



Bas Heijman, Technische Universiteit Delft en KWR Watercycle Research Institute

Evgenia Rabinovitch, Technische Universiteit Delft

Ben Statia, Aqualactra

Jasper Verberk, Technische Universiteit Delft

Drinken van de wind

Een prototype van een omgekeerde osmose installatie in combinatie met een windmolen is opgebouwd en uitgetest op Curaçao. De windmolen produceert, volgens ontwerp, vijf m³ per dag bij een gemiddelde windsnelheid van zeven m/s. Nieuw aan het prototype is de directe aandrijving van de hogedrukpomp met windenergie. Hierdoor worden energieverliezen door de omzetting van mechanische energie naar elektrische energie en terug naar mechanische energie vermeden. Er wordt ook geen gebruik gemaakt van dure energieopslag. De permeaatproductie is afhankelijk van de windsnelheid en er is dus een permeaatbuffer noodzakelijk om periodes van lage windsnelheid of zelfs windstilte te overbruggen. Een volgende energiebesparing wordt bereikt door de energie uit het concentraat terug te winnen (energierecovery). De energierecovery unit wordt tevens gebruikt om de (water)recovery van het systeem laag te houden en vervuiling door scaling te voorkomen.

Op 15 november 2007 is er een samenwerkingsovereenkomst getekend tussen de Universiteit van de Nederlandse Antillen (UNA), het Caribbean Water Technology Research Institute (CWRTI), Vewin, NV Surinaamse Waterleidingmaatschappij en de TU Delft. Het doel van deze samenwerking is het ontwikkelen van een hoogwaardige kennisinfrastructuur op het gebied van drinkwater voor de Nederlandse Antillen, Aruba en Suriname. In het kader van deze samenwerking is onder andere onderzoek gestart naar het ontzouten van zeewater door middel van windenergie.

In gebieden met een tekort aan zoet (drink) water en voldoende wind is een combinatie van omgekeerde osmose en een windmolen een logische optie. Vooral op eilanden en in kuststreken en in afgelegen gebieden zonder elektriciteitsnet zal deze combinatie ook economisch renderen. Zeewater of brakwater kan dienen als voedingswater voor omgekeerde osmose terwijl het hoge

energieverbruik van de ontzoutingstechniek gedekt wordt door windenergie. Er zijn alternatieve ontzoutingstechnieken beschikbaar die gebruik maken van duurzame energie voor het maken van drinkwater via verdamping/condensatie^{1),3)}. Omgekeerde osmose (RO) is echter een dusdanig efficiënte ontzoutingstechniek (zie tabel 1) dat het energieverbruik tenminste een factor vier lager ligt ten opzichte van de alternatieven (multi stage flash, multiple effect distillation, vapour compression).

Deze vergelijking gaat niet helemaal op omdat het energieverbruik bij RO uitsluitend elektrische energie betreft en bij de andere technieken ook voor een deel warmte als energiebron nodig is. Bij duurzame systemen zijn wind- en zonne-energie weliswaar gratis maar het hogere energieverbruik van deze ontzoutingalternatieven vertaalt zich dan in hogere investeringskosten van windmolens, warmtecollectoren en/of fotovoltaïsche zonnecellen.

Overbrenging van de windenergie rechtstreeks op de hogedrukpomp.



Tabel 1: Energieverbruik van verschillende ontzoutingstechnieken.

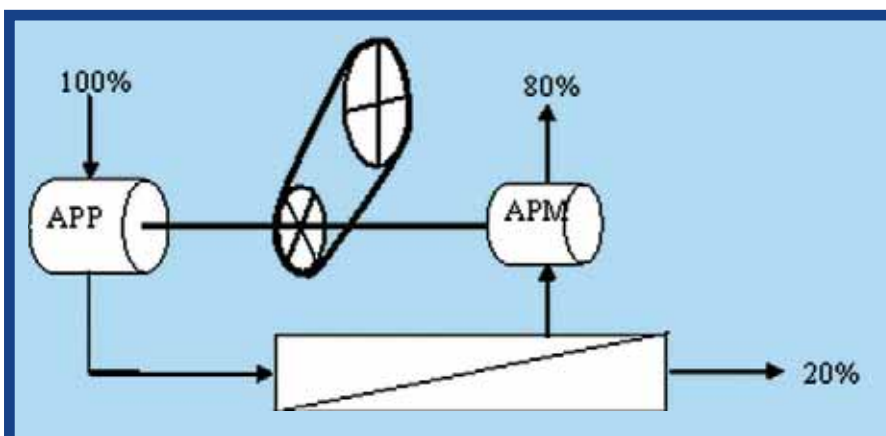
Desalination	kWh/m ³
Multi Stage Flash (MSF)	18
Multiple Effect Distillation (MED)	15
Vapour Compression (VC)	11
Reverse Osmosis (RO)	3
Freeze-thaw	16

De combinatie van een windmolen en een omgekeerde osmose is al eerder onderzocht²⁾. In eerdere concepten produceert de windmolen elektriciteit en wordt de duurzame elektriciteit gebruikt om de hogedrukpomp van de RO-installatie aan te drijven. Vaak wordt ook gebruik gemaakt van accu's om te zorgen voor een constante voedingsdruk in de RO-installatie. Omzetting van mechanische-energie naar elektriciteit, chemische energie en weer terug naar mechanische-energie geeft echter energieverliezen. In het nieuwe concept ontwikkeld door de TU Delft wordt de mechanische energie van de windmolen rechtstreeks gebruikt voor het aandrijven van de hogedrukpomp van de RO. Energie wordt in dit concept niet opgeslagen. De voedingsdruk van de RO installatie varieert met de windsnelheid en daardoor de permeaatproductie ook. Tijdens windstille of zeer lage windsnelheden is er geen permeaatproductie. De variabele productie wordt opgevangen door een buffer van zoetwater aan te leggen. Wateropslag is veel eenvoudiger en veel goedkoper dan energieopslag. De verwachting is dat juist met een variabele productie de laagste waterprijs gerealiseerd kan worden. Om de installatie zo eenvoudig mogelijk te houden is gekozen voor een volledig mechanische opzet: er is dus geen gebruik gemaakt van een elektronische en/of PLC-regeling.

Ontwerp windmolen/RO

In het prototype is gebruik gemaakt van een robuuste en goedkope windmolen die overal in de wereld wordt toegepast voor irrigatiedoeleinden. De rotatiesnelheid van de wiekenas wordt door tandwielen en een poelie 40 maal versneld overgebracht op de as van de hogedrukpomp. Op de dezelfde as is ook de energie recovery unit bevestigd die een groot deel van de energie uit de concentraatstroom terugwint en weer overdraagt via de as aan de hogedrukpomp. De energie-recovery unit en de hogedrukpomp zijn pistonpompen. Deze pompen hebben de eigenschap een vast volume te verplaatsen min of meer onafhankelijk van de voor- en nadruk. Doordat de APM kleiner is dan de APP wordt er altijd een vaste verhouding concentraat weggevoerd ten opzichte van de aangevoerde voeding. De overblijvende stroom (voeding-concentraat = circa 20 procent) kan alleen nog maar door de

Afb. 1: Schematische weergave van de omzetting van windenergie naar mechanische energie (zowel de voedingspomp als de energy recovery unit).



Eerste prototype op de testlocatie in Curaçao.

membranen heen en wordt dus permeaat. In dit systeem wordt de voedingsdruk dus niet ingesteld maar volgt de permeaatproductie en de permeaatproductie is lineair afhankelijk van het toerental van de pomp. Het grote voordeel is dus een vaste lage (water)recovery en de afwezigheid van een

concentraatklep die normaal gesproken hand- of elektronisch geregeld moet worden.

De hogedrukpomp heeft een maximaal toerental van 3.000 rpm. Dit toerental wordt nooit overschreden doordat de windmolen uit de wind draait bij te hoge windsnelheden. Deze beveiliging is standaard op dit type windmolen aanwezig. De hogedrukpomp heeft echter ook een minimaal toerental van 700 rpm. De pomp is namelijk watergesmeerd en bij een te laag toerental kan slijtage optreden. Lage toerentallen worden in deze opzet voorkomen doordat de windmolen pas start bij een bepaalde windsnelheid (zie afbeelding 2). De overbrenging (m.n. de poelie) wordt zodanig gekozen dat het toerental van de hogedrukpomp direct bij het starten al boven de 700 rpm draait. In Curaçao is een overbrenging van 1:20 en 1:40 uitgetest. Bij 1:20 lag de startnelheid van de hogedrukpomp lager dan 700 rpm. Bij 1:40 was de snelheid altijd boven de 700 rpm maar start de molen pas op bij een grotere windsnelheid. Een ideale verhouding zou bij deze combinatie 1:33 zijn. Overigens is bij het opstarten de energierecovery nog niet

functioneel omdat de druk in het systeem nog niet is opgebouwd. Na een aantal minuten als het concentraat wel op druk is zal de energie-recovery energie terugleveren aan de as en wordt de energievraag van de RO minder. De molen stopt daardoor bij de veel lagere windsnelheid van vier m/s.

Een belangrijk aspect in het ontwerp is het voorkomen van scaling. Scaling treedt op als zouten uit het zeewater opgeconcentreerd worden in de membranen. Een lage (water) recovery wordt gewaarborgd door het energy-recovery systeem (zie afbeelding 3). De concentratie van zouten aan de membraanwand wordt tevens bepaald door de concentratiepolarisatie. De concentratiepolarisatie wordt hoger bij lagere cross-flow snelheden maar ook door de flux. Bij lage windsnelheden is de crossflow snelheid laag, maar dat gaat samen met een lage flux, zodat de concentratiepolarisatie vrijwel constant blijft (zie afbeelding 4). De hogedrukpomp gecombineerd met energie recovery geeft dus een ideale combinatie die bij verschillende windsnelheden: recovery en concentratiepolarisatie blijven constant. Druk en permeaat-productie variëren juist wel met de windsnelheid (zie afbeelding 5).

Procesbewaking en permeaatflush

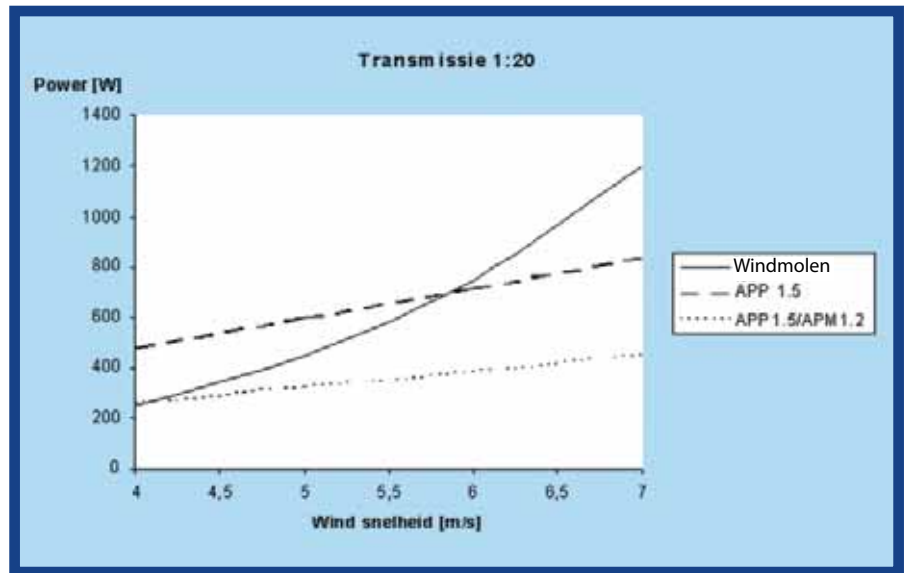
De hogedrukpomp mag niet drooglopen. De gekozen plunjerpomp is watergesmeerd en droogloop zou onherstelbare schade aan de pomp veroorzaken. In het ontwerp moet daarom een beveiliging worden opgenomen die de pomp stilzet op het moment dat er, om welke reden dan ook, geen ruwwater meer aanwezig is. In het prototype is een droogloopbeveiliging gerealiseerd door een kleine voedingtank te gebruiken. Het gewicht van deze tank, gevuld met zeewater, trekt via een kabel een rem los. Indien de tank niet gevuld is dan treedt de rem in werking en stopt de molen en dus ook de hogedrukpomp.

Een andere belangrijker voorziening is de permeaatflush. Bij stilstand van de molen is het beter om de voedingskant van de membranen te flushen met permeaat. De osmotische druk is dan aan beide kanten van het membraan gelijk. Bovendien kan biofouling voorkomen worden door de overgang van hoge naar lage zoutconcentratie (osmotische schok). Het permeaat is kalkagressief; dus als er kalk is neergeslagen op de membraanwand, lost dat weer op als de membranen bij stilstand van de molen met permeaat zijn gevuld.

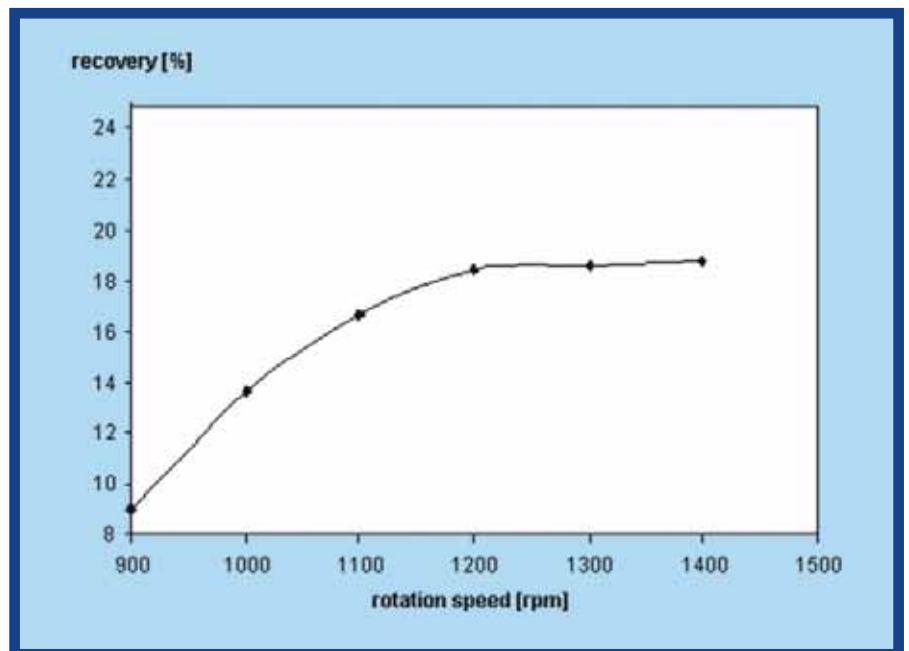
Voor dit doel is een tweede kleine tank gevuld met het permeaat op circa tien meter hoogte in de molen bevestigd. Al het permeaat dat gevormd wordt in de RO gaat eerst naar deze kleine tank voordat het naar de grote buffertank stroomt. De inhoud van de kleine tank wordt bij stilstand van de molen en dus bij het wegvallen van de voedingsdruk, automatisch door de voedingspacers van de membranen gespoeld.

Resultaten prototype Curacao

In afbeelding 5 is te zien dat, zoals verwacht, de waterproductie varieert met de windsnelheid. Bij een windsnelheid van

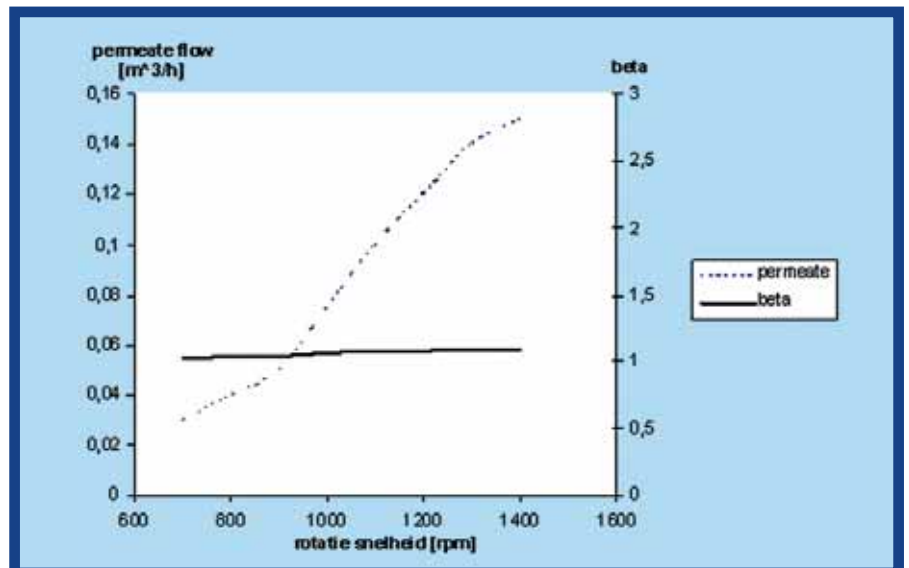


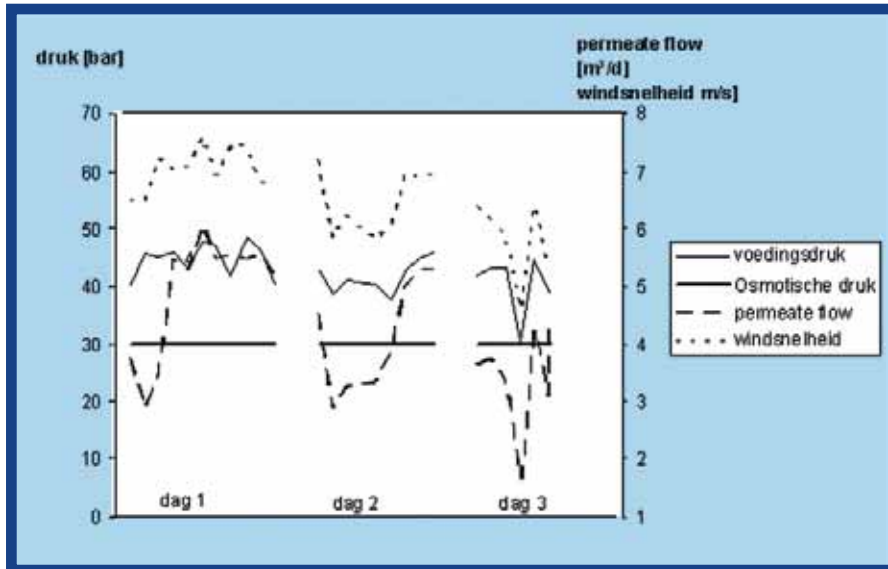
Afb. 2: De windmolen start bij verschillende windsnelheden bij diverse overbrengverhoudingen, hier 1:20.



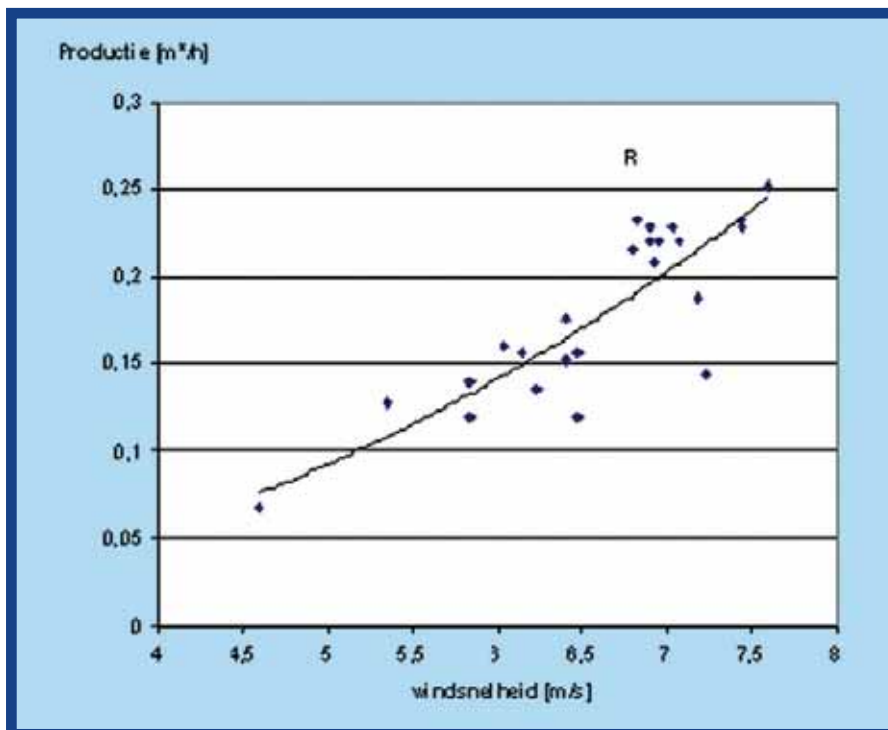
Afb. 3: De (water) recovery (=permeaatproductie/feedflow) is bij een toerental boven 1200 rpm constant op ongeveer 19 procent.

Afb. 4: Concentratiepolarisatie is vrijwel onafhankelijk van de windsnelheid.





Afb. 5: Druk en permeaatproductie van de omgekeerde osmose variëren met de windsnelheid.



Afb. 6: Permeaatproductie bij de heersende windsnelheden ten tijde van de experimenten. De permeaatproductie is ongeveer vijf m³ per dag bij een gemiddelde windsnelheid van zeven m/s.

4,5 tot acht m/s varieert de voedingsdruk tussen 30 bar en 50 bar. De osmotische druk van zeewater is 30 bar. Bij een windsnelheid van 4,5 m/s nadert de voedingsdruk deze osmotische druk en is de permeaatproductie nihil. De permeaatproductie is 0,2 m³ per uur bij windsnelheid van zeven m/s (zie afbeelding 6). De gemiddelde windsnelheid op Curaçao is ongeveer zeven m/s zodat de permeaatproductie vijf m³ per dag zal zijn. Deze gemeten productie is de ontwerp doelstelling van dit prototype. Het specifieke energieverbruik was 5,2 kWh/m³, weliswaar meer dan de tabel 1 vermelde drie kWh/m³ maar voor een kleinschalig systeem erg efficiënt.

Het geproduceerde water bevat te weinig mineralen om als drinkwater te gebruiken. Het water dient daarom geconditioneerd te

worden door middel van een marmerfiltratie. Op een eiland kan ook gedacht worden aan schelpen of koraal als filtermateriaal. Om periodes van lage windsnelheden en/of windstilten op te vangen is een permeaatbuffer noodzakelijk. Afhankelijk van het aantal dagen dat er geen of te weinig wind is dient de buffer bijvoorbeeld 20 m³ te zijn. Vier dagen windstilte komt op Curaçao zelden voor zodat dit ruim voldoende zou moeten zijn. Eventueel kan bij uitzonderlijke windarme perioden de buffer worden gevuld met een tankauto.

In een volgende fase zal de afstemming tussen windmolen en hogedrukpompen nog verder geoptimaliseerd worden. Bovendien dient een volgend prototype volledig stand-alone te worden uitgevoerd, zodat toezicht tijdens productie niet meer nodig is.

Conclusie

Een prototype van een windgedreven omgekeerde osmose installatie is opgebouwd en getest in Curaçao. Nieuw is de directe aandrijving van de hogedrukpomp met windenergie en de variabele permeaatproductie in de RO. Dit prototype produceert circa 5.000 liter zoetwater uit zeewater bij een gemiddelde windsnelheid van zeven m/s. Verdere optimalisatie is zeker mogelijk zodat de productie hoger kan zijn bij dezelfde investeringskosten.

LITERATUUR

- 1) Garcia-Rodriguez, L., Renewable energy applications in desalination: state of the art. Solar Energy, 2003: p. 381-393.
- 2) Romero-Ternero, V., García-Rodríguez, L., Gómez-Camacho, C., Thermoeconomic analysis of wind powered seawater reverse osmosis desalination in the Canary Islands. Desalination, 2005(186): p. 291-298.
- 3) Witte, T., Siegfriedsena, S., El-Allawy, M., WindDeSalter Technology, direct use of wind energy for seawater desalination by vapor compression or reverse osmosis. Desalination, 2003(156): p. 275-279.

Exemplaren van het afstudeerwerk van Evgenia Robinovitch zijn opvraagbaar bij Mieke Hubert (015) 278 33 47 of m.a.j.hubert@tudelft.nl.