

HENRY

Hydraulic Engineering Repository

Ein Service der Bundesanstalt für Wasserbau

Conference Paper, Published Version

Davide, Magagna; Müller, Gerald

Meerwasserentsalzung mit Wellenenergie

Dresdner Wasserbauliche Mitteilungen

Zur Verfügung gestellt in Kooperation mit/Provided in Cooperation with:

Technische Universität Dresden, Institut für Wasserbau und technische Hydromechanik

Verfügbar unter/Available at: <https://hdl.handle.net/20.500.11970/103699>

Vorgeschlagene Zitierweise/Suggested citation:

Davide, Magagna; Müller, Gerald (2009): Meerwasserentsalzung mit Wellenenergie. In: Technische Universität Dresden, Institut für Wasserbau und technische Hydromechanik (Hg.): Wasserkraftnutzung im Zeichen des Klimawandels. Dresdner Wasserbauliche Mitteilungen 39. Dresden: Technische Universität Dresden, Institut für Wasserbau und technische Hydromechanik. S. 153-162.

Standardnutzungsbedingungen/Terms of Use:

Die Dokumente in HENRY stehen unter der Creative Commons Lizenz CC BY 4.0, sofern keine abweichenden Nutzungsbedingungen getroffen wurden. Damit ist sowohl die kommerzielle Nutzung als auch das Teilen, die Weiterbearbeitung und Speicherung erlaubt. Das Verwenden und das Bearbeiten stehen unter der Bedingung der Namensnennung. Im Einzelfall kann eine restriktivere Lizenz gelten; dann gelten abweichend von den obigen Nutzungsbedingungen die in der dort genannten Lizenz gewährten Nutzungsrechte.

Documents in HENRY are made available under the Creative Commons License CC BY 4.0, if no other license is applicable. Under CC BY 4.0 commercial use and sharing, remixing, transforming, and building upon the material of the work is permitted. In some cases a different, more restrictive license may apply; if applicable the terms of the restrictive license will be binding.



Meerwasserentsalzung mit Wellenenergie

Magagna Davide, Müller Gerald

Die Entsalzung von Meerwasser ist kosten- und energieintensiv; insbesondere für den Einsatz in Entwicklungsländern ist daher die Nutzung erneuerbarer Energien von Interesse. An der Universität Southampton wird ein wellenenergiebetriebenes Entsalzungssystem entwickelt das aus einer Wellenpumpe, einer Potenzial-Hochdruckpumpe und einer Osmosezelle besteht. Modellversuche und numerische Modelle zeigten die Funktionsfähigkeit der beiden Haupt-systemkomponenten. Das System ist kostengünstig, robust und benötigt keine komplexe Technologie, externe Energieversorgung oder aktive Steuerelemente und ist daher für den Inselbetrieb in Entwicklungsländern geeignet.

The desalination of sea water is cost- and energy intensive; in particular for the operation in developing countries the utilisation of renewable energy is therefore of interest. At the University of Southampton, a wave energy driven desalination system for stand-alone operation in developing countries is under development. The system comprises a wave pump, a potential-energy high pressure pump and a reverse osmosis cell. Model tests and numerical models showed that both main system components are functioning according to expectations. The system is cost-effective and robust, does not require complex technology, external energy supplies or active control elements and is therefore suitable for developing countries.

1 Einleitung

Die Entsalzung von Meerwasser ist eine vielversprechende Technologie zur Sicherstellung der Trinkwasserversorgung in Küstengebieten. Bestehende Anlagen nutzen entweder die Verdampfung von Wasser oder osmotische Filter um Trinkwasser zu erzeugen. Beide Möglichkeiten sind sowohl technologisch als auch energetisch aufwendig. Um ein Kilogramm Wasser zu verdampfen z.B. ist eine Energie von etwa 2100 kJ notwendig; Osmosefilter benötigen einen Arbeitsdruck von 600 m WS. Herkömmliche Entsalzungsanlagen nutzen komplexe Verfahrenstechnik bzw. mehrstufige Pumpen - mit resultierendem hohen Energie- und Kostenaufwand - um diese Anforderungen zu erfüllen. Für die Versorgung kleiner Siedlungen ist jedoch eine einfache Technologie die erneuerbare Energien nutzt, im Inselbetrieb arbeiten und lokal gewartet und

repariert werden kann erforderlich. Die Nutzung von Wellenenergie bietet sich hierbei an. Die sogenannte ‚Oscillating Water Column‘, eine Kammer mit einem Einlauf unter Niedrigwasserspiegel, wurde von Evans (1981) zur Umwandlung von Wellenenergie vorgeschlagen. Ein Prototyp in Indien nutzt den erzeugten Strom zur Gewinnung von Trinkwasser mittels Stromerzeugung, mehrstufiger Hochdruckpumpen und eines Osmosefilters, siehe den Überblick in Davies (2005). Wellenenergie zum Pumpen von Wasser ist bisher nur selten betrachtet worden. Czitrom et al. (2006) haben eine Wellenpumpe zur Verbesserung der Wasserqualität in Lagunen und Häfen vorgeschlagen die aus einem Rohr und einer Druckkammer besteht; durch Variation des Innendruckes kann die Resonanzfrequenz des Systems an die vorherrschende Wellenperiode angepasst werden. Das System ist jedoch komplex und benötigt eine aktive Steuerung die die Federsteifigkeit kontinuierlich anpasst.

2 Die Potenzial-Hochdruckpumpe (PHDP)

2.1 Überblick

An der Universität Southampton wird derzeit ein System zur Gewinnung von Trinkwasser mittels Wellenenergie entwickelt. Das System besteht aus:

- Einer Wellenpumpe, die das Betriebswasser 2,5 bis 5 H (Wellehöhe) über MWL hebt.
- Einer Potenzialenergie - Hochdruckpumpe (PHDP) an die an der Osmosefilter angeschlossen ist, Abb. 1.
- Der Osmosezelle in der etwa 10% des Salzwassers entsalzt werden.

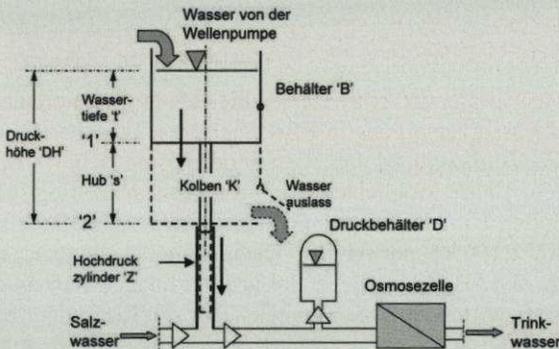


Abbildung 1 Potenzialenergie-Hochdruckpumpe, Prinzip.

2.2 Theorie der PHDP

Eine Potenzialmaschine nutzt die potenzielle Energie des Wassers und wandelt diese in mechanische Energie um; ein typisches Beispiel für eine solche Maschine ist das überschlächtige Wasserrad. Trotzdem dieses seit langem bekannt ist, gibt es nach Wissen der Autoren keine Theorie der Potenzialmaschinen. Die PHDP kann als eine einfache Potenzialmaschine mit der Forderung nach konstanter Kraft betrachtet werden. Der Arbeitshub beginnt, wenn der Behälter ‚B‘, der die Breite b und die Tiefe ‚1‘ hat, gefüllt und der Osmosedruck erreicht ist. Dafür wird ein Volumen V_1 benötigt:

$$V_1 = t \cdot b \cdot 1 \tag{1}$$

Während das Volumen V_1 sich nach unten bewegt, verrichtet es Arbeit. Da konstanter Arbeitsdruck vorhanden sein muss, ist der Arbeitsweg $s = DH - t$. Die gesamte pro Hub verrichtete Arbeit A beträgt dann:

$$A = V_1 \cdot \rho \cdot g \cdot (DH - t) = b \cdot t \cdot \rho \cdot g \cdot (DH - t) \tag{2}$$

Die vorhandene hydraulische Energie E_{hyd} ist:

$$E_{hyd} = V_1 \cdot \rho \cdot g \cdot DH = b \cdot t \cdot \rho \cdot g \cdot DH \tag{3}$$

Damit wird der Wirkungsgrad η :

$$\eta = \frac{A}{E_{hyd}} = 1 - \frac{t}{DH} \tag{4}$$

Abb. 2 zeigt den Wirkungsgrad und die normalisierte Leistung pro Hub. Die maximale Leistung wird bei $t = DH / 2$ bei einem Wirkungsgrad von 50% erreicht.

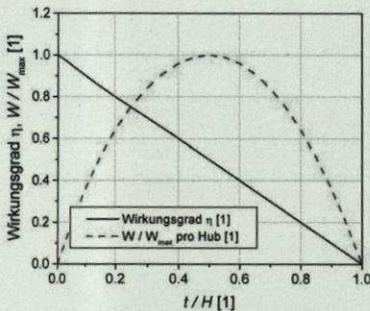


Abbildung 2 PHDP – Wirkungsgrad und Leistung als Funktion der Geometrie.

2.3 Versuche

Ein 1:10 Modell einer PHDP wurde mit den folgenden Dimensionen gebaut:

Behälterhöhe $h = 20 \text{ cm}$

Behältergrundfläche $A = 20 \times 20 \text{ cm}$

Kolbenhub: $s = 19.5 \text{ cm}$

Kolbendurchmesser $D = 1,3 \text{ cm}$

Um die volle Funktionsfähigkeit zu gewährleisten, wurde ein Gegengewicht, dessen Gewicht das des leeren Behälters und des Kolbens leicht übersteigt, über eine Laufrolle am Behälter B angebracht. Nach Entleeren des Behälters zieht das Gegengewicht den Behälter in die Ausgangslage zurück. Damit ergibt sich ein Flächenverhältnis von 1 : 236,6, und ein maximal möglicher Kolbendruck von 464,4 kPa. Behälter und Stützkonstruktion wurden aus Plexiglas gefertigt, Kolben und Zylinder aus Messing mit einer Passgenauigkeit von 0,3 mm. Zusätzlich wurde ein Druckbehälter angeschlossen um den Betriebsdruck zu halten und um Druckstöße aus der Ventiltätigkeit aufzufangen. Am Behälter selbst ist eine $5 \times 20 \text{ [cm]}$ breite Klappe angebracht die sich, sobald der Behälter den unteren Totpunkt erreicht hat, selbsttätig öffnet, und dann beim Hochziehen durch das Gegengewicht nahe am oberen Totpunkt wieder schließt. Für die Ermittlung der Funktionsfähigkeit wurde der Behälter kontinuierlich aus einem Schlauch gefüllt, wobei ein Füllvorgang etwa 20 Sekunden in Anspruch nahm. Als Last wurde eine anfangs luftgefüllte 2 l - PET Flasche verwendet. Das Modell besitzt volle Funktionalität, ohne externe Steuerungselemente.

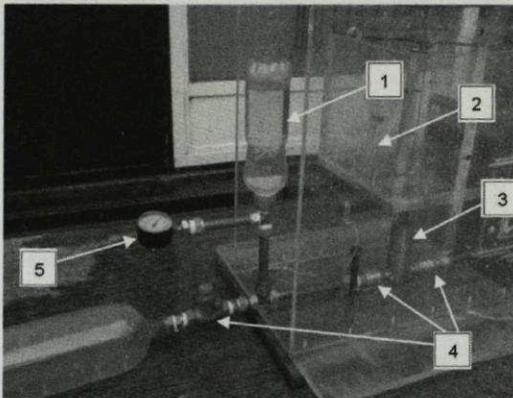


Abbildung 3 PHDP - Dauerversuch.

Abb. 3 zeigt den Versuch, wobei (1) Druckbehälter (0,5 l PET), (2) Behälter B, (3) Zylinder Z, (4) Ventile V1-V3 und (5) Druckmessdose ist. In Abb. 4 sind die

Ergebnisse eines Dauerversuchs dargestellt bei dem der Druck innerhalb der 2l-PET Flasche langsam aufgebaut wurde. Ein Enddruck von 41 m WS wurde erreicht, was nur knapp unterhalb des theoretischen Maximums liegt. Trotz des sehr einfachen Aufbaus und der relativ großen Toleranzen kann die Pumpe als effektiv angesehen werden.

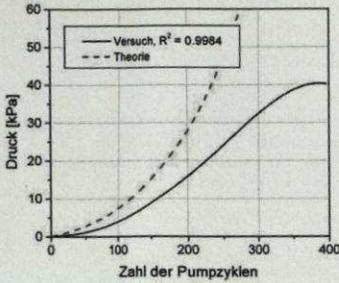


Abbildung 4 Versuchsergebnisse PHDP Dauerversuch

3 Die Wellenpumpe

3.1 Theorie und numerisches Modell

Die Wellenpumpe besteht aus einem einfachen Rohr mit einer kurzen horizontalen Sektion auf dem Meeresboden, und einem angewinkelten Steigrohr das aus dem Wasser heraus bis zur Förderhöhe ragt, Abb. 5. Derartige Systeme – jedoch ohne Pumpwirkung – wurden bereits von Evans (1981) beschrieben, der einen gewichtslosen Kolben im Rohr annahm, woraus sich ein lineares System ergibt.

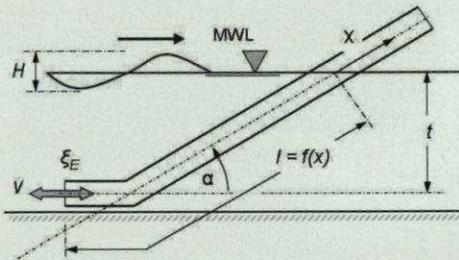


Abbildung 5 Wellenpumpe - Prinzip

In einem linearen System kann die Eigenfrequenz wie folgt bestimmt werden:

$$\omega = \sqrt{\frac{g}{l}} \quad (5)$$

Bei grösseren Auslenkungen – wie sie für eine Wellenpumpe erwünscht sind – stellt das wassergefüllte Rohr jedoch einen nichtlinearen Schwinger dar, dessen Masse abhängig von der Oberflächenlage des Wassers im Rohr ist. Die Strömungsverluste am Ein- und Auslauf sind quadratische Funktionen der Strömungsgeschwindigkeit. Unter Vernachlässigung der Beschleunigungs- und Verzögerungskräfte am Einlauf kann das System mit einer Querschnittsfläche $A = 1$ wie folgt beschrieben werden:

$$\rho(l + l_A + x) \frac{d^2x}{dt^2} + \xi_{A,E} \frac{\rho}{2} \left(\frac{dx}{dt} \right)^2 + \rho g x \sin \alpha = F(t) \quad (6)$$

l : Länge der Wassersäule im Ausgangszustand

l_A : Zus. Länge der Wassersäule (*added mass*)

x : Auslenkung der Wasseroberfläche im Rohr

$\xi_{A,E}$: Verlustfaktor und Aus- bzw. Einlauf, wobei $\zeta_A = 2 \zeta_E$

g : Erdbeschleunigung

t : Zeit

$F(t)$: Erregerfunktion

Eine genauere Betrachtung würde einen Beschleunigungsterm für die Massenänderung in der Form $\rho \cdot (d^2x / dt^2) \cdot (dx/dt)$ beinhalten; derzeit ist jedoch nicht klar ob insbesondere die Verzögerungskräfte aktiv beteiligt sind. Die zusätzliche Länge der Wassersäule von $l_A = 0,17 l$ wird durch das Mitschwingen einer kleinen Wassermenge vor dem Rohreinlauf erforderlich und muss experimentell ermittelt werden. Für den Einlaufkoeffizienten wird der übliche Wert $\zeta_E = 1$ angenommen. Gleichung (6) wird mittels einer Zeitschritt-Vorwärtsintegration ($dt = 0,01$ Sekunden) gelöst; numerische Abweichungen wurden bei Gesamtlaufzeiten $T_L \leq 25$ Sekunden nicht beobachtet.

Eine Pumpfunktion kann simuliert werden, indem die Wasserspiegellage im Rohr konstant gehalten wird, sobald eine gegebene Pumphöhe x_p erreicht wird; das Pumpvolumen $(x - x_p) \cdot A$ wird dann gesammelt.

3.2 Modellversuche

Um die Theorie zu überprüfen, wurden ein kleinmaßstäbliche Versuche in einem Wellenkanal von 4,8 m Länge, 20 cm Breite und 8,4 cm Wassertiefe an

der Universität Southampton durchgeführt. Zur Erzeugung der Wellen dient eine Linearfahreinheit, die eine vertikale Schaufel vor- und zurückbewegt. An beiden Enden des Kanals sind Absorber (Kiesstrand) eingebaut.

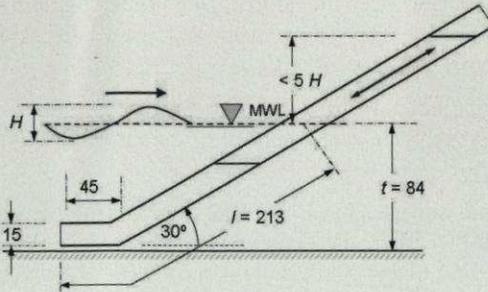
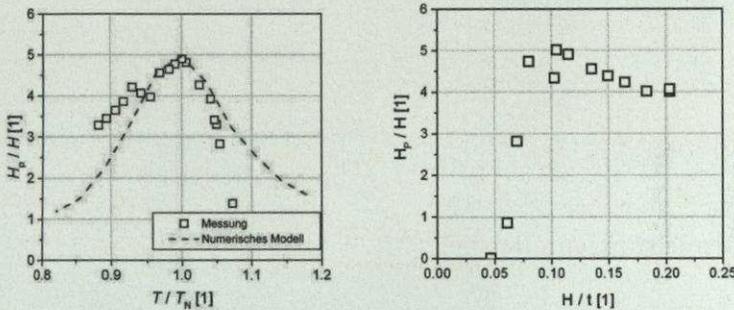


Abbildung 6 Wellenpumpe – Modell (alle Maße in mm).

Die Wellenpumpe besteht aus einem Plexiglasrohr von 15 mm Innendurchmesser wie in Abb. 6 gezeigt. Ein Versuch mit erzwungenen Schwingungen ergab eine Eigenperiode von 1,4 Sekunden, deutlich höher als die nach Formel (1) sich ergebende Wert von 1,01 Sekunden. Zusätzlich zeigte sich dass die obere (positive) Auslenkung deutlich höher und kürzer als die negative Auslenkung war.



a. Normalisierte Pumphöhe, $H = 0,8 \text{ cm}$

b. Normalisierte Pumphöhe, $T = 1,4 \text{ s}$.

Abbildung 7 Pumphöhe als Funktion der Wellenhöhe H und der Wellenperiode T .

Die Ergebnisse der Versuche sind in Abb. 7 dargestellt. Die Frequenzabhängigkeit der Pumphöhe ist in Abb. 7a gezeigt. Die durchgezogene Linie der numerischen Simulation deutet auf die Anwendbarkeit des Modells hin. Die Wellenpumpe nutzt ein Resonanzverhalten und hat eine relativ kleine Bandbreite. Die normalisierte Pumphöhe erreicht 4 – 5 H in Abhängigkeit von der Wellenhöhe H , Abb. 7b. Hier sollte jedoch angemerkt werden, dass die relative

Wassertiefe $H/t = 0,05$ bis $0,22$ im Versuch groß ist. In realen Anwendungen dürfte $H/t > 0,3$ sein, so dass die Wellenwirkung grösser wird.

In einer weiteren numerischen Simulation wurde die Systemantwort für verschiedene Pumphöhen und Wellenperioden untersucht. Das Fördervolumen wird hierbei als Funktion der Wellenhöhe angegeben. Abb. 8 zeigt die Ergebnisse. Diese können wie folgt zusammengefasst werden:

1. Die Eigenperiode des Systems steigt mit zunehmender Energieabnahme
2. Die Bandbreite steigt mit abnehmender Pumphöhe / abnehmendem Pumpvolumen

Um die Leistung der Pumpe einzuschätzen müssen Betriebsanforderungen definiert werden. Dabei spielt sicherlich die Bandbreite eine große Rolle. Bei eine Pumphöhe $H_p/H = 2,5$, und einem Fördervolumen $L_F/H = 1$ beträgt die effektive Bandbreite z.B. $0,15 T/T_E$. Ein reales System würde mehrere Rohre benötigen um ein ausreichendes Frequenzspektrum abdecken zu können.

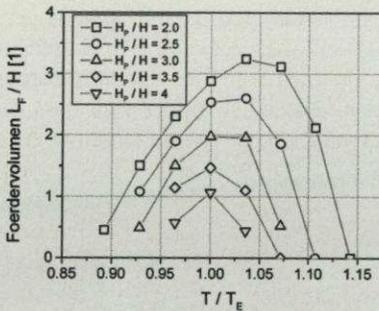


Abbildung 8 Normalisiertes Fördervolumen als Funktion der Wellenperiode und der Pumphöhe (numerisches Modell, $H = \text{const.}$).

4 Systemleistungen - Beispiel

Eine PHDP mit einem Behälter von $1,5 \times 1,5$ [m] Grundfläche und einer Höhe von 1 m hat einen Hub von $s = 1,5$ m. Um den Betriebsdruck von 600 m WS zu erreichen wird ein Kolbendurchmesser von 9,73 cm benötigt (10,9 % Verluste aus Modellversuch). Damit ergibt sich ein Zylindervolumen von 11,16 l. Die Wellenpumpe besteht aus einem Plastikrohr von 0,5 m Durchmesser und 22 m Länge. Die mittlere Wellenhöhe beträgt 1,5 m, mit einer mittleren Wellenperiode von 8,5 Sekunden. Bei einer Förderhöhe von 4,5 m werden 6,4 Wellen benötigt um den Behälter zu füllen; die Kolbenbewegung findet innerhalb einer halben Wellenperiode statt. Bei einer Osmoserate von 10 % können so 1,116 l

pro Hub gewonnen werden; an einem Tag ergibt das eine Leistung von 1,473 m³. Das Restwasser kann genutzt werden, um mittels einer Mini – Pelton-turbine Strom zu erzeugen. Bei einem angenommenen Wirkungsgrad von 60 % ergibt dies eine Dauerleistung von 0,3 kW. Der Wirkungsgrad der Gesamtanlage beträgt 30,8 % bezogen auf die Förderleistung, 7,5 % bezogen auf die vorhandene Wellenenergie (3 m Wassertiefe).

5 Diskussion

Das vorgeschlagene System zur Entsalzung von Meerwasser zeichnet sich durch Einfachheit und Robustheit aus. Insbesondere die Wellenpumpe kann sehr kostengünstig gefertigt werden; von daher ist eine weitere Entwicklung für den Einsatz in Entwicklungsländern geplant. Um die niedrige Bandbreite der Pumpe auszugleichen wird ein ‚Panflöten‘- Arrangement angewandt, das mit vier Rohren einen Bereich von etwa 4-5 Sekunden abdecken kann. Die Einfachheit der Pumpe / ihre niedrigen Kosten machen diese Lösung möglich; eine Anpassung an die saisonal vorherrschenden Wellenperioden durch z. B. Verkürzen der Rohre sollte ebenfalls möglich sein. Die Hochdruckpumpe kann ebenfalls in großen Teilen lokal gefertigt werden und erlaubt die Nutzung ungereinigten Meerwassers – einschließlich Sediment oder organischer Bestandteile - als Betriebswasser. Das Produkt Trinkwasser ist speicherfähig, so dass die zeitlich ungleichförmig anfallende Wellenenergie optimal genutzt werden kann. Die Anlage ist autark und benötigt keine externe Energieversorgung oder aktive Steuerung und ist daher für den Inseleinsatz geeignet. Der gering scheinende absolute Wirkungsgrad muss in Beziehung zu den Kosten der Anlage gesehen werden. Die im Beispiel angenommene Lage der Anlagenbasis etwa 2 m über Mittelwasser reduziert den Wirkungsgrad ebenfalls, ist aber realistisch. Ein kurzer Vergleich mit einer Verdampfungsanlage zeigt dass diese bei einem Wirkungsgrad von 100 % eine Dauerleistung von 34,4 kW benötigen würde; das hier vorgestellte Osmoseverfahren ist daher energetisch wesentlich günstiger als ein thermisches Verfahren. Weitere Modellversuche sowie eine Weiterentwicklung des numerischen Modells sind geplant, ebenso Feldversuche.

6 Schlussbemerkungen

An der Universität Southampton wird derzeit ein System zur Entsalzung von Meerwasser mittels Wellenenergie für den Einsatz in Entwicklungsländern entwickelt. Das System besteht aus einer Wellenpumpe, die die Betriebsdruckhöhe erzeugt, und einer Potenzial-Hochdruckpumpe, welche aus der Betriebs-

druckhöhe von 2-3 [m] WS den für Osmosefilter notwendigen Betriebsdruck von 600 m WS erzeugt. Modellversuche und numerische Modelle zeigten dass die Wellenpumpe Förderhöhen von bis zu 5 H erzielt. Ein 1 : 10 Modell der Hochdruckpumpe erreichte Drücke von 41 m WS. Beide Systemkomponenten sind einfach und kostengünstig herzustellen. Das System benötigt keine externe Energieversorgung und kann im Inselbetrieb arbeiten. Eine Projektion der erwarteten Leistung einer kleinen Vollmaßstabs-Anlage bei einer Wellenhöhe von 1,5 m ergab 1,4 m³ Trinkwasser pro Tag zusammen mit einer Dauerleistung von 4,3 kW Elektrizität.

Danksagung

Die Autoren bedanken sich für die Unterstützung der Forschungstätigkeiten durch die Europäische Kommission im 7. Rahmenprogramm, Vertragsnummer 212423.

Literatur

- Czitrom, S., Godoy, R., Prado, E., Perez, P., Peralta-Fabi, R., Hydrodynamics of an oscillating water column seawater pump. Part I: theoretical aspects. *Ocean Engineering* 27 (2000), S. 1181–1198.
- Davies P.A., Wave-powered Desalination: Resource Assessment and Review of Technology, *Desalination*, Vol. 186 (2005), 1-3, 97-109
- Evans, D., Power from water waves. *Annual Review of Fluid Mechanics*. 13 (1981), S. 157–187.

Autoren:

Dr.-Ing. Gerald Müller,
Dipl.-Ing. Davide Magagna
University of Southampton
School of Civil Engineering and the Environment
Highfield
Southampton SO17 1BJ
Tel.: +44 – 2890 – 59442
g.muller@soton.ac.uk