöst und ins Hafenbecken geworfen wurden wie in Abb. 4b gezeigt.



a. Vorderansicht des beschädigten Abschnitts b. Querschnitt A – A

Abb. 4: Schadensbild am Breakwater Aberdeen (Schottland), 18.3.1883 (SHIELD, 1895)

Die Schäden wurden durch mit trockenem Beton gefüllte Säcke repariert; dies dauerte allerdings mehrere Monate, wobei weitere Schäden am Bauwerk durch Sturmereignisse während der Reparaturen eintraten. Der Admiralty Breakwater auf Alderney wurde mehrere Male nach Auftreten ähnlicher Schadensmechanismen durchbrochen, so zum letzten Male 1992.

Abroath West Breakwater besteht aus einem 160 m langen Wellenbrecher, der die Hafeneinfahrt und den inneren Wellenbrecher schützt. An der Leuchtturmmole treten seit mehreren Jahren sich ausweitende Schäden auf. Diese bestehen aus Rissbildung, dem Entfernen einzelner Blöcke seewärts, dem Verlust von feinem Füllmaterial und dem Eindrücken von Blöcken in den Wellenbrechern an Stellen, an denen innere Hohlräume entstanden sind. Wegen des unklaren Schadensmechanismus sind die Reparaturmaßnahmen bisher nur mäßig erfolgreich. Reparaturen bestanden aus dem Einfügen von Blöcken, Verpressen von Hohlräumen, Verfugen von Rissen, Spalten und Löchern sowie dem Anbringen von Stahlbändern, um das Aufweiten der Fugen zu verhindern, siehe Abb. 5.

a. Leuchtturmmole Abroath West Breakwater b. Nahaufnahme der Schäden und Sicherungsmaßnahmen, Mai 2003

Abb. 5: Abroath West Breakwater (Schottland)

Die Küste, 68 (2004), 143-163

Der Wellenbrecher Roscoff (Frankreich) zeigt heute noch Spuren von Schäden, siehe Abb. 6a. Als Schutzmaßnahme wurde hier eine Stahlbetonwand vor das Blockwerk vorbetoniert, Abb. 6b. Die Betonwand vergrößert dabei die Standsicherheit nur unbedeutend.

a. Aus dem Verband gelöste Blöcke b. Sanierung mit Ortbetonwand

Abb. 6: Wellenbrecher Roscoff/Bretagne

Ihre eigentliche Rolle dürfte darin bestehen, eine undurchlässige Schutzwand vor das Blockwerk zu legen, um damit das Eindringen von Wellendrücken und das dadurch hervorgerufene Entfernen von Einzelblöcken zu verhindern. Eine derartige Lösung ist ebenfalls für die Sanierung der Ostkaje Helgoland vorgeschlagen worden (VIERFUSS, 2002). Die in Abb. 6 gezeigte Lösung hat allerdings den Schwachpunkt, dass die obere horizontale Fuge zwischen Betonwand und Hauptkörper der durch brechende Wellen verursachten, herunterfallenden Wassersäule ausgesetzt ist. Die beim Aufschlag dieser Wassersäule entstehenden Drücke können durchaus die Höhe von Druckschlägen erreichen, wie aufgetretene Schäden und Modellversuche zeigten (BRUCE et al., 2001). Messungen am 1:4-Modell im GWK ergaben, dass diese vertikalen Wellendruckschläge Druckhöhen von bis zu 220 kPa von 0,6 bis 20 ms Dauer verursachen können.

3.4 Technische Richtlinien

Der Verlust schon eines einzelnen Blockes verringert die Haltekraft an den unmittelbar benachbarten Blöcken, so dass der Verlust der Bauwerksintegrität eine Gefährdung des gesamten Bauwerkes zur Folge haben kann. Die Bauwerkssicherheit kann bei Blockbauwerken also nicht nur als Standsicherheit bzw. Sicherheit gegen Gleiten und Kippen aufgefasst werden, wie das bei monolithischen Bauwerken geschieht. Küstenschutzbauwerke in Blockbauweise werden – obwohl es eine große Anzahl von ihnen gibt – in der Fachliteratur nur selten behandelt (z.B. BRAY u. TATHAM, 1992; ALLSOP u. BRAY, 1994); diese geben allerdings lediglich Beschreibungen von Bauweisen, Anwendungen und Schadensfällen. Gegenwärtig gibt es nach Wissen der Autoren nur sehr allgemeine technische Regeln zum Entwurf von Blockbauwerken (EAU, 2000), die zudem empfehlen, dass in Bereichen, in denen eine Uferwand brechenden Wellen ausgesetzt ist, diese Bauart wegen der hohen Risiken bezüglich der Stabilität und der Dauerfestigkeit der Blöcke nicht verwendet werden sollte. Für die Bewertung bestehender Küstenschutzbauwerke sind diese Hinweise daher nur sehr begrenzt anwendbar. In den ‚Empfehlungen' wird allerdings darauf hingewiesen, dass sich, aufgrund

der niedrigen Durchlässigkeit der Blockwände, innerhalb des Bauwerks ein höherer Wasserspiegel als vor dem Bauwerk (insbesondere während des Wellentals) einstellen kann. Dieser verursacht nach außen gerichtete Druckkräfte; die Möglichkeit von nach der Seeseite hin wirkenden Kräften wird also in Betracht gezogen.

3.5 Wirtschaftliche Aspekte

Häufig werden die bei Blockbauwerken zwangsläufig entstehenden Kosten für dauernde Unterhaltungs- und Reparaturmaßnahmen als Gründe für Um- bzw. Neubau eines Wellenbrechers angeführt. Der sehr exponierte Admiralty Breakwater (Alderney/Kanalinseln) hat jährliche durchschnittliche Unterhaltungskosten von etwa 750.000 €. Der Eigentümer, die *States of Guernsey*, hatte daher im Jahr 2002 einen Um- bzw. Neubau des Wellenbrechers ausgeschrieben, um die jährlichen Kosten zu minimieren. Dies führte zum einen zu starkem Widerstand der Bevölkerung, die dieses Bauwerk als Teil ihrer Geschichte und der Insel ansieht. Die auf die Ausschreibung erfolgten Angebote ergaben zum anderen Kosten von etwa 37 Mio. €. Abgesehen von politischen Schwierigkeiten, die jede das Erscheinungsbild des Wellenbrechers verändernde Lösung zwangsläufig nach sich gezogen hätte, stellen die Unterhaltungskosten lediglich 2 % des für eine Baumaßnahme notwendigen Kapitals dar. Am Kapitalmarkt können jedoch wahrscheinlich mehr als 5 % Verzinsung erreicht werden. Die Entscheidung der *States of Guernsey* fiel daher im Frühjahr 2003 gegen einen Umbau aus. Das Beispiel des Admiralty Breakwaters zeigt, dass der Erhalt dieser Bauwerke sowohl wegen ihrer historischen Bedeutung als auch aus wirtschaftlichen Gründen häufig einem Neubau vorzuziehen ist. Selbst relativ hoch erscheinende jährliche Unterhaltungs- und Reparaturkosten rechtfertigen einen Neubau nicht notwendigerweise (PRICE, 2003).

4. Schadensverursachende Mechanismen

4.1 Allgemeines

Die beobachteten Schäden deuten darauf hin, dass neben dem Ausspülen von Feinstmaterial insbesondere durch Wellen verursachte und im Inneren des Bauwerkes wirkende Kräfte verantwortlich sind. Für diese Drücke gibt es zwei vermutete Entstehungsmechanismen:

1. Die auf das Bauwerk kontinuierlich auflaufenden Wellen verursachen den Aufbau eines hohen Wasserspiegels im Inneren des (durchlässigen) Bauwerks. Dieser Wasserspiegel kann die Höhe des Wellenberges erreichen. Wenn das Wellental das Bauwerk erreicht, ergibt sich, da der innere Wasserspiegel wegen der Porosität des Kerns und den schmalen Fugen des Blockwerks der Wellenbewegung kaum folgt, eine maximale Höhendifferenz zwischen dem inneren und dem äußeren Wasserspiegel. Die aus dieser Höhendifferenz entstehenden Kräfte bewirken eine nach außen auf die Blöcke der Seeseite gerichtete Kraft (BEZUIJEN et al., 2002). Aus den Beispielrechnungen ergeben sich maximale Drücke von etwa 25 kPa (durch eine 5,4 m hohe Welle erzeugt). Diese sind zu gering, um einen Betonblock von etwa 440 kN Gewicht aus dem Verbund zu lösen. Der Aufbau eines über Mittelwasser gelegenen inneren Wasserspiegels wird allerdings die auswärts wirkenden Kräfte aus anderen Mechanismen verstärken. Zu erwähnen sei außerdem, dass die z.B. in BEZUJIN et al. (2002) angegebenen Drücke für den Fall einer undurchlässigen Hafenseite

berechnet wurden; in Wirklichkeit wird jedoch die hafenseitige Wand wenigstens ebenso durchlässig sein wie die seeseitige und der entstehende hydrostatische Druck dementsprechend niedriger ausfallen.

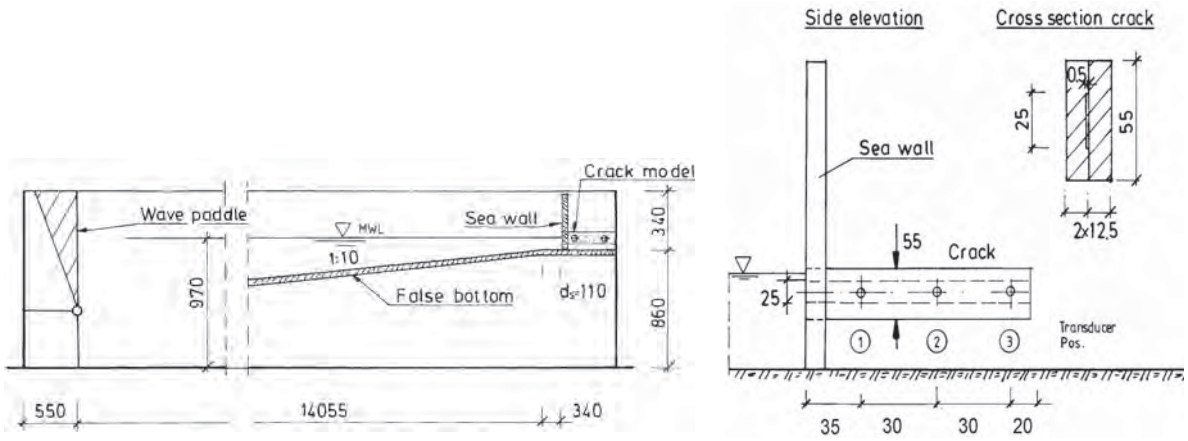
2. Wellendruckschläge verursachen Druckwellen, die durch wasser- bzw. luftgefüllte Fugen in das Innere des Bauwerkes eindringen. Die kurze Dauer der Druckschläge bewirkt, in Verbindung mit der relativ langsamen Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Druckwellen, dass sich im Inneren hohe phasenverschobene transiente Drücke und daraus folgend starke nach außen gerichtete Kräfte bilden können. Dieser Mechanismus wurde schon lange vermutet (siehe die vorhergehenden Zitate aus SHIELD (1895)), wurde jedoch erst 1997 zum ersten Mal experimentell nachgewiesen (MÜLLER, 1997). Numerische Simulationen ergaben, dass Druckschläge von 500 kPa Höhe seewärts wirkende Drücke von 120 kPa Größe und 50–100 ms Dauer verursachen können (MÜLLER et al., 2003a).

Die relativ niedrigen Drücke aus Mechanismus (1) werden wahrscheinlich einzelne Blöcke nicht bewegen können. In dem von BEZUIJEN angeführten Beispiel des Wellenbrechers St. Andrews/Schottland reichen die aus der Wasserspiegeldifferenz entstehenden Drücke nicht aus, um die zwischen einem Betonblock und seiner Unterlage entstehenden Reibungskräfte zu überwinden.

Da die an Wellenbrechern verursachten Schäden ausschließlich nach Stürmen mit brechenden Wellen beobachtet wurden, scheint es, dass eine Kombination von Mechanismus (1) und Mechanismus (2) die wahrscheinliche Schadensursache darstellt. Die Schäden treten insbesondere dann auf, wenn z.B. durch Unterspülungen oder andere Ursachen lokale kleinere Setzungen und dadurch Risse im Blockwerk auftreten. In diese Risse können dann die durch die Wellendruckschläge verursachten Druckwellen eindringen. Da die Eigenschaften dieser Druckwellen nicht allgemein bekannt sind, sollen diese im Nachfolgenden etwas genauer beschrieben werden.

4.2 Fortpflanzung von Wellendruckschlägen

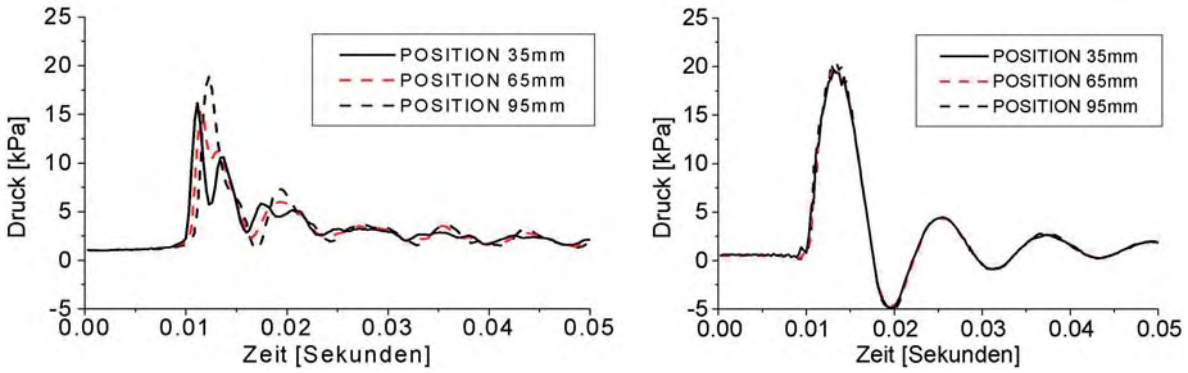
Die ersten Versuche zur Fortpflanzung von Druckschlägen in wassergefüllten Spalten wurden 1997 an der Queen's University Belfast unternommen. In einem Wellenkanal von 17,00 m Länge, 0,35 m Breite und 0,97 m Wassertiefe wurde ein künstlicher Boden eingebaut, der die Wassertiefe mit einer Steigung von 1:10 auf 0,11 m reduzierte. Im Flachwasserbereich befand sich eine vertikale Wand, in die ein aus Plexiglas gefertigtes Modell eines Spaltes eingebaut war, siehe Abb. 7. Erste Versuche wurden mit einem Spalt mit einer Öffnung von 0,5 × 25 mm Querschnitt, 115 mm Länge und einem Außendurchmesser von 25 × 55 mm durchgeführt. Dieses Modell war in die vertikale Wand eingebaut, wobei sich die Öffnung des Spaltes vollständig unter Wasser befand. Die Versuche ergaben, dass sich Druckschläge in wassergefüllten Spalten mit einer Geschwindigkeit von 50–100 m/s fortpflanzen (MÜLLER, 1997). Die Druck- Zeitverläufe zeigten ebenfalls einen Druckanstieg am Ende des Spaltes; dies und die zeitverschobene zweite Druckspitze an Positionen 1 und 2 deuten darauf hin, dass der Druckstoß reflektiert wird (Abb. 8a). Die niedrige Fortpflanzungsgeschwindigkeit, die weit unter der theoretischen Schallgeschwindigkeit von 1450 m/s in Wasser lag, wurde darauf zurückgeführt, dass das Wasser kleinste Luftblasen enthält, die das Wasser-Luftgemisch in ein Zweiphasen-Medium mit dramatisch erhöhter Kompressibilität verwandeln. 1 % Luftblasengehalt z.B. reduziert die Schallgeschwindigkeit in Wasser von 1450 auf 100 m/s (PRANDTL et al., 1984).



a. Wellenkanal

b. Modell der Wand mit eingebautem Spalt

Abb. 7: Versuchsaufbau



a. Wassergefüllter Spalt

b. Teilgefüllter Spalt

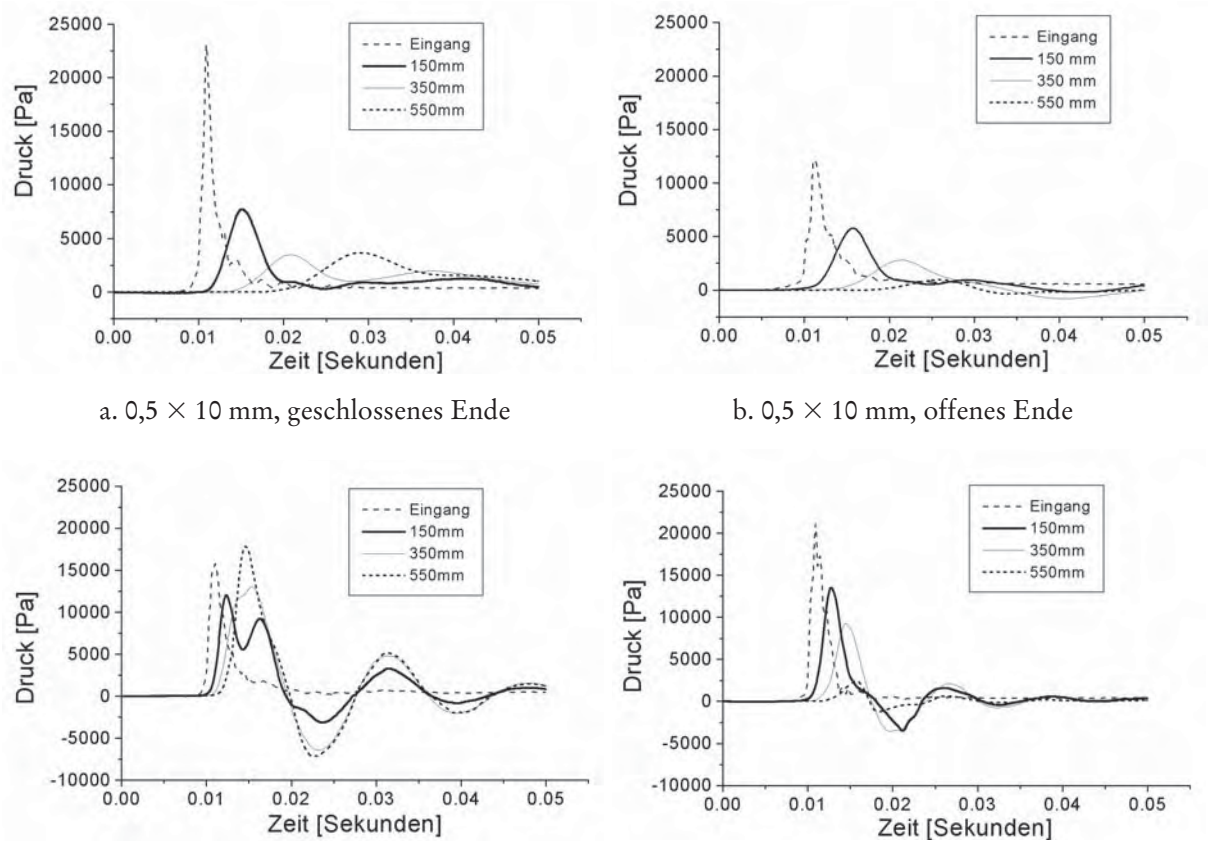
Abb. 8: Drücke an Positionen 35, 65 und 95 mm in 1,0 x 25 mm Spalt (L = 115 mm)

In Bauwerken werden jedoch insbesondere diejenigen Fugen und Risse, welche sich nahe am Ruhewasserspiegel befinden, nicht vollständig mit Wasser gefüllt sein. In einer weiteren Versuchsreihe wurde der Spalt so montiert, dass der Wasserspiegel in Spaltmitte lag, um einen teilgefüllten Spalt zu untersuchen. Abb. 8b zeigt einige Ergebnisse. Hier pflanzt sich der Druckschlag mit einer Geschwindigkeit von 300–350 m/s anscheinend durch die Luft fort. Eine Reflektion des Druckes ist nicht sichtbar (MÜLLER u. WOLTERS, 2001).

4.3 Eigenschaften der Druckwelle

Die Versuche im Wellenkanal hatten jedoch einige Nachteile, insbesondere die Tatsache, dass Wellendrücke auch scheinbar identischer Brecher stark variieren können und dass die Drücke im Spalt und an der Spaltöffnung wegen der Größe der Druckaufnehmer nicht gleichzeitig gemessen werden können. Um die Eigenschaften der Druckfortpflanzung sowie den Einfluss der Spaltgeometrie (Querschnitt und Aufsicht) unter kontrollierten Bedingungen näher zu bestimmen, wurde daher eine Versuchsreihe mit einem speziell entworfenen Versuchsstand durchgeführt (MÜLLER et al., 2003a). Abb. 9a und b zeigen Ergebnisse für

einen 600 mm langen Spalt von 0,5 × 10 mm Querschnitt mit geschlossenem und offenem Ende, Abb. 9c und d die für einen Spalt von 10,0 × 10 mm Querschnitt. Die Position ‚Eingang' gibt den Druck an der Öffnung des Spaltes an. Der Druck verringert sich rasch, wie Abb. 9a zeigt. In Abb. 9b erzwingt das offene Ende eine druckfreie Randbedingung; die Reflektion des negativen ‚Bildes' des Druckstoßes ist sichtbar. Für beide Versuche wurden Fortpflanzungsgeschwindigkeiten von 50–70 m/s gemessen. Der breitere Spalt, Abb. 9c und d, zeigt eine wesentlich höhere Geschwindigkeit des Druckstoßes von bis zu 300 m/s. Eine Verringerung der Druckhöhe ist ebenfalls sichtbar; zusätzlich hierzu zeigt das Signal eine harmonische Schwingung.



a. 0,5 × 10 mm, geschlossenes Ende

b. 0,5 × 10 mm, offenes Ende

c. 10,0 × 10 mm, geschlossenes Ende

d. 10,0 × 10 mm, offenes Ende

Abb. 9: Drücke an Positionen Spaltöffnung, 150, 350 und 550 mm für einen 600 mm Spalt mit verschiedenen Querschnitten

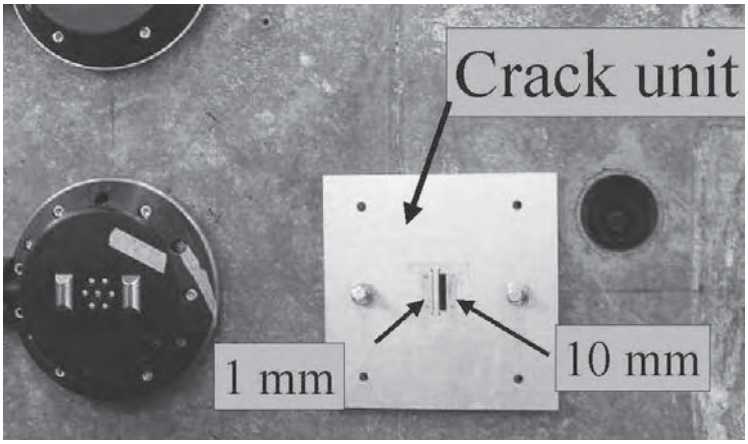
4.4 Einfluss der Geometrie

Um den Einfluss der Form des Spaltes zu untersuchen, wurden Messungen an einem Modell mit einer 90°-Ecke durchgeführt. Der Vergleich der Drücke im geraden und im abgewinkelten Spalt zeigte, dass keine teilweise oder vollständige Reflektion des Druckes an der Ecke auftritt, wie zunächst angenommen worden war. Zur Untersuchung der Auswirkung einer plötzlichen Aufweitung des Spaltes wurden Versuche mit einem Spalt mit 0,5 × 25 mm Querschnitt und 600 mm Länge, an dessen Ende ein zylindrischer Hohlraum von 25 mm Innendurchmesser und 50 mm Länge befestigt war, durchgeführt. Die Messungen im Spalt ohne angeschlossenen Hohlraum ergaben Drücke am geschlossenen Ende, die genauso hoch

waren wie die im Spalt mit angeschlossenem Hohlraum und im Hohlraum selbst (MÜLLER et al., 2003). Aus diesen Ergebnissen lässt sich schließen, dass Geometrieänderungen eines Spaltes, zumindest solange sie räumlich begrenzt sind, keinen Einfluss auf die Fortpflanzung des Druckstoßes haben.

4.5 Versuche im großen Wellenkanal und Feldversuche

Die kleinmaßstäblichen Versuche haben wertvolle Erkenntnisse zum Verhalten der Druckstöße in wasser- und luftgefüllten Spalten gegeben. Um die Druckfortpflanzung in Bauwerken weiter zu untersuchen, werden derzeit in Zusammenarbeit mit den Universitäten Plymouth und Bristol Feldmessungen am Admiralty Breakwater auf Alderney/Kanalinseln sowie Großmaßstabsversuche am Großen Wellenkanal (GWK) in Hannover an einem 1:4-Modell des Admiralty Breakwaters durchgeführt. Für die Großmaßstabsversuche wurde ein aus Aluminium gefertigtes Modell eines Bauwerksspaltes gebaut, das zwei 1000 mm lange und 50 mm tiefe Spalten enthält, die 1 bzw. 10 mm breit und mit jeweils vier Druckmessern in Abstand von 280 mm instrumentiert sind.

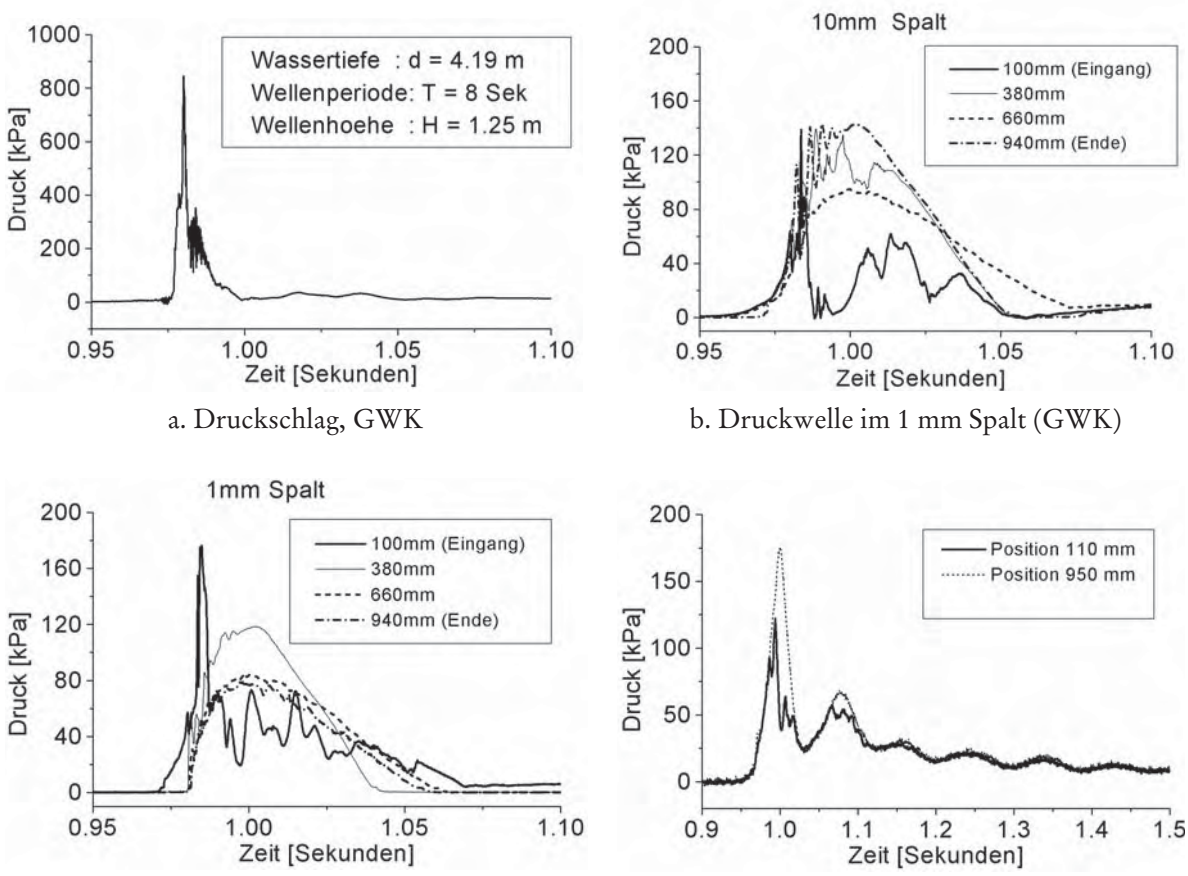


a. Vorderansicht Spaltmodell (Crack unit)

b. Brechende Welle

Abb. 10: GWK-Versuche

Die Abb. 10a zeigt eine Vorderansicht des Modells, Abb. 10b eine brechende Welle im GWK. Das kreisförmige Instrument links von dem Spaltmodell ist eine kombinierte Druck- und Luftgehaltsmesseinrichtung der Universität Plymouth. In Abb. 11a ist ein Druckschlag, der von der in Bild 11a gezeigten Messdose gemessen wurde, gezeigt. Abb. 11b und c zeigen die gleichzeitig gemessenen Drücke im 1 und 10 mm Spalt. Die Messungen zeigen, dass der Druckschlag sich in verminderter Größe, aber mit längerer Dauer, im Spalt fortpflanzt. Die an Positionen 100 mm und 380, 660 und 940 mm gemessenen Druckstöße deuten darauf hin, dass der Spalt (Eingang über Mittelwasser) nur teilweise (bis über Position 100 mm) mit Wasser gefüllt war. Der Druck pflanzt sich teilweise mit großer Geschwindigkeit (50–450 m/s) fort, wobei der Druck auf etwa 10–25 % des Druckschlages reduziert ist, die Größe des Druckes über die Spaltlänge aber nicht wesentlich abnimmt.



a. Druckschlag, GWK

b. Druckwelle im 1 mm Spalt (GWK)

c. Druckwelle im 10 mm Spalt (GWK)

d. Feldversuch: Druckwelle im 10 mm Spalt, Admiralty Breakwater Alderney

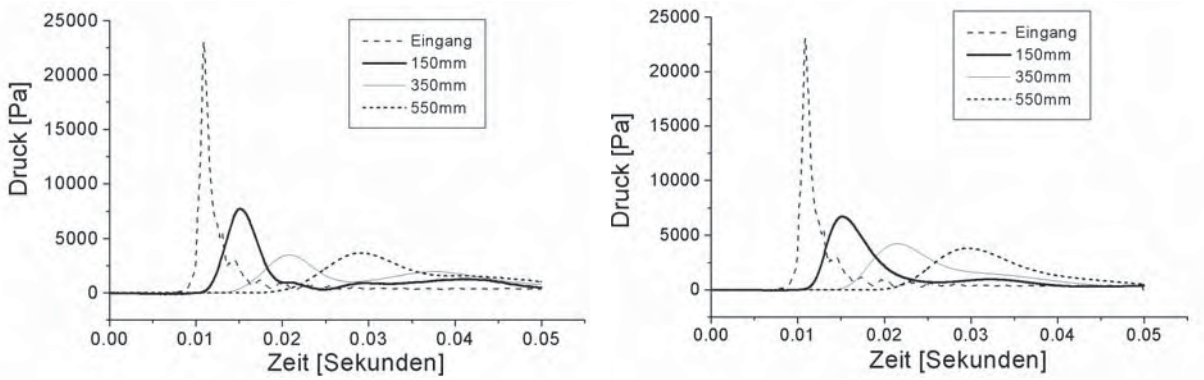
Abb. 11: Druckschlag und Druckfortpflanzung

Die Feldversuche auf Alderney werden derzeit mit einer ähnlichen Versuchsanordnung wie im GWK durchgeführt. Eine mit 2 × 5 Druckmessern instrumentierte ‚crack unit' von 1m Länge mit zwei Spalten von 1 und 10 mm Breite und 50 mm Höhe wurde in die Vorderwand, etwa in Höhe des mittleren Hochwasserspiegels, des Wellenbrechers eingebaut. Abb. 11d zeigt einen Druckschlag und die Druckwelle im 10 mm Spalt an den Positionen 110 mm sowie 950 mm entfernt von der Spaltöffnung.

Die Versuche im Großmaßstab und am Bauwerk zeigten deutlich, dass Wellendruckschläge in wasser- oder luftgefüllten Spalten und Rissen des Bauwerks Druckwellen erzeugen, die in das Bauwerk eindringen. Wegen der langsamen Fortpflanzungsgeschwindigkeiten können diese Druckwellen an den seeseitigen Blöcken hohe seewärts gerichtete Kräfte erzeugen, da die Kräfte im Inneren noch wirken, während der Wellendruckschlag außen schon abgeklungen ist.

4.6 Numerisches Modell

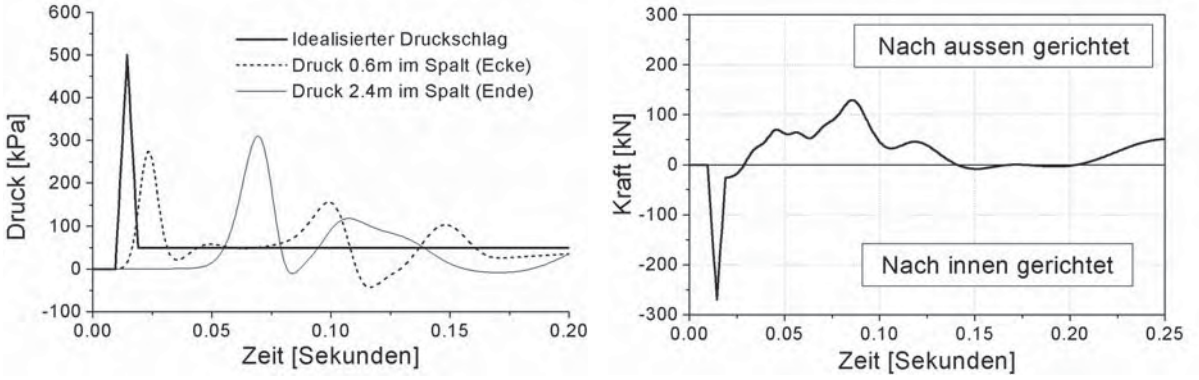
Die gemessenen Druckstöße werden am geschlossenen Ende des Spaltes reflektiert, wobei sich die Amplitude stark erhöht; am offenen Ende wurde ein negatives Bild des Pulses reflektiert. Der reflektierte Puls überlagert sich mit dem hineinkommenden Signal, und insbesondere in den breiteren Spalten zeigen sich harmonische Schwingungen.



a. Messung b. Numerische Simulation

Abb. 12: Vergleich Versuch und numerisches Modell (0,5 mm Spalt, geschlossen)

Die Messungen führten daher zu der Annahme, dass sich in den hier betrachteten sehr kurzen Zeiträumen das Wasser-Luftgemisch wie ein elastischer Körper verhält. In (WYLIE u. STREETER, 1978) wurde vorgeschlagen, die Wasser-Luftgemische als Masse-Feder-Dämpferketten zu idealisieren; hierfür wurde ein numerisches Modell entwickelt. In Abb. 12 sind einige Ergebnisse des numerischen Modells für die Messung im 0,5 × 10 mm Spalt von 600 mm Länge gezeigt. Die Abb. 12 zeigt, dass das numerische Modell die Fortpflanzung des Druckstoßes und die Veränderung des Pulses simulieren kann. Die in Wirklichkeit auftretenden hohen Drücke erlauben keine Linearisierung des E-Moduls der Luft mehr. Daher wurde eine Version des Programmes geschrieben, in der die nichtlineare Kompressibilität der Luft (Boyle-Mariotte'sches Gesetz) berücksichtigt wird. Mit diesem Modell wurde das folgende Beispiel berechnet: Ein 1,8 × 1,2 × 0,6 m großer Granitblock an der Seeseite eines Wellenbrechers wird von einem idealisierten Druckschlag von 500 kPa Spitzendruck und 10 ms Dauer getroffen. Der Druckschlag wird von einem länger andauernden hydrodynamischen Druck von 50 kPa gefolgt. Der Druckschlag hat seinen Maximalwert an einer seitlichen Spalte des Blockes und geht zum anderen Ende des Blockes auf null zurück. Es wird angenommen, dass die Fuge auf einer Seite des Blockes einen 1 cm breiten und 0,6 m hohen Spalt gebildet hat, der sich auch über die gesamte Rückseite des Blockes hinzieht und der mit Wasser gefüllt ist. Das Wasser im Spalt hat einen geschätzten Luftgehalt von 4 %. Abb. 13a zeigt



a. Wellendruckschlag, Druck im Spalt b. Kraft auf den Block

Abb. 13: Druck im Bauwerksspalt und auf einen Block 1,8 × 1,2 × 0,6 m wirkende Kräfte (numerische Simulation)

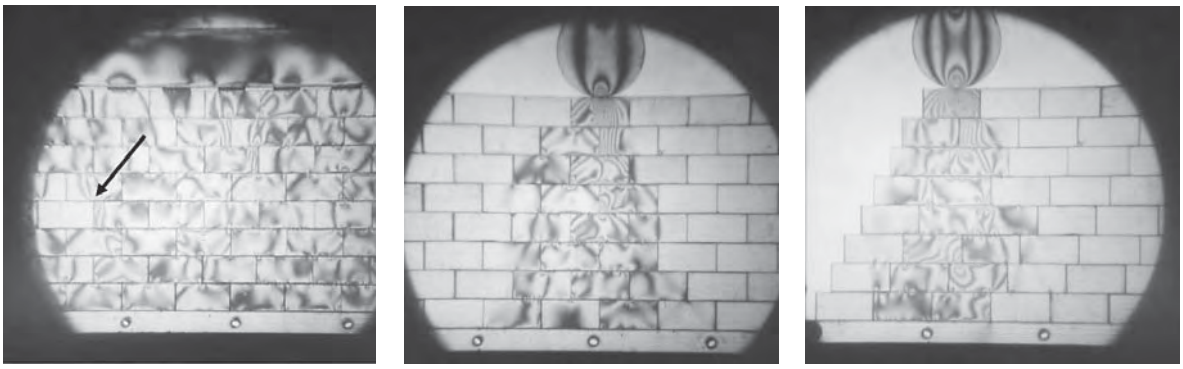
den Druckschlag und die Druckverläufe an den beiden inneren Ecken des Blockes, Abb. 13b die resultierende Kraft.

Die Abbildung illustriert, dass Wellendruckschläge trotz ihrer kurzen Dauer relativ lange dauernde und hohe seewärts wirkende Kräfte verursachen können; in diesem Fall wirken maximal 129,2 kN seewärts auf einen Block von 35–40 kN Gewicht. Es ist daher vorstellbar, dass durch eine Abfolge von Druckschlägen ein Block schrittweise aus seiner Position herausgedrückt wird.

5. Statische Analyse des Bauwerks

Für das Abschätzen der Standsicherheit eines Blockbauwerkes sind nicht nur die äußeren Lasten und die äußere Sicherheit (Kippen, Gleiten) wichtig, sondern auch die inneren Lasten und die Bauwerksintegrität. Die Bauwerke wurden früher jedoch meist nicht berechnet, sondern nach Faustregeln entworfen. Dies führte gelegentlich dazu, dass der Entwurf noch während der Bauphase geändert werden musste, so im Fall Alderney, wo die Neigung der Vorderwand die zunächst 1:1,5 betrug, im zweiten Bauabschnitt auf 1:2, im dritten schließlich auf 1:3 verringert wurde, da schon während des Baues Schäden auftraten. Außerdem wurde die seeseitige Wand des Wellenbrechers erweitert und erhöht, um die Auflast auf die äußeren Blöcke der Seeseite und damit die auf diese wirkenden Haltekräfte zu erhöhen.

Gegenwärtig gibt es keine Berechnungsmethode für Blockbauwerke. Moderne Finite-Element (FE)-Programme erlauben jedoch den Bau ‚diskreter Blöcke', aus welchen Modelle derartiger Bauwerke zusammengesetzt werden können. Ein derzeit laufendes Forschungsprojekt an der Queen's University Belfast beschäftigt sich mit der Ermittlung der Spannungszustände innerhalb von Blockbauwerken. Die ersten FE-Rechnungen zeigten Ergebnisse, die einen sehr starken Zusammenhalt der Blöcke suggerierten, was den Beobachtungen an realen Bauwerken widersprach. Um ein qualitatives Bild der Spannungszustände zu erhalten, wurden daher spannungsoptische Versuche durchgeführt. Bei dieser Versuchstechnik wird ein 2D-Modell, z.B. eines typischen Querschnittes aus einem transparenten Kunststoffmaterial, nachgebaut. Unter polarisiertem Licht erscheinen die durch äußere Lasten hervorgerufenen Spannungen als Linienbild. Der große Vorteil dieser Versuchstechnik ist die Tatsache, dass das Bauwerksmodell einfach aus Blöcken aufgebaut werden kann, so dass alle nichtlinearen Rand- und Übergangsbedingungen erfüllt sind. Die Abb. 14a zeigt eine Vorderansicht einer Wand mit Gleichstreckenlast, Abb. 14b dieselbe Wand mit Punktlast und 14c schließlich einen Querschnitt durch Alderney Breakwater mit einer Punktlast an der Seeseite.

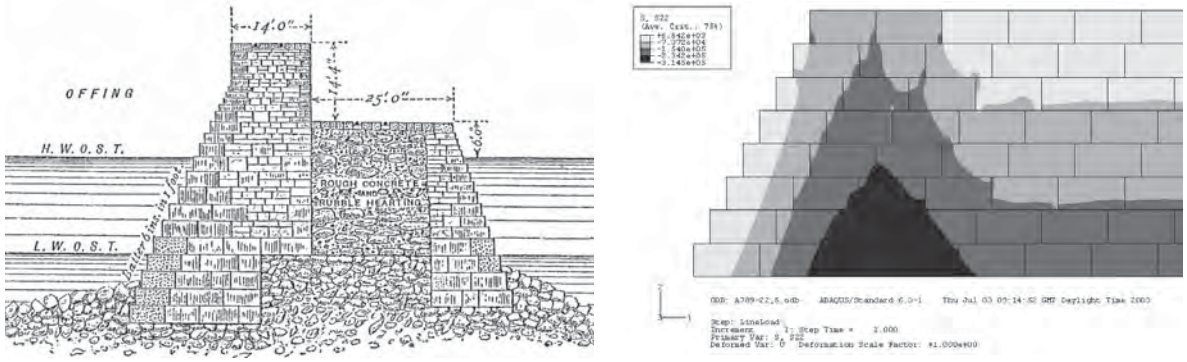


a. Wand mit Gleichstreckenlast b. Wand mit Punktlast c. Schräge Wand mit Punktlast

Abb. 14: Spannungsoptische Versuche mit Blockwerk-Wand (KLAVZAR, 2003)

Die Abb. 14a zeigt, dass selbst in einer regelmäßigen Wand einzelne Blöcke (Pfeil) eine stark reduzierte Auflast erfahren können; dies ist höchstwahrscheinlich durch Imperfektionen (kleine Abweichungen der Größe der Blöcke voneinander) verursacht. Die Modellblöcke waren 20 × 10 mm groß, die Standardabweichung der Länge und Höhe der Blöcke betrug 0,3 %. Dies verringert natürlich die Kraft, die zum Entfernen des Blockes benötigt wird. Abb. 14b zeigt das überraschende Ergebnis, dass die durch eine Punktlast erzeugten Spannungen sich nicht unter einem Winkel von etwa 60 Grad ausbreiten, wie allgemein angenommen wird, sondern, dass die Spannungen nach anfänglicher Ausbreitung eine Art ‚Stütze' bilden. In einer abgetreppten Wand hat dies zur Folge, dass die Auflast kaum zusätzliche Vertikalkräfte auf die seeseitigen Blöcke des Hauptkörpers des Wellenbrechers ausübt, siehe Abb. 14c. Der erwartete positive Effekt der Seewand scheint daher nur unvollkommen zu sein. Die bestehenden Imperfektionen der Blöcke (oder z.B. kleinste Baugrundbewegungen) können daher einen starken Einfluss auf das Bauwerksverhalten haben.

Mit den aus den spannungsoptischen Versuchen gewonnenen Erkenntnissen konnten das FE-Modell korrigiert und ähnliche Ergebnisse erzielt werden (Abb. 15). Die genauere Analyse der Blockbauwerke steht jedoch erst am Anfang; derzeit können weder dynamische Lasten noch die Bewegung der einzelnen Blöcke modelliert werden.



a. Querschnitt Admiralty Breakwater b. Spannungen aus FE-Rechnung

Abb. 15: Ergebnisse der FE-Rechnung

Die Spannungsanalyse zeigte, dass die Haltekräfte, die auf einzelne Blöcke wirken, deutlich geringer sein können, als die allgemeine Annahme der gleichmäßigen Verteilung der Spannungen impliziert. Die Wahrscheinlichkeit eines Schadensfalles (Herausdrücken) ist daher nicht gleichmäßig auf alle Blöcke verteilt, sondern erreicht für einzelne Blöcke mit niedrigen Haltekräften einen Maximalwert.

6. Diskussion

Die Ergebnisse von Untersuchungen zu Wellendrücken und den dadurch verursachten Druckwellen lassen in Kombination mit den Spannungsuntersuchungen am Bauwerksmodell und den aufgezeigten Schadensbeschreibungen und Sanierungsmaßnahmen zusammen einige Schlussfolgerungen bezüglich der Sanierung von Blockbauwerken zu. Da die Schäden aller Wahrscheinlichkeit nach durch von außen verursachte, aber von innen wirkende Drücke verursacht werden, sind Behelfsmaßnahmen, wie das Verkeilen der Blöcke gegeneinander

oder das Anbringen von Stahlbändern, um das Aufweiten von Rissen zu vermeiden, nur bedingt hilfreich. Das Herstellen einer undurchlässigen Außenhaut – durch sorgfältiges Vermörteln und im Extremfall durch Vorbetonieren einer Stahlbetonwand – verringert die Gefahr des plötzlichen Innendrucks und daher der Schadensentstehung. Schadstellen haben wahrscheinlich schon vor dem Auftreten des Schadens Schwachstellen dargestellt, an denen z.B. die Außenblöcke nicht genug Auflast bekamen. Eine Reparatur durch Einfügen neuer Blöcke oder durch Ausbetonieren sollte hier also eine Verankerung der Blöcke auf Zug beinhalten.

Das Abschätzen des Versagensrisikos eines Blockbauwerks stellt auch heute eine Herausforderung dar; gleichzeitig wird ein *‚risk-assessment‘* aber häufig aus Gründen der Überflutungssicherheit (bei Kaimauern) oder aus versicherungstechnischen Gründen notwendig. Dies kann gerade heute auch bei gegenwärtig standsicheren Bauwerken erforderlich sein, da die Sturmhäufigkeit und -intensität und damit die Belastung der Küstenbauwerke ansteigt. In einigen Fällen hat sich auch, z.B. durch eine von Schnellfähren verursachte Verformung des geschütteten Unterbaues, die Wellenbelastung stark erhöht (Breakwater Holyhead). Zu den Gründen für die Schwierigkeiten bei der Risikoabschätzung ist anzumerken: Die Größe, Dauer und Auftretenswahrscheinlichkeit der Wellendruckschläge sind weitgehend unbekannt, ebenso wie die Eigenschaften des Wasser-Luftgemisches im Bauwerk selbst. Die Antwort des Bauwerks auf die dynamischen Lasten ist noch unklar. Die im Rahmen des BloCSNet-Netzwerkes bisher geleistete Arbeit hat jedoch mit der Identifizierung der wahrscheinlichen schadensverursachenden Mechanismen, des statischen Verhaltens und der Analyse von Blockbauwerken sowie der Bauwerksanforderungen (Standsicherheit und Bauwerksintegrität) schon einige Fortschritte gebracht.

7. Deiche und Deckwerke

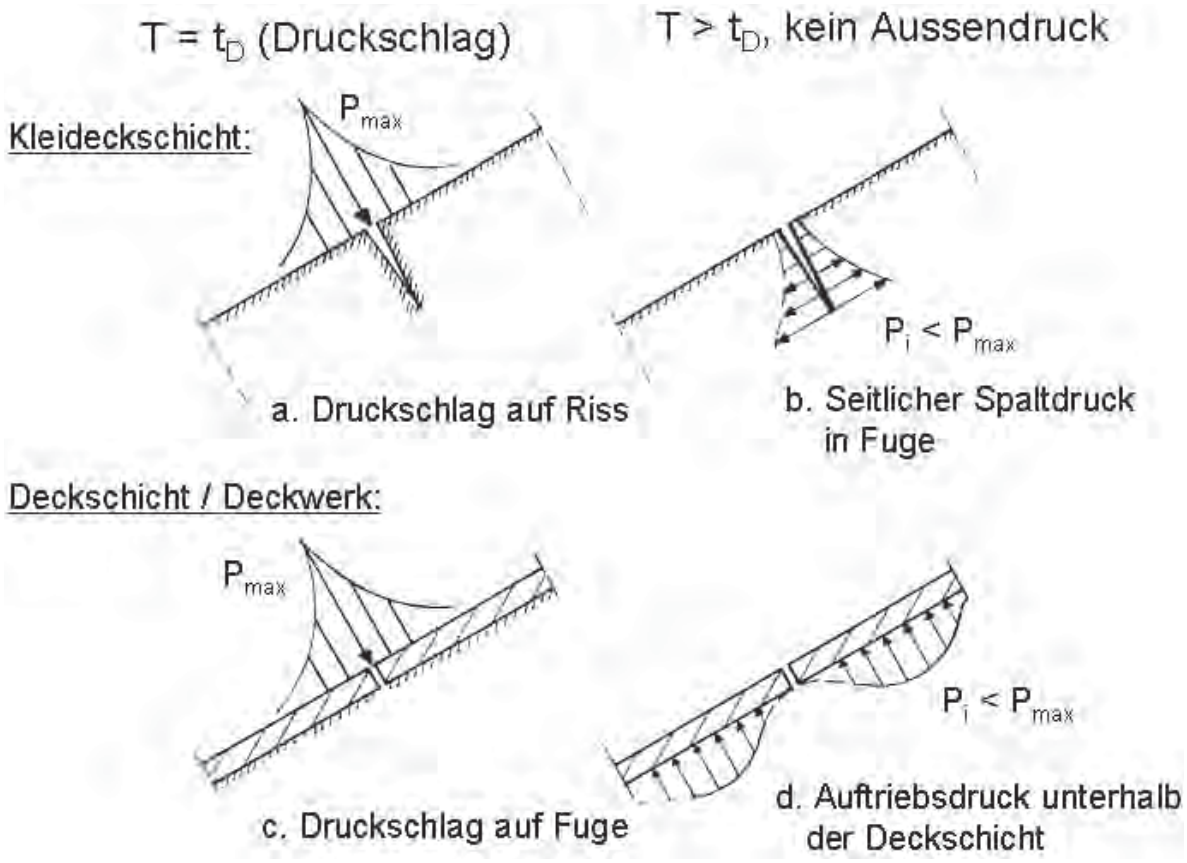
Der im Vorigen beschriebene schadensverursachende Mechanismus, bei dem Druckwellen durch wassergefüllte Risse und Spalten ins Innere eines Bauwerks vordringen, tritt vermutlich auch bei Deichen mit undurchlässiger Deckschicht (Klei oder Bitumen) oder Deckwerken auf. Hier wird angenommen, dass Fugen oder z.B. im Sommer entstandene Trockenrisse oder durch von Nagetieren gegrabene Löcher sich während eines Sturmereignisses mit Wasser füllen. Eine auf die Fugen- oder Rissöffnung schlagende Brecherzunge verursacht dann hohe Drücke an der Außenseite und Spalt- bzw. Auftriebskräfte im Inneren des Deiches. Abb. 16 zeigt einige Schadensfälle, wobei die kraterähnlichen Schäden in Abb. 16a sowie die nach oben gehobenen Deckwerksblöcke in Abb. 16b eine von innen heraus wirkende Kraft vermuten lassen.

Aufgrund der beobachteten Schäden hatten FÜHRBÖTER et al. (1976) vermutet, dass gleichzeitig mit dem Auftreten des Druckschlages gleichhohe ‚hydrostatische‘ Drücke innerhalb von Fugen bzw. Trockenrissen und unterhalb von Deckwerksblöcken entstehen. Diese Drücke würden dann zu Spalt- (Trockenriss) bzw. abhebenden Kräften (Deckwerke) führen (FÜHRBÖTER et al., 1976).

Die im Zusammenhang mit Blockbauwerken durchgeführten Versuche führen hingegen zu der Annahme, dass die Druckschläge auf Deiche ebenfalls Kompressionswellen verursachen, die durch Risse oder Fugen ins Innere der Deiche eindringen und dort zeitverschobene und wesentlich kleinere Drücke erzeugen. Hierbei sollte bemerkt werden, dass die Fugenöffnungen für die Kompressionswellen nach Verschwinden des Druckschlags atmosphärischen Druck erzwingen.

a. Kraterförmige Schäden an einem Deich

b. Schäden an einem Deckwerk



c. Mechanismus

Abb. 16: Schäden und schadensverusachender Mechanismus an Deichen

Die Abb. 16c zeigt den vermuteten Mechanismus. Gegenwärtig ist noch wenig über die eigentlichen Ursachen der in Abb. 16 gezeigten Schäden oder über die Eigenschaften der Kompressionswelle im wassergesättigten Material bekannt, obwohl ein genaueres Wissen um den Mechanismus natürlich auch für eine Abschätzung der Versagenswahrscheinlichkeit derartiger Bauwerke von großer Wichtigkeit ist. Geotechnische Betrachtungen zur Stabilität von Deckschichten unter Sprengwirkung wurden von RICHWIEN (2002) durchgeführt.

Die Küste, 68 (2004), 143-163

8. Schluss

Viele Küstenschutzbauwerke aus dem 19. und frühen 20. Jahrhundert wurden als so genannte *blockwork structures* ausgeführt, also als Bauwerke, die aus großen Fels- oder Betonblöcken aufgebaut sind. Eine große Anzahl dieser Bauwerke wird auch heute noch genutzt. Schäden an Blockbauwerken gaben Anlass zu der Vermutung, dass welleninduzierte Sprengdrücke sich durch wasser- und luftgefüllte Spalten ins Innere des Bauwerks fortpflanzen können. Modellversuche bestätigten diese Annahme. Innerhalb eines derzeit noch laufenden Forschungsprogrammes werden Feldmessungen und Modellversuche im Großmaßstab durchgeführt. Hierbei wurden Wellendruckschläge sowie die durch diese hervorgerufenen Druckwellen in (künstlichen) Rissen am Admiralty Breakwater auf Alderney/ Channel Islands sowie im Großen Wellenkanal (Hannover) gemessen. Da das statische Verhalten von Blockbauwerken weitestgehend unbekannt ist und keine Berechnungsverfahren für diese existieren, wurden spannungsoptische Modellversuche und FE-Berechnungen durchgeführt. Aus den verschiedenen Forschungsaktivitäten können die folgenden Schlüsse gezogen werden:

1. Wellendruckschläge können durch wasser- oder luftgefüllte Risse und Spalten ins Innere eines Bauwerks dringen und dort zeitlich verschobene, nach außen wirkende Sprengdrücke verursachen.
2. Die Besonderheiten der Spannungsverteilung in Blockbauwerken kann bewirken, dass einzelne Blöcke kaum Auflast bekommen, so dass die an diesen wirkende Haltekraft gering und die Gefahr eines Entfernens durch Sprengdrücke hoch ist.
3. Aufbauend auf den Erkenntnissen aus diesem Forschungsprogramm zum Thema Blockbauwerke wurde ein Zusammenwirken der Wellendruckschläge und von besonderen Eigenschaften der Blockbauwerke als wahrscheinlich schadensverursachende Ursache identifiziert.
4. Die Versagenssicherheit von Blockbauwerken gegen den Angriff brechender Wellen besteht nicht nur aus der Standsicherheit (Kippen, Gleiten), sondern auch aus der Sicherung der Bauwerksintegrität.

Die in diesem Projekt gewählte Herangehensweise als eine Kombination aus Bestands- und Schadensaufnahme, klein- und großmaßstäblicher hydraulischer Modellversuche, Feldmessungen und der physikalischen und numerischen Modellierung der Spannungszustände im Bauwerk hat wesentlich zum Verständnis der Interaktion von Wellenlast und Bauwerk beigetragen. Obwohl einige Fortschritte erzielt wurden, besteht bei der Analyse der Interaktion brechender Wellen mit nicht-monolithischen Küstenbauwerken (Blockbauwerke, Deiche) immer noch erheblicher Forschungsbedarf, um realistische Versagenswahrscheinlichkeiten ermitteln zu können.

9. Danksagungen

Die Autoren möchten sich bei William Allsop (Hydraulic Research Wallingford), Adam Bezujin (GeoDelft), Tom Bruce (University of Edinburgh), Prof. Geoff Bullock (University of Plymouth), Joachim Grüne (Forschungszentrum Küste), Andreas Klavzar (Universität Karlsruhe), Andreas Kortenhaus (TU Braunschweig), Charlotte Obhrai (University of Plymouth), Prof. Hocine Oumeraci (TU Braunschweig) und Steven Price (States of Alderney) für die für dieses Projekt geleistete Unterstützung bedanken.

Die hier beschrieben Forschungsarbeiten wurden durch die Unterstützung des

Engineering and Physical Sciences Research Council (EPSRC) unter Grant No. GR/R30600 ermöglicht, die Versuche im Großen Wellenkanal durch das EU-Programm *„Access to Research Infrastructure Action of the Human Potential Programme (contract HPRI-CT-1999-00101)“*.

10. Schriftenverzeichnis

ALLSOP, N. W. H. u. BRAY, R. N.: Vertical Breakwaters in the United Kingdom: Historical and Recent Experience, Proc. Int. Works. Wave Barriers in Deepwaters, Port & Harbour Research Institute, Yokosuka (Japan), 76–100, 1994.

BEZUIJEN, A.; ALLSOP, N. W. H. u. BRUCE, T.: Stability of Blockwork Breakwaters and Seawalls, Proc. 28th Int. Conf. Coastal Eng., Cardiff/UK, 1317–1327, 2002.

BLACKMORE, P. A. u. HEWSON, P.: Experiments on Full-Scale Wave Impact Pressures, Coastal Engineering, Vol. 8, pp. 331–346, Elsevier, Amsterdam, 1984.

BRAY, R. N. u. TATHAM, P .F. B.: Old Waterfront Walls – Management, Maintenance and Rehabilitation, E & FN Spon, 1992.

BRUCE, T.; FRANCO, L.; ALBERTI, P.; PEARSON, J. u. ALLSOP, N. W. H.: Violent Wave Overtopping: Discharge Velocities, Trajectories and Resulting Crown Deck Loading, Proc. 4th Int. Symposium Waves 2001, Am. Soc. Civ. Eng., 1783–1796, 2001.

BULLOCK, G. N.; HEWSON, P.; CRAWFORD, A. R. u. BIRD, P. A. D.: Field and Laboratory Measurements of Wave Loads on Vertical Breakwaters, Proceedings Coastal Structures 99, Santander/Spain, 613–622, 1999.

BULLOCK, G.; OBHRAHI, C.; MÜLLER, G.; WOLTERS, G.; PEREGRINE, H. u. BREDMOSE, H.: Field and Laboratory Measurement of Wave Impacts, Proc. Coastal Structures 2003, Portland/Oregon, 2003.

EAK: Empfehlungen für Küstenschutzwerke, Die Küste, Heft 65, 2002.

EAU: Recommendations of The Committee for Waterfront Structures, Harbors and Waterways, 7th Ed., Ernst & Sohn, Berlin, 2000.

FÜHRBÖTER A., DETTE H. H. u. GRÜNE J.: Response of Seadykes Due to Wave Impacts, Proc. 15th Int. Conf. Coast. Eng., 2605–2620, 1976.

FÜHRBÖTER, A. u. SPARBOOM, U.. Full Scale Investigations on the Stability of Concrete Block Slope Revetments, in: Modelling Soil-Water-Structure Interactions, Balkema, Rotterdam, 209–217, 1988.

KLAVZAR, A.: The Structural Analysis of Blockwork Coastal Structures, Diplomarbeit, Queen's University Belfast, Civil Engineering Department & Universität Karlsruhe, Fakultät für Bauingenieurwesen, Institut für Baustatik, 2003.

KORTENHAUS, A.; OUMERACI, H.; KOHLHASE, S. u. KLAMMER, P.: Wave Induced Uplift Loading of Caisson Breakwater, Proc. 24th Int. Conf. Coast. Eng., 1298–1311, 1994.

MINIKIN, R. R.: Winds, Waves and Maritime Structures, Griffin & Co. Ltd, London, 1950.

MÜLLER, G. u. WHITTAKER T. J. T.: An Evaluation of Design Wave Impact Pressures, ASCE Journal of Waterw. Port, Coastal and Ocean Engng., Vol. 122, No 1, 55–58, 1996.

MÜLLER, G: Propagation of Wave Impact Pressures into Water Filled Cracks, Proc. Inst. Civ. Engineers, Water and Maritime, Vol. 124, Issue 2, 79–85, 1997.

MÜLLER, G. u. WOLTERS, G.: The Effect of Wave Action on Structures With Large Cracks, Proc. 4th Int. Symp. on Ocean Wave Measurement and Analysis, Vol. 2, San Francisco, 1773–1782, 2001.

MÜLLER, G.; WOLTERS, G.; BULLOCK, G. u. OBHRAI, C.: Druckschlagfortpflanzung in Rissen von Bauwerken, Tagungsband 4. Fzk-Kolloqium, Forschungszentrum Küste, Hannover, 119–131, 2003.

MÜLLER, G.; WOLTERS, G. u. COOKER, M.: Characteristics of Pressure Pulses Propagating Through Water Filled Cracks, Coastal Engineering, Vol. 49, No. 1–2, 83–98, 2003a.

PRANDTL, L.; OSTWATITSCH, K. u. WIEGHARDT K.: Führer durch die Strömungslehre, 8. Aufl., F. Vieweg & Sohn, Braunschweig, 1984.

PRICE, S.: Pers. Kommunikation, States of Alderney, 2003.

RICHWIEN, W.: Ansatz zur Bemessung von Außenböschungen von Seedeichen, BAW-Kolloqium: Der Einfluss von Lufteinschlüssen auf die Strömungs- und Druckdynamik in Erdbauwerken, Karlsruhe, 2002.

ROUVILLE, M. A.; BESSON, M. M. P. u. PETRY P.: Etudes Internationales sur les effort dus aux lames, Ann. Ponts Et Chaussées, No. VII, Vol. 108, 5–113, 1938.

SHIELD, W.: Principles and Practice of Harbour Construction, Longmans, London, 1895.

SKLADNEV, M. F. u. POPOV, I. Y.: Studies of Wave Loads on Concrete Slope Protections of Earth Dams, Proc. Symp. Research on Wave Action, Vol. 2, Delft Hydraulics, Delft, 1969.

VIERFUSS, U.: Ermittlung der Seegangsbelastung für Helgoländer Molenbauwerke, HANSA 139, Heft 1, S. 68–73, Januar 2002.

WYLIE, B. u. STREETER, V. L.: Fluid Transients, McGraw Hill Inc., New York, 1978.