Zeitschrift: Schweizer Ingenieur und Architekt
Herausgeber: Verlags-AG der akademischen technischen Vereine
Band: 110 (1992)
Heft: 9

Artikel: Wellennutzung vor dem Durchbruch?
Autor: Vischer, Daniel L.
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-77867

Nutzungsbedingungen
Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation
L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use
The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 07.08.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

lokal und punktuell angestrebt und möglich.

Ausblick

Derzeit laufen am LESO der EPF Lausanne Bemühungen, vorhandene Forschungsresultate und -ansätze in den Bereichen

- Gebäudeproduktmodelle und Prozess-Simulationen
- Energie- und Stoffbilanzen im Bauwesen
- Elementegliederung für Erneuerung und Unterhalt

so zu koordinieren, dass angestrebte Lösungen im Bereich einer parallelen finanziellen, energetischen und ökologischen Bewertung von Gebäuden während ihrer gesamten Lebensdauer bearbeitbar und im Projektierungsalltag anwendbar werden [7]. Derzeit wird an den daten- und rechentechnischen Grundlagen für einen zur EKG-Methode kompatiblen Bauteilkatalog gearbeitet, welcher die finanzielle durch eine energetische und ökologische Bewertung ergänzen soll. *Bild 1* illustriert Vorgehen und Anliegen.

Die Laufzeit des Projektes beträgt 2 Jahre und bezieht Einrichtungen wie die ETH Zürich und die Hochschule für Architektur und Bauwesen Weimar mit ein. Die Koordination mit internationalen Standardisierungsbemühungen, insbesondere der ISO STEP Standards für Produktdaten im Bausektor [8] sowie der konzeptionellen Gebäudemodelle, den sog. Building Product Models [9] ist ebenfalls von Anfang an vorgesehen.

Der Beitrag konzentrierte sich bewusst auf das Problem der Einordnung der energetischen und ökologischen Bewertung in den Projektierungsablauf. Auf die Darstellung daten- und bewertungsseitiger Probleme wird verzichtet und der Leser auf einen vorliegenden Bericht [5] verwiesen. Mit dem Nachweis der Eignung der Elementkostengliederung und der damit gesicherten Struktur von Daten und Bewertungsablauf ist aus Sicht der Autoren ein *erstes Teilresultat* erreicht.

Adressen der Verfasser: *Dr. Niklaus Kohler*, Arch. EPFL-SIA; *Markus Holliger*, Arch. HTL., Laboratoire d'Energie Solaire. LESO - EPFL, 1015 Lausanne; *Dr. Ing. Thomas Lützkendorf*, Hochschule für Architektur und Bauwesen Weimar, Fakultät Bauingenieurwesen, D-O 5300 Weimar.

Literatur

[1] SN 506 502 - Schweizer Norm : EKG - Elementkostengliederung 1991. CRB Zürich 1991.
[2] IP-BAU: Elementgliederung für Erneuerung und Unterhalt. Provisorische Version Mai 1991.
[3] *Kohler, N.*: Analyse énergetique de la construction, utilisation et démolition de bâtiments. EPFL, Thèse no. 623; Lausanne, 1986
[4] *Lützkendorf, Th., Grenzdörfer, G.*: Beiträge zur Erfassung, Bewertung und Optimierung des Energieaufwandes bei Gebäuden, HAB Weimar, Dissertation A, 1985
[5] *Kohler, N., Lützkendorf, Th., Holliger, M.*: Energie- und Schadstoffbilanzen im Bauwesen. Forschungsprojekt des BEW ref. (89) 46. EPFL-LESO, Schlussbericht 1991
[6] *Kohler, N., Lützkendorf, Th., Holliger, M.*: Leitfaden für die Erstellung von Energie- und Stoffbilanzen, Entwurf. EPFL-LESO, November 1991.
[7] *Kohler, N.*: Modelization of a building during its life time. Seminaire du Conseil International du Bâtiment-CIB-«The Computer Integrated Future» Eidhoven NL - Sept. 1991.
[8] *Giellingh W.*, - General Reference Model for AEC Product Definition Data, TNO/IBBC, Delft, report B1-87-87, 1987.
[9] *Bjoerk, B.C.*: A Unified Approach for Modelling Construction Information, to be published in Building and Environment 1991/92

Wellennutzung vor dem Durchbruch?

Schon seit vielen Jahrzehnten werden Projekte verfolgt, um die Meeresenergie zu ernten. Im Vordergrund stehen dabei Konzepte zur Nutzung der thermischen und der hydraulischen Energie. Hier wird das Augenmerk auf die letztere gerichtet, und zwar auf die Wellenenergie: Wie kann das ewige Auf und Ab der Meeresoberfläche in elektrischen Strom umgewandelt werden? – Nebst einer kurzen Übersicht über das Wesen der Wellenenergie und der in Entwicklung begriffenen Energiewandler werden nachfolgend zwei kleine norwegische Prototypen und ein englisches Grossprojekt vorgestellt.

VON DANIEL L. VISCHER, ZÜRICH

Die Wellenenergie

Die Meereswellen werden vom Wind erzeugt. Sie enthalten sowohl kinetische als auch potentielle Energie. Die kinetische ergibt sich aus der horizontalen Wellenbewegung und der Orbitalbewegung, die potentielle aus dem Unterschied zwischen Wellenberg und Wellental. Die natürliche Wellenlinie der Tiefwasserwelle zeigt oft eine Trochoide. Doch hat im Prinzip jede Welle ihre eigene Form.

Im Sinne einer Näherung kann die in kW ausgedrückte Wellenleistung P pro Meter Wellenfront aus dem Produkt der in Sekunden gemessenen Wellenperiode T und dem Quadrat der in Metern gemessenen Wellenhöhe H berechnet werden:

$$P \approx TH^2$$

Das Dargebot an Wellenenergie ist recht hoch. So wurde beispielsweise für die deutsche Küste an der Nordsee eine mittlere Wellenleistung von 14 kW/m veranschlagt und für die norwegische Küste eine solche von 24 kW/m. An anderen Orten, wie etwa im Nordostatlantik, haben langjährige Wellenmessungen gar eine mittlere Leistung von fast 100 kW/m ergeben. Die gleichen Messungen zeigten aber auch den Schwankungsbereich von Welle zu Welle im Bereich von fast 0 bis 300 kW/m, mit Extremwerten bei Sturm von 1 MW/m. Gelegentlich ist sogar mit «Killerwellen» von 10 MW/m zu rechnen.

Die Wellennutzertypen

In vielen Ländern wurde bereits eine Unzahl von Patenten eingereicht, die sich mit Wellennutzung befassen. Um die Übersicht zu erleichtern, sei hier folgende Klassifizierung vorgenommen:

Typ 1: Gelenkige Flosse und Tauchwände, d.h. Ausnützung der wellenbe-

dingten Relativbewegung zwischen festen Schwimmkörpern.

Typ 2: Tanzende Bojen, d.h. Ausnützung der wellenbedingten Bewegung eines Schwimmkörpers gegenüber dem Meeresgrund.

Typ 3: Ondulierende Schläuche, d.h. Ausnützung der wellenbedingten Verformung eines elastischen Schwimmkörpers.

Typ 4: Oszillierende Wassersäulen, d.h. Ausnützung einer wellenbedingt oszillierenden Wassermasse und der darüber liegenden Luftsäule in einem schwimmenden oder am Ufer stehenden Hohlkörper.

Typ 5: Gleichrichter, d.h. Umwandlung der auf einen schwimmenden oder am Ufer stehenden Körper auflaufenden Wellen in eine gleichgerichtete Strömung und Nutzung derselben.

Beispiele von bekannten Entwicklungen

Die von *Salter* an der Universität Edinburgh entwickelten *«nickenden Enten»* sind vom Typ 1, gehören also zu den gelenkigen Flossen. Es handelt sich um eine Reihe von dicken Klappen, die zusammen eine parallel zu den Wellenfronten schwimmende Mole bilden. Die Klappen wippen an ihrem freien Ende mit den Wellen auf und ab und sind an ihrem festen Ende auf einer gemeinsamen Achse gelagert. Die Relativbewegungen zwischen den Klappen und der festen Achse werden benutzt, um eine Flüssigkeit zu komprimieren (Bild 1a).

Nach der einschlägigen Literatur könnte ein entsprechendes Kraftwerk wie folgt aussehen: Auf einer hohlen Achse von 500 m Länge und 14 m Durchmesser sind 40 Klappen aufgereiht, die bei Wellengang Drehbewegungen von etwa 30° ausführen. Dadurch wird in einem Spalt um die hohle Achse eine Flüssigkeit auf rund 30 bar komprimiert und einer speziellen Turbine zugeführt. Diese treibt einen Generator an. Die Wasserverdrängung des im wesentlichen aus Beton und Stahl bestehenden Kraftwerkes liegt bei etwas mehr als 50 000 m³. Seine elektrische Leistung dürfte im Nordatlantik im Mittel um 20 MW liegen.

Von *Cockerell*, dem Erfinder des Luftkissenbootes, stammt eine andere Idee, die Wellen mit einem *«gelenkigen Floss»* zu nutzen. Sein Floss besteht aus einzelnen, mit Scharnieren verbundenen Gliedern, die von den Wellen relativ zueinander bewegt werden. Über den Scharnieren sind Gestänge angebracht, die Kolbenpumpen antreiben. Die Bewegung wird damit in die Kompression einer Flüssigkeit umgewandelt, die ähnlich wie bei den «nickenden Enten» zum Antrieb einer speziellen Turbine verwendet werden kann (Bild 1b).

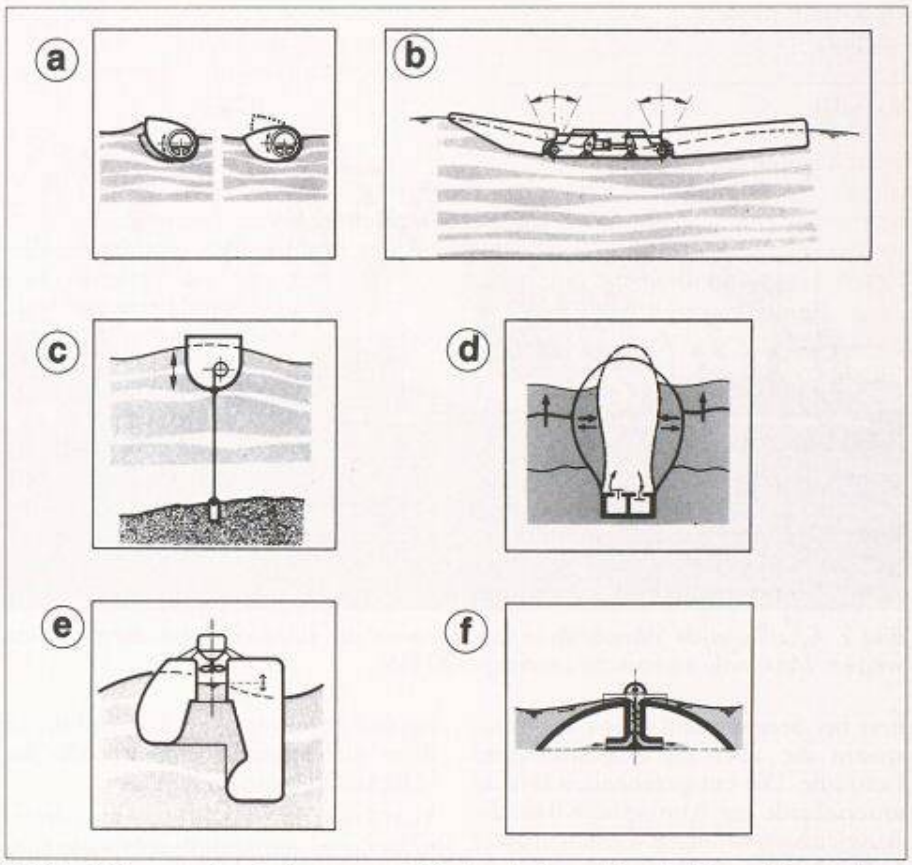

Bild 1. Bekannte Entwicklungen: a) Nickende Ente, b) gelenkiges Floss, c) tanzende Boje, d) schwimmender Blasebalg, e) oszillierende Wassersäule, f) künstliches Atoll

Andere Konstrukteure verfolgen das Prinzip des Typs 2, nämlich die Nutzung des wellenbedingten *Auf- und Abtanzens* einer Boje. So entwickelten Forscher in *Trondheim* eine grosse Boje, die längs ihrer straffen Verankerung vertikale Schwingungen ausführen kann. Dabei wird in ihrem Innern eine Kolbenpumpe in Gang gesetzt, deren Zylinder fest mit der Boje und deren Kolben fest mit der Verankerung verbunden sind. Die Kolbenpumpe wird verwendet, um eine Wasserturbine anzutreiben (Bild 1c).

Die «nickende Ente», das «gelenkige Floss» und die «tanzende Boje» sind Entwicklungen, die etwa auch als *Wellenpumpen* bezeichnet werden, weil sie das Auf und Ab der Wellen zunächst zum Antrieb einer Pumpe benutzen, deren Förderstrom dann in einer Turbine genutzt wird.

Auch beim Typ 3 gibt es solche Wellenpumpen. Der in *Lancaster* entwickelte *«schwimmende Blasebalg»* besteht aus einem langen Gummischlauch, der quer zu den Wellenfronten angeordnet wird (Bild 1d). Im Innern ist er durch flexible Schoten in Kammern unterteilt. Wenn er nun infolge der längs über ihn laufenden Wellen verformt wird, werden diese Kammern alternierend zusammengepresst und wieder entspannt. Beim Zusammenpressen geben sie einen Teil ihrer Luft an die unter dem Balg geführte Hochdruckleitung ab. Beim Entspannen werden sie aus der parallel dazu geführten Niederdruckleitung wieder aufgefüllt. Die Hochdruckleitung und die Niederdruckleitung bilden zusammen einen Luftkreislauf, der durch eine Luftturbine genutzt werden kann. Für die Grossausführung wird an einen 200 m langen Gummibalg von 6 m Breite und 4 m Tiefe gedacht. Darunter wäre ein Betonbalken befestigt, der die Hoch- und Niederdruckleitung enthalten würde. Dieser Ballast würde den Gummibalg etwa zu 80% in das Meer eintauchen lassen.

Die Technik des Typs 4, d.h. jene der *oszillierenden Wassersäule*, wird bereits heute für geringe Leistungen eingesetzt, und zwar für die Energieversorgung von Leuchtbojen. Für grössere Leistungen gibt es eine Fülle von Vorschlägen, unter anderem aus Japan, England und Deutschland. Im folgenden wird auf eine Entwicklung des englischen *«National Engineering Laboratory»* (NEL) hingewiesen (Bild 1e):

Ein grosser Schwimmer umschliesst eine mit dem Meerwasser kommunizierende Wassersäule. Diese oszil-

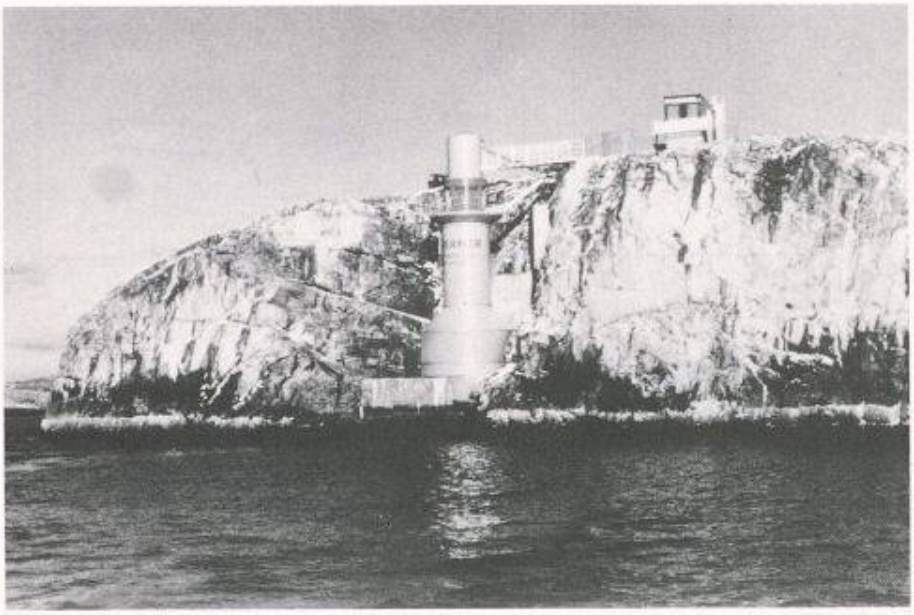

Bild 2. Oszillierende Wassersäule von Kvaerner auf Toftestallen bei Bergen, Norwegen. Maximale elektrische Leistung 500 kW

liert bei Seegang und presst oder entspannt die über ihr eingeschlossene Luftsäule. Die entsprechenden Druckunterschiede zur Atmosphäre bzw. die Ausgleichsströmungen werden in einer Luftturbine genutzt. Durch eine geschickte Unterteilung der Luftwege und den Einsatz von grossen Ventilklappen (in Bild 1e nicht gezeigt, jedoch in Bild 6) wird dafür gesorgt, dass diese Turbine immer denselben Drehsinn hat. Eine Alternative dazu bestünde im Einsatz eines Verstellpropellers oder einer sogenannten Wellsturbine (siehe weiter unten). Ein auf dieser Technik beruhendes Wellenkraftwerk würde aus mehreren Schwimmern bestehen, die zu einer schwimmenden Mole zusammengebaut würden.

In der Literatur wird diese Technik etwa auch als diejenige der *«umgestülpten Büchse»* bezeichnet, in welcher Luft eingefangen und durch den Wellengang auf und ab bewegt wird. Die Turbine ist dann gleichsam in einem Loch des «Deckels» untergebracht.

Vom Typ 5, d.h. vom Prinzip der *Gleichrichter,* gibt es ebenfalls sehr viele Entwicklungen. Hier sei nur das Beispiel (Bild 1f) des *«künstlichen Atolls»* erwähnt. Bei einem natürlichen Atoll kann beobachtet werden, dass die Meereswellen nicht einseitig auflaufen, sondern fast allseitig. Sie werden infolge der Diffraktion im Küstenbereich gleichsam um das Atoll gewickelt. Von diesem Effekt angeregt, ersannen Ingenieure der Firma Lockheed in Kalifornien ein künstliches Atoll, das als Wellennutzer verwendet werden kann. Es besteht aus einer schwimmenden Kuppel mit einem zentralen Schacht. Die aussen auf die Kuppel auflaufenden Wellen werden durch sternförmig angeordnete Leitwände dem Schachtkopf zugeführt. Das entsprechend antransportierte Wasser strömt dann durch den Schacht ab und treibt eine vertikalachsige Wasserturbine mit darüberliegendem Generator an. Die Ingenieure rechnen mit einer Grossausführung, die etwa 100 m³/s Wasser verarbeiten und damit 2 MW erzeugen könnte. Die Kuppel würde aus Beton hergestellt, einen Ø von 75 m aufweisen und 18 m ins Wasser eintauchen. Ein Kraftwerk würde aus mehreren, in gewissen Abständen verankerten «künstlichen Atollen» bestehen.

Bei den bis jetzt beschriebenen und in Bild 1 skizzierten Wellennutzern handelt es sich durchwegs um *schwimmende Anlagen.* Sie gleichen einem vor Anker liegenden Schiff und folgen damit auch dem allfälligen Gezeitenhub. Ihr Abstand zur Küste ergibt sich aus einem Kompromiss zwischen Erfordernissen, die hier bloss mit den Stichworten «günstige Wellenvorkommen, guter Ankergrund und kurze Distanz für den Energieabtransport» angedeutet werden sollen. Wo der Gezeitenhub nur gering ist oder fehlt, kommen aber auch feste, auf dem Meeresgrund oder auf der Küste sitzende Anlagen in Betracht. Dies gilt insbesondere für die Typen 4 und 5, also für die Kraftwerke mit oszillierender Wassersäule und mit Gleichrichtern. Die im nächsten Abschnitt vorgestellten beiden norwegischen Prototypen und ein englisches Grossprojekt sind vielversprechende Beispiele dafür.

Zu erwähnen ist noch, dass bei sämtlichen Typen mit Ausnahme der Gleichrichter jeweils eine *Resonanz* angestrebt wird. Es geht darum, den Wirkungsgrad der Wellennutzer dadurch zu erhöhen, dass ihre Eigenfrequenz mit der Frequenz der Meereswellen in Übereinstimmung gebracht wird. Nun variiert diese Wellenfrequenz aber beträchtlich, so dass die Wellennutzer eher

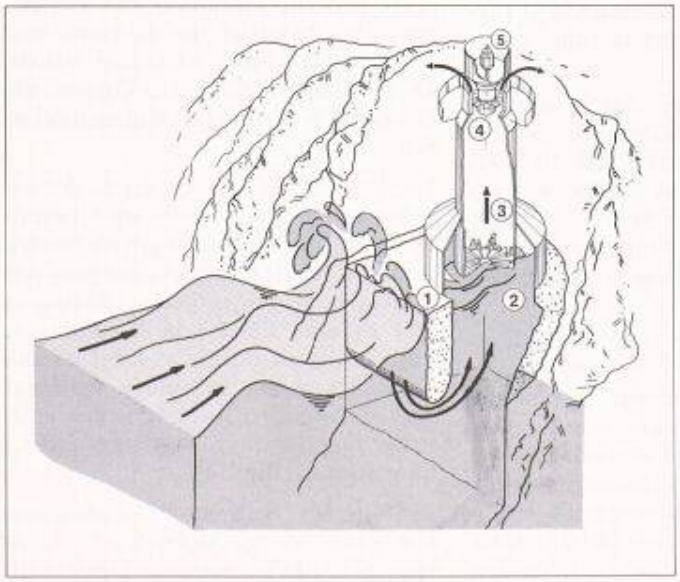

Bild 3. Oszillierende Wassersäule von Kvaerner. (1) Fassungsbauwerk, (2) Oszillationskammer, (3) Spritzschutz, (4) Wellsturbine, (5) Generator

Bild 4. Tapchan von Norwave auf Toftestallen, Norwegen. Maximale elektrische Leistung 350 kW. Blick von der Fassung zum «Tapered Channel» (Spitzkanal) und zum Ausgleichsbecken

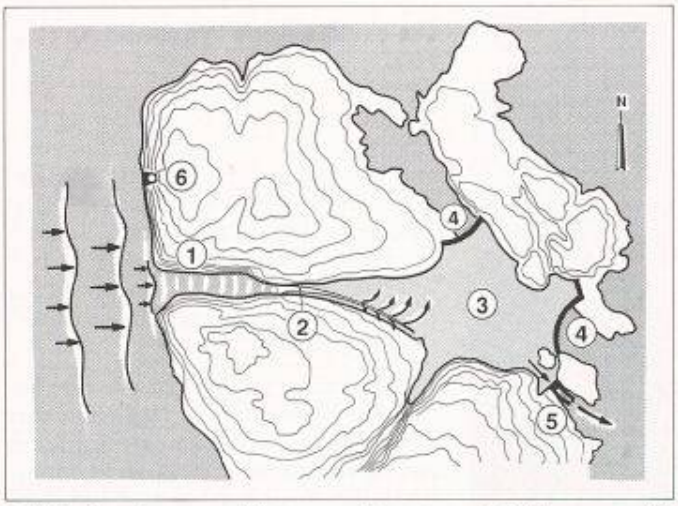

Bild 5. Tapchan von Norwave. Situation mit (1) Fassung, (2) «Tapered Channel», (3) Ausgleichsbecken, (4) Abschlusssperren, (5) Wasserkraftwerk, (6) Oszillierende Wassersäule von Kvaerner gemäss Bildern 2 und 3

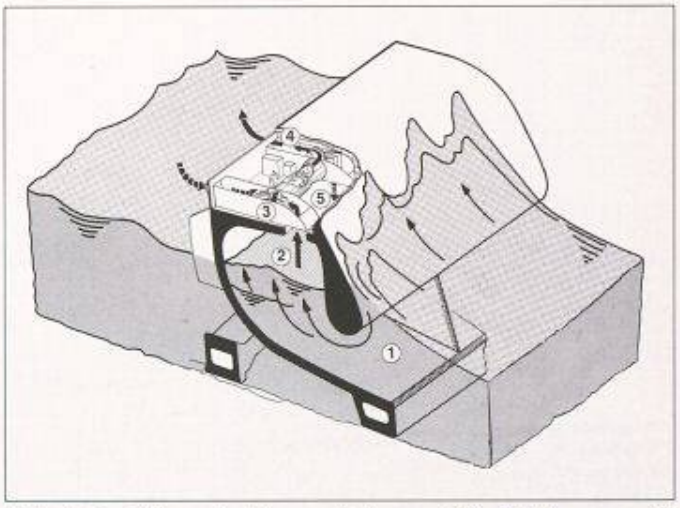

Bild 6. Oszillierende Wassersäule von NEL. (1) Fassung, (2) Oszillationskammer, (3) linker Luftkanal, (4) rechter Luftkanal, (5) Luftturbine mit umströmtem Generator

auf hohe Wellenfrequenzen und damit auf einen kleinen Seegang ausgelegt werden. In andern Worten: Ihr Wirkungsgrad ist besonders bei kleinem Seegang gut und nimmt bei zunehmendem Seegang ab. Dies kann aber, weil bei grossem Seegang ohnehin sehr viel mehr Wellenenergie anfällt, in Kauf genommen werden. Von einer laufenden und darum technisch aufwendigen Abstimmung der Wellennutzer auf den jeweiligen Seegang wurde deshalb bis jetzt abgesehen.

Die oszillierende Wassersäule von Kvaerner

Auf Toftestallen, einem felsigen Küstenpunkt vor Bergen, haben die Norweger gleich zwei Wellenkraftwerke installiert. Eines davon wurde von der Firma *Kvaerner* nach dem Prinzip der *oszillierenden Wassersäule* entwickelt (Bilder 2 und 3). Am auffälligsten daran ist die «umgestülpte Büchse», das heisst der Stahlzylinder, der senkrecht an einer steilen Felsklippe befestigt ist und ins Meer eintaucht. Dieses ist dort 60 m tief, so dass die Meereswellen unbeeinflusst vom Meeresgrund anfallen (Bild 6).

Wie die Bilder 2 und 3 deutlich zeigen, ist der Stahlzylinder zweigeteilt: Das obere Stück ist dünner als das untere. Das Ganze ruht auf einem Betonfundament, das einem Wasserfassungs- und Wasserrückgabebauwerk entspricht. Dort wird die Wellenenergie in die Energie einer im dickeren Zylinderstück oszillierenden Wassersäule umgewandelt, die wie ein Kolben wirkt, der die darüberliegende Luft durch das dünne Zylinderstück ausstösst oder von dort ansaugt. Das heisst, die oszillierende Wassersäule erzeugt eine oszillierende Luftsäule, beziehungsweise eine auf- und abstreichende Luftströmung. Diese treibt eine am oberen Ende des Stahlzylinders angeordnete vertikalachsige Wellsturbine an, die direkt mit einem darüber liegenden Generator gekuppelt ist. Die *Wellsturbine* (nach ihrem Erfinder A.A. Wells, Belfast, benannt) zeichnet sich dadurch aus, dass sie ihren Drehsinn unabhängig von der Anströmungsrichtung beibehält. Ihr wesentlichstes Merkmal ist ein Laufrad, das mit festen und nicht angewinkelten Laufschaufeln bestückt ist.

Das Wellenkraftwerk ist, gemessen vom Einlaufboden des Fassungs- und Rückgabebauwerkes bis zum Deckel des Generators, rund 27 m hoch und ragt 20 m aus dem Wasser. Das dickere Zylinderstück, das heisst die Oszillationskammer des Wassers, weist einen Ø von rd. 8 m auf und ist für Oszillationen bis zu ± 3,5 m ausgelegt. Ein darüberliegender Spritzschutz sorgt dafür, dass keine schweren Spritzer durch das dünnere Zylinderstück aufsteigen und auf die Wellsturbine prallen. Die Turbine ist auf eine maximale Leistung von 500 kW, gemittelt über eine Wellenperiode, oder von 1000 kW als plötzliche Belastung, ausgelegt. Das Turbinenlaufrad von 2 m Durchmesser dreht mit 1500 U/Min. Der Wechselstromgenerator hat eine Kapazität von 600 kVA.

Das Wellenkraftwerk von Kvaerner wurde nach verschiedenen Versuchen anfangs 1987 auf das Netz geschaltet und lief längere Zeit automatisch. Die jährliche Stromerzeugung soll in der Grössenordnung von 1 Mio. kWh gelegen haben. Wie unlängst zu vernehmen war, wurde sie dann aber von einem Sturm zerstört. Ein zu schwach bemessener Halterungsring löste sich, so dass die gesamte Stahlkonstruktion versank.

Der Tapchan von Norwave

Das andere, ebenfalls auf *Toftestallen* realisierte Wellenkraftwerk arbeitet nach dem *Gleichrichterprinzip* (Bilder 4 und 5). Es wurde von der Firma *Norwave* projektiert und besteht aus einem neuentwickelten und darum unkonventionellen Teil sowie aus einem konventionellen. Beim letzterem handelt es sich um nichts anderes als um ein Niederdruck-Wasserkraftwerk, das sein Triebwasser aus einem durch Eindämmung eines kleinen Sunds geschaffenen Ausgleichsbecken bezieht, verarbeitet und an das Meer abgibt.

Der neuentwickelte Teil bezieht sich dementsprechend auf die Füllung des Ausgleichsbeckens, und zwar durch auflaufende Wellen. Damit der Spiegel des Ausgleichsbeckens möglichst hoch über dem Meeresspiegel gehalten werden kann, wird der Auflaufeffekt durch zwei Bauwerke verstärkt: Eine Fassung als Wellensammler mit einem anschliessenden Wellenwandler.

Die *Fassung* zielt mit ihrer Einlauföffnung gegen die Hauptwellenrichtung des Meeres und leitet die Wellen in ein Vorbecken, das sich im Grundriss düsenförmig ausnimmt. Zu seiner Herstellung wurde der natürliche Zugang zum Sund mittels Felsausbruch ausgeweitet und angepasst. Beton und andere Baustoffe gelangten nicht zur Anwendung.

Der an die Fassung anschliessende *Wellenwandler* besteht hingegen zur Gänze aus Beton. Es handelt sich um einen Rechteckkanal, der sich weit ins Ausgleichsbecken zieht und verjüngt. Auf englisch wird er deshalb als *«Tapered Channel»* (verjüngter bzw. spitz zulaufender Kanal) bezeichnet, was zur Ab-

Bild 7. Oszillierende Wassersäule von NEL. «Artist's View» eines Moduls mit 4 Turbineneinheiten in rund 20 m tiefem Wasser. Maximale elektrische Leistung 1700 kW

kürzung *«Tapchan»* geführt hat. Seine Aufgabe ist es, die in ihn einlaufenden Wellen so zu erhöhen, dass sie über seine Wände ins Ausgleichsbecken schwappen. Äusserlich gleicht er einem zweiseitigen Streichwehr, das intermittierend entlastet.

Der Erhöhungseffekt ergibt sich aus dem Umstand, dass die Höhe einer durch einen Rechteckkanal laufenden Welle etwa umgekehrt proportional zur Quadratwurzel aus der Kanalbreite ist. Nimmt also die Kanalbreite in der Laufrichtung ab, so wächst die Wellenhöhe schliesslich bis zur Kanalhöhe. Dann findet die erwähnte seitliche Entlastung des Wellenwassers statt. Die entsprechend instationäre und diskontinuierliche Strömung ist sehr kompliziert, weshalb Norwave die Abmessungen der Fassung und des Wellenwandlers aufgrund von zwei hydraulischen Modellen bestimmte. Die Einlauföffnung der Fassung ist 60 m breit, das Vorbecken und der Kanal sind je 90 m lang. Die Kanalbreite verjüngt sich bei gleichbleibender Tiefe von 3 m auf 0,2 m. Die leichte Krümmung des Kanaltrassees hat keine hydraulische Bedeutung; sie ist fundationstechnisch bedingt.

Mit diesem System gelingt es in Toftestallen, das Ausgleichsbecken so zu füllen, dass seine Oberfläche 5500 m² einnimmt und rund 3 m über dem Meeresspiegel liegt. Das zugehörige Niederdruck-Wasserkraftwerk weist eine installierte Leistung von 350 kW auf und soll pro Jahr rund 2 Millionen Kilowattstunden Strom produzieren. Die ganze Anlage ging Ende 1985 in Betrieb und arbeitet heute noch. Probleme ergaben sich einzig durch Steine, die bei Sturm vom Meeresgrund aufgewirbelt und in den Spitzkanal oder noch weiter verfrachtet wurden. Gegenüber dem benachbarten Kraftwerk mit der oszillierenden Wassersäule besitzt der Tapchan infolge seines Ausgleichsbeckens den grossen Vorteil, dass er *konsumangepasster* produzieren kann.

Meldungen in Fachzeitschriften ist zu entnehmen, dass die mit beiden Prototypen gemachten positiven Erfahrungen zu mehreren Projekten für grössere Anlagen in Norwegen und anderswo geführt haben.

Die oszillierende Wassersäule des NEL

Weiter oben wurde bereits darauf hingewiesen, dass das *National Engineering Laboratory,* UK, (NEL), Wellennutzer entwickelt. Besonders gefördert wird in den letzten Jahren eine Version, die nicht schwimmen, sondern in beispielsweise 1 bis 2 km Abstand von der Küste auf dem Meeresgrund stehen soll (Bilder 6 und 7).

Diese Version nimmt sich wie eine betonierte Mole oder ein Wellenbrecher aus. Ihre einzelnen Elemente werden in einem Trockendock hergestellt, eingeschwommen, abgesenkt und mit Felsankern stabilisiert. Entsprechend dem Prinzip der *oszillierenden Wassersäule* bestehen sie im wesentlichen aus Oszillationskammern, Fassungen, Turbinen, Generatoren und Luftkanälen. Die zu einer einzelnen Turbine gehörende Oszillationskammer ist rechteckig und weist unten eine meerwärts gerichtete Fassung und oben zwei landwärts gerichtete Luftkanäle auf. Diese sind mit einem dritten Luftkanal verbunden, in welchem die horizontalachsige Luftturbine mit dem direkt gekuppelten und umströmten Generator liegt. Auf diese Weise und mittels Klappen, die an den Kanalabzweigungen angebracht sind, ist es möglich, die Turbine immer in der gleichen Richtung zu beaufschlagen. Dabei kann man gleichsam zwei Takte unterscheiden: Im ersten Takt, wenn der Wasserspiegel der Oszillationskammer steigt, dringt die Luft in den linken Luftkanal ein, wird zur Turbine umgelenkt und im rechten Luftkanal ins Freie ausgestossen. Im zweiten Takt, wenn der Wasserspiegel fällt, wird die fehlende Luft über den linken Kanal angesaugt, zur Turbine umgelenkt und über den rechten Kanal in die Oszillationskammer abgegeben.

Die an der Entwicklung beteiligten Ingenieure haben ein Molenelement entworfen, das sie als *Modul* bezeichnen. Es kann entweder einzeln oder im Verbund mit andern eingesetzt werden. Im ersten Fall (Bild 7) weist es folgende Charakteristiken auf: Es steht in 19 bis 23 m tiefem Wasser, ist 84 m lang, 34 breit und 36 hoch und enthält 4 Einheiten, das heisst 4 Oszillationskammern mit den zugehörigen Maschinen und Luftkanälen. Jede Oszillationskammer hat einen Querschnitt von 15 m auf 15 m. Die installierte Leistung einer Turbine wird zu 430 kW bei 610 U/Min. angegeben. Dementsprechend wäre die nominelle Leistung eines Moduls 1700 kW.

Das NEL erhielt 1989 den Auftrag, in Indien ein 5-MW-Kraftwerk zu projektieren, das sich auf die vom NEL durch-

geführten intensiven Vorarbeiten stützt.

Probleme der Wellennutzung und Schlussfolgerung

Die mit der Wellenhöhe quadratisch ansteigende Wellenleistung kann zu einer Gefährdung der Bauwerke führen. Sie verlangt bei starkem Seegang entweder ein Absenken des gesamten Bauwerkes unter die Wasseroberfläche oder eine Auslegung auf die grösste zu erwartende Welle. Dadurch werden umfangreiche und teure Sicherungsmassnahmen nötig. Bei einigen Systemen besteht eine weitere Schwierigkeit darin, dass der Wellennutzer an die jeweilige Wellenlaufrichtung angepasst werden muss.

Das Seeklima und das Seewasser sind äusserst aggressiv und verlangen den Einsatz von korrosionsfesten und entsprechend teuren Materialien. Dazu kommen Bewuchsprobleme an den dem Seewasser ausgesetzten Teilen.

Bei der Verwertung der Energie stellt der intermittierende und unregelmässige Anfall derselben ein grosses Problem dar. Die Seegangsverhältnisse sind ja äusserst variabel und nur auf wenige Tage voraussehbar.

Die Wellennutzer verursachen im Meer zwangsläufig eine Veränderung der Wellenhöhe und der Wellenperiode. Dadurch wird der Wellenschlag und die Brandung an einer leewärts liegenden Küste verringert, so dass dort möglicherweise die notwendigen Einrichtungen für den Küstenschutz einfacher gehalten werden können. Dabei muss allerdings berücksichtigt werden, dass bei Ausfall von schwimmenden Wellennutzern der Küstenschutz trotzdem funktionieren muss. Die Glättung der Oberfläche durch Entnahme von Wellenenergie ist für die Schiffahrt einerseits von Vorteil.

Anderseits stellen sperrige Wellennutzer ein gefährliches Hindernis in den Schiffahrtswegen dar.

Die Verringerung der Wellen durch die Wellennutzer kann zu einer Verlangsamung von Austauschvorgängen zwischen der Meeresoberfläche und den tieferen Wasserschichten führen und die Strömungen verändern. Dies könnte sich in einer weiteren Umgebung ökologisch ungünstig auswirken.

Trotz diesen Problemen ist aber zu erwarten, dass die Wellennutzung bald ihren Beitrag zur Stromversorgung einzelner Inseln und Küstenbereiche leisten wird. In diesem Sinne kann die eingangs gestellte Frage bejaht werden: *Die Wellennutzung steht tatsächlich vor dem Durchbruch zur technischen Reife und wirtschaftlichen Machbarkeit!* Wie bei jeder andern Energietechnik schreitet ihre Entwicklung aber nur langsam voran. Rasche und spektakuläre Erfolge sind auch bei dieser Alternativenergie nicht zu erzielen.

Adresse des Verfassers: *Daniel L. Vischer*, Prof. Dr., Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, ETH-Zentrum, 8092 Zürich

Torevaluation

Die heutigen Produktions- und Lagerhallen stellen vielseitige, komplexe Anforderungen an den Torbau. Eine frühzeitige Torevaluation spart manch späteren Ärger.

VON PETER JUCKER, USTER

Einerseits werden die zu schliessenden stützenlosen Öffnungen immer grösser aufgrund der Anforderungen an eine immer rationellere Logistik. Anderseits soll auch in diesen Hallen dauernd eine angenehme Raumtemparatur herrschen. Dies gilt natürlich auch für Werkhöfe und Depots des öffentlichen Verkehrs, Flugzeughangars, für LKW-Garagen und -Revisionswerkstätten. War man noch vor wenigen Jahren zufrieden, grosse Hallenöffnungen so zu schliessen, dass Ungebetenen der Zutritt verwehrt blieb, so sind heute vier Kategorien von Wünschen zu erfüllen:

- Die Ein- und Ausfahrtzeiten sind bei gleichzeitigem Minimieren des Unfallrisikos zu kürzen. Die Öffnungs- und Schliessgeschwindigkeit des Tores muss also erhöht werden.
- Der Energieverbrauch muss aus Kosten- und Umweltschutzgründen sinken.
- Die Arbeitsbedingungen der Mitarbeiter sind zu verbessern, damit die Personalfluktuation sinkt.
- Die Betriebssicherheit bei minimaler Wartung muss garantiert bleiben.

Falttorfront, Rega-Stützpunkt Gossau: Rasches Öffnen, gute Wärmedämmung, lange Lebensdauer (Alle Bilder: Jucker Tor AG, Uster)

Gitter-Falttorfront als Abschluss für Sicherheitsschleuse für Geldumschlag: Robuste Bauweise, rasches Öffnen, lange Lebensdauer