



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO
TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

MIIKA OIKARAINEN
JUOMAVEDENTUOTANTO MERIVEDESTÄ KÄÄNTEISOSMOO-
SILLA LÄNSI-AFRIKASSA NYT JA TULEVAISUUDESSA

Kandidaatintyö

Tarkastaja: Yliopisto-opettaja Marja Palmroth

TIIVISTELMÄ

MIIKA OIKARAINEN: Juomavedentuotanto merivedestä käänteisosmoosilla Länsi-Afrikassa nyt ja tulevaisuudessa

Production of drinking water from sea water using reverse osmosis in the Western Africa today and in the future

Tampereen teknillinen yliopisto

Kandidaatintyö, 27 sivua

Syyskuu 2017

Tekniikan kandidaatin tutkinto-ohjelma

Pääaine: Bio- ja ympäristötekniikka

Tarkastaja: Yliopisto-opettaja Marja Palmroth

Avainsanat: käänteisosmoosi, Länsi-Afrikka, juomavedentuotanto

Länsi-Afrikan mannervaltioissa 28 % väestöstä elää puhtaan juomaveden puutteessa. Saastunut tai liian vähäinen juomavesi aiheuttaa merkittäviä sairauksia, sekä helpottaa tautien leviämistä. Väestönkasvun, elintason nousun, sekä ilmastonmuutoksesta johtuva säään ääri-ilmiöiden lisääntyminen lisäävät puhtaan juomaveden tarvetta entisestään.

Tässä työssä selvitettiin, kuinka merkittävänä osana Länsi-Afrikan valtioiden vedentuotantokapasiteettia voisi toimia juomavedentuotanto käänteisosmoosilla merivedestä. Käänteisosmoosissa suolaista merivettä puristetaan esikäsittelyn jälkeen erittäin pienirakoista suodatin vastaan, niin että vain vesimolekyylit tai sitä pienemmät hiukkaset mahduttavat siitä läpi. Tällöin suodattimen läpipuristetusta vedestä eli permeaatista tulee lähes suolatonta.

Kyseisen teknologian soveltuvuutta alueen rannikkokaupungeille arvioitiin tutkimalla olemassa olevaa kysyntää ja tarjontaa, sekä niiden kehitystä noin vuoteen 2030 mennessä. Lisäksi arvioitiin kaupunkien käytettävissä olevia makean veden varantoja, ja niissä mahdollisesti tapahtuvia muutoksia. Vielä huomioitiin sähköstä riippuvaisen teknologian toimintavarmuutta karkeasti kyseisten valtioiden sähköntuotantokapasiteetin avulla.

Tulokseksi saatiin, että ainakin viiteen eri kaupunkiin saattaisi olla kannattavaa rakentaa käänteisosmoosilla toimivaa desalinaatiokapasiteettia puhtaan juomaveden tarjonnan turvaamiseksi. Yhteensä uutta käänteisosmoosikapasiteettia voitaisiin rakentaa 970 000–1 520 000 m³/d, josta 620 000–670 000 m³/d Lagosiin, 100 000–300 000 m³/d Accraan ja Dakariin, 150 000–200 000 m³/d Abidjaniin ja 50 000 m³/d Nouakchottiin.

Lisäksi työssä pohdittiin minkälaisia kulttuuriin, kieleen ja koulutustasoon liittyviä seikkoja tulee ottaa huomioon pyrittäessä kehittämään toimivaa ja turvallista vesihuoltoa Länsi-Afrikassa. Todettiin, että informaation leviämistä tulee edistää kieli- ja koulutusmuurien ylitse, sekä että puhtaan juomaveden arvostaminen lisää omaa motivaatiota kehittää vesihuoltoaan mahdollisuuksien mukaan.

ALKUSANAT

Tämä kandidaatintyö on tehty Tampereen teknillisen yliopiston Bio- ja ympäristötekniikan laitokselle.

Kiitän kandidaatin työn alulle saattanutta ohjaajaa Riitta Kettusta, sekä työn loppuun avustanutta ohjaajaa ja tarkastajaa Marja Palmrothia.

23.9.2017

Miika Oikarainen

SISÄLLYSLUETTELO

1.	JOHDANTO	1
2.	DESALINAATIO	2
	2.1 Käänteisosmoosi.....	2
	2.2 Teollinen mittakaava.....	6
3.	LÄNSI-AFRIKAN VESIVARANNOT	8
	3.1 Arvio juomavedentuotannosta.....	10
	3.2 Käänteisosmoosin hyödyntämiskapasiteetti.....	13
4.	KULTTUURI JA KIELI	16
	4.1 Operaattorit	16
	4.2 Käyttäjät.....	17
5.	POHDINTAA	18
6.	YHTEENVETO.....	22
	LÄHTEET.....	24

LYHENTEET JA MERKINNÄT

ΔC	konsentraatioero
C_p	suolapitoisuus permeaatissa
C_s	suolapitoisuus raakavedessä
e	paksuus (épaisseur, ranskasta)
IPCC	Hallitustenvälinen ilmastonmuutospaneeli (Intergovernmental Panel on Climate Change)
K_p	kokeellinen vakio veden permeabiliteetille puoliläpäisevälle kalvolle
K_t	lämpötilakerroin
K_s	kokeellinen vakio suolan permeabiliteetille puoliläpäisevälle kalvolle
LWC	Lagos Water Corporation
ΔP	paine-ero
π	osmoottinen paine
$\Delta\pi$	osmoottisen paineen ero
Q_e	syötetyn veden virtaama
Q_p	tuotetun veden virtaama
R	molaarinen kaasuvakio
S	pinta-ala (séction, ranskasta)
SONEB	
T	absoluuttinen lämpötila
UN/YK	United Nations/Yhdistyneet Kansakunnat
UNEP	Yhdistyneiden kansakuntien ympäristöohjelma (United Nations Environment Programme)
UNICEF	Yhdistyneiden kansakuntien lastenrahasto (United Nations Children's Fund)
WHO	Maailman terveysjärjestö (World Health Organisation)

1. JOHDANTO

Yhdistyneiden Kansakuntien 7. vuosituhattavoitteen yksi osatavoite kuuluu: ”Puhtaan juomaveden puutteesta kärsivien osuus maailman väestöstä on puolittunut. Ilman turvallista sanitaatiota elävien osuus maailman väestöstä puolittunut.” Globaalisti tavoitteeseen puhtaasta juomavedestä on päästy (UNICEF 2014), mutta Länsi-Afrikassa kaikkien valtioiden osalta ei ole päästy (UNEP 2010). Väestönkasvu ja elintason nousu lisäävät kilpailua puhtaasta vedestä. Jos alueella ei pystytä järjestämään toimivaa vesihuoltoa, vesivälitteiset infektiot voivat levitä nopeasti. Lisäksi ihmiset voivat lähteä liikkeelle kotialueiltaan, jolloin siirtolais- ja vesipakolaispaine Eurooppaan tulee kasvamaan merkittävästi. Länsi-Afrikan valtiot ovat Saharan aluetta, sekä Saharan eteläpuolista Afrikkaa ja Sahelin aluetta. Valtiit järjestyksessä lännestä itään rannikkoa pitkin ovat: Mauritania, Senegal, Gambia, Guinea-Bissau, Guinea, Sierra Leone, Liberia, Norsuluunrannikko, Ghana, Togo, Benin ja Nigeria. Sisämaavaltioita ovat lisäksi Mali, Burkina Faso ja Niger. (UNEP 2010, s. 193) todetaan, että vuonna 2008 vain Senegalissa, Gambiassa, Norsunluunrannikolla, Burkina Fasossa ja Nigerissä kaupunkialueilla yli 90 % väestöstä on pääsy puhtaaseen juomaveteen. Mauritaniassa ja Nigeriassa on huonoin tilanne, ja yhteys on vain 51–75 % kaupunkilaisista. Muut valtiot sijoittuvat tälle välille. Haja-asutusalueilla tilanne on selvästi huonompi.

Merenrantavaltioissa yhtenä puhtaan juomaveden lähteenä voidaan käyttää merivedestä puhdistettua vettä, josta on poistettu liiallinen suolapitoisuus. Tämän kandidaatintyön tavoitteena on arvioida, minkälaista kapasiteettia Länsi-Afrikassa on tuottaa merivedestä käänteisosmoosilla puhdasta juomavettä. Käänteisosmoosissa vesi pumpataan ulkoisella paineella erittäin tiheän suodattimen läpi, niin että lähes pelkästään vesimolekyylit tai sietä pienemmät partikkelit mahtuvat suodattimen läpi. Aluksi käydään läpi käänteisosmoosin periaatteita sekä toimintaa teollisessa mittakaavassa. Tämän jälkeen tarkastellaan Länsi-Afrikan vesivarantojen tilannetta sekä käytössä olevaa juomavedentuotantokapasiteettia. Työssä myös pohditaan, minkälaisia käytännön haasteita vesihuollon toteutukselle aiheutuu Länsi-Afrikassa muun muassa työntekijöiden matalan koulutustason (lukutaidottomuus) ja kielimuurien vuoksi. Näiden pohjalta pyritään arvioimaan, missä ja kuinka suuressa mittakaavassa käänteisosmoosia voitaisiin hyödyntää osana juomavedentuotantoa.

Työ on toteutettu kirjallisuusanalyysinä käyttäen suomen-, englannin- ja ranskankielisiä kirjoja, tutkimusartikkeleita, verkkosivuja, uutisia sekä tilastoja.

2. DESALINAATIO

Meriveden noin 4 % suolaisuus johtuu enimmäkseen natriumkloridista. Tässä työssä puhuttaessa suolasta tai suolaisuudesta tarkoitetaan meriveden tyypillistä koostumusta, jossa natriumkloridi on selvästi tärkein yksittäinen suola. Maailman terveysjärjestö WHO (2011) ei aseta terveysterveystaseroista rajoitusta natriumille, mutta yli 200 ppm:n natrium- tai natriumkloridipitoisuuksien todetaan voivan aiheuttaa makuhaittoja. Kloridille WHO on asettanut 5 mg/l enimmäisrajan, joka voi juomavedessä ylittyä desinfiointin vuoksi. Muuhun kotitalouskäyttöön sopii vesi, jonka suolapitoisuus on alle 1000 ppm. Näiden kahden ryhmän välillä voi olla satakertainen ero kulutuksessa (El-Dessouky 2002, s. 3–4). Peltojen kasteluedet ja teollisuuden jäähdytysvedet voivat taas olla selvästi suolaisempia, kuitenkin niin että ne luokitellaan edelleen suolattomaksi tai murtovedeksi. Tilanteissa, joissa joudutaan tuottamaan käyttövettä merivedestä, jonka suolapitoisuus on luokkaa 30 000 ppm, ei ole tarkoituksenmukaista kuluttaa energiaa suolan poistamiseen enempää kuin mikä on relevanttia kutakin käyttötarkoitusta varten. Teollisuudessa jäähdytykseen ja peltojen kasteluun voidaan käyttää 1000–3000 ppm suolapitoisuudella olevaa vettä (El-Dessouky 2002, s. 3–4).

Erilaisia desalinaatiotekniikoita ovat muun muassa haihdutus-tiivistysmenetelmä sekä käänteisosmoosi (Elimelech & Phillip 2011). Haihdutus-tiivistysmenetelmää on käytetty kymmeniä vuosia Persianlahden alueella. Siinä suolaista vettä haihdutetaan kuumentamalla, ja tiivistetään höyry erilleen, niin että tiivistyvä vesi on suolatonta. Menetelmä vaatii runsaasti sähkö- ja lämpöenergiaa. Muualla erityisesti 1990-luvulta lähtien on rakennettu energiatehokkaampia käänteisosmoosiin perustuvia laitoksia. Valtaosa suunnitelluista olemista laitoksista (vuonna 2011) perustuu käänteisosmoosiin. Desalinaatiolla puhtaasta juomavettä voidaan tuottaa uusiutuvien juomavesivarantojen hydrologisen kierron ulkopuolelta. (Elimelech & Phillip 2011) Tämän vuoksi juomaveden tuotanto merivedestä on kannatettava vaihtoehto alueilla, joilla luonnolliset vesivarannot ovat niukat tai ylikuormitetut. Lisäksi merivettä on saatavilla ylimäärin. Useimmissa tapauksissa käänteisosmoosi on todettu taloudellisesti tehokkaimmaksi vaihtoehdoksi desalinaatiomenetelmistä (Kim et al. 2009).

2.1 Käänteisosmoosi

Osmoosissa vesi siirtyy puoliläpäisevän kalvon läpi pienemmän ionipitoisuuden puolelta suuremman puolelle pyrkien tasaamaan potentiaaliero kalvon eri puolilla. Potentiaaliin vaikuttavat myös ulkoinen paine sekä painovoima. Käänteisosmoosissa puristetaan vesi suolaisemmasta tilasta kalvon läpi suolattomampaan. El-Dessoukyn (2002 s. 412) mukaan ulkoisen paineen kasvattaminen suolaisemmalla puolella kasvattaa veden kemial-

lista potentiaalia, jolloin puhdasta vettä siirtyy kalvon läpi, koska toisella puolella on matalampi kemiallinen potentiaali. Yleisnimenä edellä mainituille ilmiöille käytetään osmoottista painetta π , jonka yksikkö on Pascal (Pa). Se lasketaan ionin konsentraatioeron ΔC , molaarisen kaasuvakion R ja absoluuttisen lämpötilan T avulla (Memento 2003).

$$\pi = \Delta C * R * T \quad (1)$$

$$[\pi] = \text{mol}/\text{m}^3 * J/(\text{mol} * K) * K = Pa \quad (2)$$

Osmoosissa ja käänteisosmoosissa käytetään puoliläpäisevää kalvoa, joka sallii tietynkoisten partikkelien läpäistä kalvoa. Käänteisosmoosissa käytetään erittäin pienireikäistä kalvoa, joka mitoitetaan vesimolekyylin mukaan siten, että aukkokoko on noin kaksi kertaa vesimolekyylin halkaisija. Tällöin muut liuenneet atomit ja molekyylit jäävät enimmäkseen retentaattiin, eli kalvoa läpäisemättömään vesimassaan, jonka suolapitoisuus on korkeampi kuin syöttöveden. (Sincero & Sincero 2003; Karttunen 2004) Sinceron ja Sinceron (2003) mukaan mikro-, nano- ja ultrafiltraatio toimivat vastaavalla käänteisosmoosin periaatteella, mutta jollei erikseen tarkenneta, käänteisosmoosi tarkoittaa suodatusta 0,0001–0,001 μm :n partikkelikoossa. Tässä työssä käänteisosmoosi viittaa aina viimeksi mainittuun.

Edellä mainittu suodatus ei ole täydellinen, vaan suolakonsentraation kasvaessa kalvon pinnalle syntyvässä rajakerroksessa myös osa liuenneista ioneista läpäisee kalvon (Karttunen 2004; Sincero & Sincero 2003). Suolan puhdistustehokkuus lasketaan yhtälöstä

$$\text{Suolan puhdistustehokkuus} = \frac{1 - C_p}{C_s} * 100\% \quad (3)$$

jossa C_p on suolan pitoisuus käsitellyssä vedessä eli permeaatissa ja C_s suolan pitoisuus raakavedessä (merivedessä) (El-Dessouky 2002; Karttunen 2004). Suolan puhdistustehokkuus on tärkeä parametri, sillä se määrittää kuinka mataliin suolapitoisuuksiin permeaatissa päästään. Tällä hetkellä käytössä olevilla kalvoilla merivedestä saadaan poistettua 99,6–99,8 % suolapitoisuudesta. Empiiristen havaintojen mukaan erotuskyvyn parantaminen vaatii uusien kalvorakenteiden kehittämistä. (Elimelech & Phillip 2011) Toinen merkittävä parametri on puhdistustehokkuus, eli permeaatin osuus prosessiin tulevasta virtaamasta prosentteina. Se lasketaan yhtälöstä

$$\text{Puhdistustehokkuus} = \frac{Q_p}{Q_e} * 100\% \quad (4)$$

jossa Q_p on tuotetun veden virtaama ja Q_e syötetyn veden virtaama (El-Dessouky 2002; Karttunen 2004). Viime vuosina on kehitetty käytössä olevia suodatinkalvoja, niin että

on päästy jopa 50 % puhdistustehokkuuteen (Elimelech & Phillip 2011). Puhdistustehokkuus eli saanto on hyvin tärkeä toiminnan taloudellisuuden kannalta, sillä kustannuksia syntyy jo ennen käänteisosmoosia muun muassa esikäsittelystä ja nämä kustannukset ovat riippumattomia puhdistustehokkuudesta. Koska esikäsittelykustannukset syntyvät sekä permeaatin ja retentaatin osalta, kustannustehokkuus paranee saannon parantuessa.

Veden ja siihen liuenneiden suolojen läpäisy ovat riippuvaisia hieman eri tekijöistä. Tämän vuoksi pyrittäessä maksimoimaan veden läpäisyä ja minimoimaan suolojen läpäisyä voidaan hyödyntää parametreja jotka vaikuttavat vain toiseen. Veden ja suolan virtauksille saadaan johdettua Fickin ja Henryn laeista seuraavat funktiot

$$\text{vedelle: } Q_p = K_p * \frac{S}{e} * (\Delta P - \Delta \pi) * K_t \quad (5)$$

ja

$$\text{suolalle: } Q_s = K_s * \frac{S}{e} * \Delta C * K_t \quad (6)$$

joissa Q_p on tuotetun veden virtaama, K_p kokeellinen vakio veden permeabiliteetille kyseisellä kalvolla, S kalvon pinta-ala, e kalvon paksuus ΔP paine-ero kalvon eri puolilla, $\Delta \pi$ osmoottisen paineen ero kalvon molemmin puolin ja K_t lämpötilakerroin. Q_s on suolan virtaama kalvon läpi, K_s kokeellinen vakio suolan permeabiliteetille kyseisellä kalvolla ja ΔC konsentraatioero kalvon eri puolilla. (Karttunen 2004; Memento 2003) Kaavoista (5) ja (6) huomataan, että ulkoisen paineen kasvaessa veden virtaama kasvaa, kun taas suolan virtaama ei juuri muutu (Memento 2003). Suurempi paine parantaa käsitellyn veden laatua, mutta toisaalta se kuormittaa rakenteita enemmän ja nostaa käyttö- ja materiaalikustannuksia. Selektiivisyys, eli erisuuruinen permeabiliteetti eri aineille kuten vedelle ja natriumkloridille, on hyvin tärkeä tutkimus- ja kehittämisaikala alue tehokkaampia ja kestävämpiä suodatinkalvoja tavoiteltaessa. Lämpötilakerroin huomioi veden viskositeetin vaikutuksen, niin että lämpötilan noustessa asteen virtaama kasvaa noin 2,5–3 % viskositeetin pienentyessä (Memento 2003). Paineen, lämpötilan, ja muiden muuttujien vaikutuksia permeabiliteettiin esitetään taulukossa 1.

Taulukko 1. Eri muuttujien vaikutus veden ja suolan läpäisyyn kalvon läpi. Q_p on permeaatin virtaama ja Q_s kalvon läpäisevän suolan virtaama. Nuolet osoittavat korrelaatiota, samansuuntaisilla nuolilla on positiivinen, ja erisuuntaisilla negatiivinen korrelaatio. (Memento 2003)

Muuttuja	Q_p	Q_s
Paine ↑	↑	↓
Lämpötila ↑	↑	=
Suolapitoisuus ↑	↓	↑
Polarisaatio ↑	↓	↑

Suodatuksen aikana kalvojen tulevan veden puoleiseen pintaan kertyy suodattuneita ioneja ja kiintoainesta. Tällöin kalvon pinnan osmoottinen paine sekä painehäviöt kasvavat, jolloin kaavan (5) mukaan termi $\Delta P - \Delta\pi$ pienenee ja siten Q_p pienenee. Samalla suo-laionien kertyessä suodattimen pintaan konsentraatioero pinnassa olevan kuonakerroksen ja tulevan veden suhteen, eli polarisaatio, kasvaa. Kasvat painehäviöt vähentävät permeaatin määrää, ja kasvava polarisaatio lisää permeaatin suolapitoisuutta. Ajan kuluessa suodatus voi jopa pysähtyä kokonaan. Rajakerrosta voidaan ohentaa ja suolojen läpäisyä vähentää pitämällä puhdistettava vesi liikkeessä kalvon läheisyydessä, niin että rajakerroksen polarisaatio heikkenee (Memento 2003). Kalvojen pintaan kertyvää kuonaa tulee siis pestä säännöllisesti optimaalisen toiminnan turvaamiseksi. Pesussa osasta suodattimia vähennetään painetta, jolloin permeaattia ei synny. Raakaveden sijaan suodattimille ohjataan pesuvesiliuos, jonka annetaan vaikuttaa 1–15 tuntia, minkä jälkeen järjestelmä huuhdellaan. Vaihtoehtona tai lisänä käytetään joskus myös suoraa osmoosia. Tällöin raakavetenä käytetään voimakasta suolaliuosta, jonka synnyttämä osmoottinen paine saa veden virtaamaan käänteisosmoosisuodattimien läpi tulosuuntaan, ja samalla pintaan kiinnittyneet kiintoaineet irtoavat. (Fritzmann et al. 2006) Mitä suurempi puhdistustehokkuus on, sitä konsentroituneempaa retentaatti on ja sitä nopeammin kuonaa kertyy kalvon pinnalle. Puhdistustehokkuus vaikuttaa myös siihen, millaista retentaatti on.

Ensimmäinen kaupallisen asteen saavuttanut suodatinkalvo käänteisosmoosia varten oli selluloosa-asetaattikalvo, jonka käyttö aloitettiin 1960-luvulla (Sincero & Sincero 2003; Elimelech & Phillip 2011). 1980-luvulla kehitetyt ensimmäiset ohutfilmikomposiittikalvot toimivat laajemmalla pH-alueella kuin aikaisemmin käytössä olleet. Niillä oli myös aikaisempia kalvoja parempi veden permeabiliteetti. Tällä hetkellä suurin osa käytössä olevista kalvoista on juuri ohutfilmikomposiittikalvoja. Haasteena on tehdä ohuista kappilariputkiyksiköistä koostuvia suodatuselementtejä, joilla saataisiin suuri suodatustehokkuus tietyssä tilavuudessa. Virtausvastuksen pienentämisellä olisi vain rajallinen hyöty, sillä energiankulutus voidaan jo nyt saada 10–20 % päähän teoreettisesta minimistä. Ongelmana ohutfilmikomposiittikalvoilla on kuonan kerrostuminen kalvojen pintaan ja kuonan aiheuttama kalvojen kuluminen. Suuremmat hyödyt saataisiin kehittämällä suodatinmateriaaleja, jotka kestäisivät paremmin kuonakerroksen vaikutuksia. (Elimelech ja Phillip 2011) Kestävämät kalvot pienentäisivät esikäsittelytarvetta, jolloin energia- ja kustannustehokkuus paranevat. Hiilinanoputkista muodostuvia kalvoja on pyritty kehittämään uusiksi suodatinmateriaaleiksi. Niillä on saatu kymmenkertaisia veden permeabiliteetteja ohutfilmikomposiittikalvoihin verrattuna. Teknologiaa ei kuitenkaan ole saatu toimimaan kuin erittäin hyvin pienessä mittakaavassa. Viime aikoina on saatu käytännön kokemuksia nanokomposiittisuodattimista. Suodattimen pinnalle lisätty tietynlainen zeoliitti parantaa veden permeabiliteettia säilyttäen kuitenkin hyvän suolan puhdistustehokkuuden. Nanokomposiittisuodattimia on jo kaupallisessa käytössä. (Subramani & Jacangelo 2015)

Kalvosuodattimia voidaan rakentaa eri tavoilla. Tyypillisiä käytössä olevia kokoonpanoja ovat spiraalikalvopuhdistimet ja onttokuituputkipuhdistimet. Spiraalikalvopuhdistimessa kiedotaan rullalle suodatinkerroksia. Yhdessä suodatinkerroksessa on huokoinen tulevan veden kerros, puoliläpäisevä suodatinkalvo ja huokoinen permeaattikerros, sekä vettä läpäisemätön kerros, joka erottaa suodatinkerrokset toisistaan. Permeaatti ja retentaatti kerätään omiin kokoojaputkiin. Onttokuituputkisuodattimissa on tuhansista miljooniin todella ohuita niputettuina yhteen. Yksittäisen kuituputken halkaisija vaihtelee kymmenien mikroneista jopa muutamaa millimetriin. Tuleva vesi voidaan joko ohjata kuidun sisälle, jolloin kalvon läpäisevä permeaatti kerätään kuitujen ulkopuolelta. Vesi voidaan myös ohjata kuitujen ulkopuolelta, jolloin permeaatti läpäisee kalvon kuituputken sisäpuolelle. (Memento 2003; Karttunen 2004) Rakenteellisesti spiraalikalvoja ja onttokuitupuhdistimia yksinkertaisempaan kokoonpanona voidaan käyttää myös 10–40 mm ontoista putkista koottuja nippuja. Tällöin putkessa virtaava vesi suodattuu putken pinnan läpi, ja retentaatti poistuu putken päästä. Kokoonpano ei juuri tarvitse esikäsittelyä ja sen pinnat ovat suhteellisen helppoja puhdistaa. Heikkoutena taas on suuri tilantarve, joka johtuu pienestä suodatinpinta-alasta tilavuusyksikköä kohti. Spiraalikalvosuodattimet ja ontot kuituputkisuodattimet taas vievä tilaa huomattavasti vähemmän suuresta suodatinpinta-alasta johtuen. Ne kuitenkin vaativat yleensä huomattavasti enemmän esikäsittelyä liian nopean tukkeutumisen estämiseksi. (Memento 2003)

Suodatuksessa syntyvä retentaatti on suolaisempaa kuin ympäröivä vesistö. Lisäksi siinä voi olla erilaisia esikäsittelyssä lisättyjä kemikaaleja. Retentaatit voivat olla haitallisia jopa mereen päästettäessä, jos veden vaihtuvuus rannassa on vähäistä tai ympäröivä ekosysteemi on muuten herkkä. (Elimelech & Phillip 2011) Retentaattien laadusta riippuen niitä voidaan joutua käsittelemään ennen palauttamista vesistöön. Pistekuormituksen vähentämiseksi ja suolapitoisuuden alentamiseksi retentaatit voidaan johtaa esimerkiksi teollisuuslaitoksen tai jätevedenpuhdistamon poistoputkeen. Ne voidaan myös johtaa useaan eri kohtaan vesistössä, ja voidaan käyttää erilaisia sekoittimia poistokohdan läheisyydessä olevan veden sekoittamiseksi. (Elimelech & Phillip 2011)

2.2 Teollinen mittakaava

Käänteisosmoosi on hyvin suodattimet ovat hyvin tiheitä ja suodattimen aukot erittäin pieniä (0,0001–0,001 μm), joten se vaatii esikäsittelyä, jossa vedestä pyritään poistamaan mahdollisimman paljon epäpuhtauksia suodatinkalvon toiminnan tehostamiseksi. Muuten suodatin tukkeutuisi lähes välittömästi. Haitallisia epäpuhtauksia ovat erilaiset liuenneet ja liukenemattomat pienhiukkaset. Lisäksi vedessä voi olla mikro-organismeja ja levää. Ennen esikäsittelyä on syöttövesipumppu, jolla ohjataan veden määrää kierrossa. Esikäsittely sisältää välppäyksen ja esiselkeytyksen, pintavesi yleensä myös desinfektoidaan. Yleensä lopuksi vesi esisuodatetaan 5–15 μm suodattimilla ennen korkeapainepumppua. (El-Dessouky 2002) Korkeapainepumpusta vesi syötetään kalvomoduliin, josta permeaatti ohjataan pumpun kautta jakeluun. Korkeapainepumpulla paine nostetaan

noin 10–20 % osmoottista painetta korkeammalle. Retentaatti voidaan palauttaa käsittelyn jälkeen mereen (Sincero & Sincero 2003). Vesistön ominaisuudet tulee ottaa huomioon, sillä hitaasti vaihtuva vesi ja erityisesti mangrovemetsät tai koralliriutat ovat alttiita erilaisille retentaateille. Pistemäistä kuormitusta voidaan vähentää parantamalla veden sekoittumista, tai jakamalla se laajemmalle alueelle. Vesistöt, joissa on voimakas hydrologinen kierto, kuten jyrkät ja aallokkoiset rannikot, sekoittavat retentaatin suureen vesimassaan selvästi nopeammin, jolloin paikallisen vaikutukset jäävät pienemmiksi. (Elimelech & Phillip 2011)

Esisuodatuksena käytettävä MF/UF-suodattimet vaativat huoltoa ja kemiallista puhdistusta, kuten käänteisosmoosisuodatinkin. Käyttämällä käänteisosmoosin retentaattia UF-suodattimien vastavirtahuuhteluun tarvitaan siihen vähemmän pesuainekemikaaleja. Menetelmän havaittiin lyhyen aikavälin tutkimuksissa kasvattavan suodattimen käyttöikää lisäämättä merkittävästi suolojen määrää permeaatissa. (Gu et al. 2016)

Permeaatin jälkikäsittelyssä vedestä tehdään talousvesikelpoista ja verkostoon sopivaa. Permeaatti sisältää suodattimen läpäisevää hiilidioksidia, joka tekee vesistä aggressiivisiä, siksi veden pH nostetaan noin tasolle 7–8. Jälkikäsittelyssä poistetaan lisäksi booria, mutta boori voidaan saada poistettua riittävän tehokkaasti myös itse käänteisosmoosisa (SONES 2015; Kim et al. 2009) Alkaliniteettia voidaan nostaa liuottamalla veteen kalkkia. Kalkkiliuotuksen yhteydessä veteen saatetaan lisätä myös hiilidioksidia pH:n stabiiloimiseksi. Lopuksi veteen lisätään vielä klooria verkoston desinfioinniksi. (SONES 2015)

Käänteisosmoosilla juomaveden tuottaminen merivedestä vaatii runsaasti energiaa, joten prosessissa on otettava energiantarve huomioon. Wang et al. (2013) ehdottavat käytettäväksi aurinkoenergiaa tai jätevedenpuhdistamon lietteiden mädättämisestä saatavaa biokaasua. Koska esi- ja jälkikäsittely muodostavat suuren osan energiankulutuksesta, ja itse käänteisosmoosi saadaan toimimaan suhteellisen lähellä maksimaalista hyötysuhdetta, tulisi kehittää etu- ja jälkikäsittelyn energiatehokkuutta. Esikäsittelyn poistamisella tai yksinkertaistamisella voidaan pienentää desalinaatiolaitoksen rakentamis- ja ylläpitokustannuksia. Tämä kuitenkin vaatisi kalvoja, jotka toimisivat hyvin myös vähemmällä esikäsittelyllä, tai jopa ilman sitä (Elimelech & Phillip 2011).

Desalinaatiolaitoksen rakentamis- ja käyttökustannuksia voidaan pienentää myös rakentamalla laitos lauhdevoimalaitoksen läheisyyteen. Suodatettavana vetenä voidaan käyttää voimalaitoksesta poistuvaa lauhdevettä, jolloin esikäsittelyssä ei tarvita välppiä eikä erilisiä vedenottoputkistoja. (Vouckhov 2008) Lämmenneellä vedellä on myös suurempi permeabiliteetti, jolloin pumppujen energiankulutus laskee. Suodatuksen jälkeen retentaatti voidaan johtaa takaisin lauhdeveden poistoputkeen, jossa retentaatti laimenee ennen laskemista takaisin vesistöön (Elimelech & Phillip 2011).

3. LÄNSI-AFRIKAN VESIVARANNOT

Länsi-Afrikan valtiot sijaitsevat osittain Saharan autiomaan alueella, kuitenkin enimmäkseen Sahelin alueella Saharan eteläpuolella. Yhdistyneiden kansakuntien ympäristöohjelman UNEP:n (2010, s. 41) raportissa ”Africa Water Atlas” alueen väkiluvuksi 2010 ilmoitetaan 298,6 miljoonaa asukasta, minkä ennustetaan nousevan 625,6 miljoonaan asukkaaseen vuonna 2050. Keskimääräiseksi väestönkasvuksi raportissa arvioidaan 2,5 % ja arvioidaan että vuonna 2050 Länsi-Afrikka on edelleen Afrikan väkirikkein alue. Länsi-Afrikka on hyvin köyhää aluetta ja suuri osa alueen ihmisistä elää alle dollarilla päivässä. (UNEP 2010, s. 30) Matala elintaso vaikeuttaa vesihuoltojärjestelmän kehittämistä. Länsi-Afrikan 350 miljoonasta asukkaasta noin 100 miljoonaa elää ilman yhteyttä turvalliseen juomaveteen (FAO 2016).

Alueen makean veden varannoista saadaan käyttöön keskimäärin vain 2 %. Mauritania poikkeaa muista valtioista selvästi. Siellä hyödynnetään yli 17 % makean veden varannoista. (Taulukko 2) Sadannasta suuri osa menetetään tulvien mukana eikä sitä voida hyödyntää. Lisäksi kehittymätön puhdistus- ja jakeluverkosto pitää käytön pienenä. Osa vesistöistä on myös pilaantunut teollisuuden ja yhdyskuntien jätteiden vuoksi. Sahelin alueella sateet ajoittuvat enimmäkseen sadekauteen, jolloin vuoden aikana tapahtuu suurta vaihtelua veden saatavuudessa (UNEP 2010, s. 26). Esimerkiksi Liberiassa, jossa olisi uusiutuvia vesivaroja yli 60 000 m³ henkeä kohti, niitä käytetään vain 36m³ henkeä kohti vuodessa. Ongelmana Liberiassa on veden saatavuudessa. Suuri osa vuosittaisesta vesimäärästä tulee rankkasateina ja tulvina, jolloin sitä ei pystytä hyödyntämään, vaan se pikemminkin aiheuttaa ongelmia sekoittamalla puhtaita vesiä ja jätevesiä sekä auttaa vesivälitteisten taudinaiheuttajien leviämisessä. Gambian valtio taas on joenrantavaltio, koko valtion halki virtaa Gambiajoki. Kuitenkaan vedestä ei saada hyödynnettyä kuin todella pieni osa, minkä vuoksi Gambiassa on toiseksi alhaisin vuosittainen vedenkäyttö henkeä kohti (22 m³)

Sisämaavaltioissa Mali, Burkina Faso ja Niger, joissa uusiutuvat vesivarat henkeä kohti ovat pienemmät kuin rannikkovaltioissa, saatavilla oleva vesimäärä hyödynnetään tehokkaammin ja vesivaroja käytetään henkeä kohti enemmän kuin monessa rannikkovaltiossa. Lähes 10 % uusiutuvista vesivaroista hyödynnetään. (Taulukko 2) Sisämaassa menetetään hukkana vähemmän tulvien vuoksi kuin rannikoilla. Lisäksi kuivat kuivemmat olosuhteet ovat pakottaneet kehittämään tehokasta veden talteenottoa. Erityisesti Malille ja Burkina Fasolle on Nigerjoki erittäin tärkeä. Joen valuma-alue kattaa suuren osan koko Länsi-Afrikasta, ja se tuo Guineasta ja Malin lounaisosista vettä sisämaahan. Joki jatkuu itään, ja laskee lopulta Nigerian alueella Atlantiin. Joen valuma-alue kattaa lähes koko Nigerian.

Nigerjoen lisäksi Länsi-Afrikassa on muutamia muita merkittäviä jokia. Niistä saa alkunsa Guineasta Nigerin lisäksi myös Senegaljoki, joka haaroineen tuo kasteluveden laajalle alueelle Senegalissa ja Malissa. Joen päähaara kulkee Senegalin ja Malin rajalla. Burkina Fasosta ja Malista alkaa Voltajoki, joka laskee Ghanan läpi Atlanttiiin. Joki on tärkeä myös Togolle, joka kuuluu osittain Volta-joen valuma-alueeseen.

Vesivarannot koostuvat jokia pitkin kulkevien pintavesien lisäksi myös pohjavesistä. Suurimman pohjavesialueen Länsi-Afrikassa muodostaa Niger-joen valuma-alue. Atlantin rannikolla pohjavesialue ulottuu myös naapurimaihin Beniniin ja Tagoon. Atlantin rannikolla on myös kolme muuta suurta pohjavesiallasta. Näistä kaksi on kapealla rannikkovyöhykkeellä, toinen Norsunluunrannikossa ja toinen Guinea–Sierra Leone–Liberia välisellä alueella. Norsunluunrannikon rannalla sijaitsee Abidjanin metropolialue. Alueen pohjavesivarannot ovat ylikuormitettuja niin kotitalouksien, maatalouden kuin kotitalouksien runsaan vedenkäytön vuoksi. (UNEP 2010, s. 119) Kolmas, kahta edellistä selvästi suurempi pohjavesialue on Mauritanian, Senegalin, Gambian ja Guinea-Bissaun alueella ulottuen paikoin yli 500 km sisämaahan. Pohjavesiallas on etenkin Mauritaniassa ylikuormitettu ja suolaantunut. (UNEP 2010, s. 24)

Taulukko 2. Länsi Afrikan valtioiden makean veden varannot ja niiden käyttö (UNEP 2010, koostettu)

Valtio	Väkiluku (miljoonaa) (2009)	Uusiutuvat vesivarat (km ³ /a) (2008)	Vesivarojen käyttö (km ³ /a) (2000-2002)	Uusiutuvat vesivarat henkilöä kohti (m ³ /henk/a) (2008)	Vesivarojen käyttö henkilöä kohti (m ³ /henk/a) (2002)
Benin	8,9	26,4	0,1	3 047	18,3
Burkina Faso	15,8	12,5	0,8	820,5	64,3
Norsunluunrannikko	21	81,1	0,9	3 941	51,5
Gambia	1,7	8	0,03	4 819	22
Ghana	23,9	53,2	0,9	2 278	48
Guinea	10	226	1,5	22 984	173,4
Guinea-Bissau	1,6	31	0,2	19 683	127,8
Liberia	4	232	0,1	61 165	35,9
Mali	13	100	6,5	7 870	594,5
Mauritania	3,3	11,4	1,7	3 546	617,5
Niger	15,3	33,7	2,2	2 288	184,8
Nigeria	154,7	286,2	8,01	1 893	61,1
Senegal	12,5	38,8	2,2	3 177	212,9
Sierra Leone	5,7	160	0,4	28 777	83,7
Togo	6,6	14,7	0,2	2 276	30,4

Ilmastonmuutos on lisännyt Länsi-Afrikan alueella niin kuivia, kuin kosteitakin sään ääri-ilmiöitä. Tulvat, kuivuudet ja meriveden nousu uhkaavat asumista. (SONES 2015) Kuivuuden tai tulvan aikana saatavilla olevat makean veden varannot voivat vähentyä tai saatavuus heikentyä esimerkiksi johtuen kaivon ehtymisestä tai pintavesien pääytymisestä kaivoon. Meriveteen sademäärän muutoksista johtuvat vaihtelut eivät sen sijaan vaikuta kuin paikallisesti, ja merivettä hyödyntävä desalinaatiolaitos kykenee tuottamaan juomavettä kuivanakin aikana, sekä tulvassa, ellei laitoksen toiminta muuten esty.

Ilmastonmuutos voi muuttaa elinolosuhteita monella tavalla Länsi-Afrikan eri alueilla. Jotkin alueet voivat jäädä nousevan meriveden alle, toiset taas kärsiä voimistuvasta kuivuudesta ja aavikoitumisesta ja kolmannen rankkasateista aiheutuvien tulvien kasvusta. Elinolosuhteiden vaikeutuessa tietyllä alueella, suuntautuu alueelta usein muuttoliike muualle, paremman elämän toivossa. Vesi- ja ympäristöpakolaiset ovat vaikeasti määriteltävä ryhmä, joka muuttaa maan sisällä tai maasta toiseen huonontuneiden vesi- tai ympäristöolojen vuoksi. Huonontuneessa tilanteessa luonnonvarat eivät riitä kaikille, jolloin osa lähtee etsimään parempaa elämää muualta. (Hugo 2011) Laajoista kansanvaelluksista on aiheutunut vakavia ongelmia sekä yksilöiden että yhteiskuntien tasolla. Yleisesti olisi tavoiteltavaa, että muuttoa edesauttaisivat ensisijaisesti positiiviset, kutsuvat muuttotekijät eivätkä negatiiviset, karkottavat muuttotekijät kuten nälkä tai jano.

3.1 Arvio juomavedentuotannosta

Pohjavesi kattaa noin kolme neljäsosaa Afrikassa käytettävästä juomavedestä, mutta kestämätön käyttö on johtanut pohjavesivarantojen ehtymiseen ja niiden käytön vaikeutumiseen. Veden huono laatu on myös vakava ja yleinen ongelma. Esimerkkejä ovat muun muassa nitraatin kulkeutuminen pohjaveteen ja WHO:n rajat ylittävät rauta- ja mangaanipitoisuudet. Vaikeassa tilanteessa on esimerkiksi Guinea-Bissau, jossa noin 80 % kaivoista oli ulosteiden saastuttamia. (Wang et al. 2013).

Pohjavesien käytölle on löydettävä muita vaihtoehtoja, kuten esimerkiksi sadevedenkeräyksen käyttö osana juomavedentuotantoa, minkä avulla pyrittäisiin kohti YK:n vuosituhattavoitteita (Wang et al. 2013). Sadevedenkeräystä suositellaan käytettäväksi yhdistettynä käyttöpistepuhdistuskäsittelyyn ja arvioidaan, että 400 litran säiliöillä yhdistettynä käsittelyyn saataisiin pudotettua vesiperäisistä sairauksista johtuvia pysyviä vammautumisia noin kymmenen prosenttia Norsunluunrannikko–Burkina Faso–Benin -välisellä alueella. Suurimmat hyödyt on havaittu alueilla, joilla satoi suhteellisen paljon suhteessa väestötiheyteen. (Fry et al. 2010) Tulosten voidaan olettaa olevan samansuuntaisia muussa Länsi-Afrikassa siten että suurimmat vaikutukset olisivat alueilla ja kaupungeissa, joissa vesihuolto on kehittymättömintä. Vedenkäsittely on tärkeää, jotta vähennettäisiin esimerkiksi *Legionella*- ja *kampylobakteerien* aiheuttamien infektioiden leviämistä (Wang et al. 2013).

Käänteisosmoosilaitoksia suunnitellaan lähtökohtaisesti rannikkokaupunkien yhteyteen tai läheisyyteen. Olemassa oleva jakeluverkko mahdollistaa tuotannon tehokkaan lisäämisen, jolloin uusien laitosten kapasiteetti saadaan hyödynnettyä. Kaupunkien kasvava väkiluku takaa riittävän kysynnän. Arvioitaessa käänteisosmoosilaitoksen soveltuvuutta, tässä rajaudutaan kaupunkialueisiin, joissa on suuruusluokkaa satoja tuhansia asukkaita tai enemmän. Rannikkoalueilla usein myös meriveden suolaisuus, ja meriveden tunkeutuminen pinta- ja pohjavesiin on heikentänyt muita makean veden varantoja.

Mauritanian pääkaupungin Nouakchottin alueella käytetään fossiilisia vesivaroja, joiden on ennustettu loppuvan lähivuosisikymmeninä. Kaupunkiin on johdettu vesiputki Senegal-joeelta, ja putken kautta tulevan vesivirran arvellaan riittävän lähivuosisikymmeniksi. Päivittäisen kapasiteetin arvioidaan yltävän 170 000 kuutiometriin päivässä. (Terra Daily 2010; Irin News 2004) Kuitenkin kaupungin mahdollisesti kasvaessa ja vesivarantojen tilanteen muuttuessa, myös käänteisosmoosilaitos saattaisi olla vaihtoehto.

Senegalin pääkaupungissa Dakarissa asui vuonna 2013 noin 3,1 miljoonaa ihmistä. Väestönkasvu on ollut voimakasta, sillä vuodesta 2002 kasvua on ollut noin miljoona henkeä. Vuonna 2015 kaupungin vedentuotantokapasiteetti oli noin 350 000 m³/d. Dakariin on valmistumassa uusi käänteisosmoosilaitos 50 000–100 000 m³/d vedentuotantokapasiteetilla. Kaupungin kokonaiskapasiteettia nostetaan suunnitelmien mukaan 150 000 m³/d vuoteen 2035 mennessä. (SONES 2015)

Gambian länsikärjessä Atlantin rannikolla ovat maan suurimmat kaupungit melko lähellä toisiaan. Tällä hetkellä pohjavesivarannot ovat riittävät, mutta ylikuormitus ja pohjaveden suolaantuminen voivat aiheuttaa käyttökelpoisten pohjavesivarantojen loppumisen. Maan halki virtaavaan Gambia-jokeen Atlantilta tulevat suolapulssit erityisesti kuivana aikana heikentävät veden saatavuutta. (UNEP 2010 s. 247) Gambian länsikärjessä saattaisi olla riittävä kysyntä desalinaatiolaitokselle.

Guinea-Bissau on hyvin köyhää ja vesi- ja muu infrastruktuuri on hyvin kehittymätöntä. Maa on suhteellisen sateisella vyöhykkeellä, ja vesihuollon ongelmia ovatkin varastojen riittävyys kuivalla kaudella (UNICEF), sekä kaivojen ja muiden vastaavien vesilähteiden kontaminoituminen (UNEP 2010, s. 253). Arvioidaan, että Guinea-Bissaussa vesihuoltoa pyritään kehittämään muilla järjestelmillä, sen sijaan että suunniteltaisiin keskitettyä desalinaatiolaitosta.

Guinea on Afrikan sateisimpia maita. Sieltä saavat alkunsa mm. Senegal- ja Niger-joet. Maan vesihuollon ongelmana ovat kuitenkin usein epäkunnossa olevat vesihuoltolaitokset. Maalla on myös runsaasti valjastamatonta vesivoimaa. (UNEP 2010, s. 251-252). Valjastamalla vesivoimaansa sähköntuotantoon, Guinea voisi vahvistaa omaa infrastruktuuria, sekä myös mahdollisesti myydä sähköä naapurimaihin. Desalinaatio ei

todennäköisesti ole järkevä tapa tuottaa juomavettä edes maan rannikolla olevalle pääkaupungille, vaan järkevämpää on lähtökohtaisesti puhdistaa runsaita makean veden varoja.

Sierra Leonen sisällissota (1991–2000) tuhosi suuren osan vesihuollosta. Maalla on kuitenkin runsaat makean veden varannot sekä runsaasti valjastamatonta vesivoimaa (UNEP 2010, s. 266-267) Köyhällä ja suhteellisen pienellä maalla on vain rajallisia taloudellisia resursseja käytettävissään, eikä desalinaatio ole todennäköisesti yhtä kustannustehokasta kuin juomaveden tuotanto makeasta vedestä.

Liberian vesihuolto kärsi pahasti sisällissodasta vuosina 1989-2003. Samaan aikaan suuri osa väestöstä muutti kaupunkeihin (UNEP 2010, s. 255). Pääkaupunki Monroviassa on noin 1,3 miljoonaa asukasta (UN 2016). Liberialla on kuitenkin runsaat makean veden varat (Taulukko 2), eikä juomaveden tuotanto merivedestä ole luultavasti kannattavaa helpompien vaihtoehtojen rinnalla.

Norsunluunrannikon rannikolla on Abidjanin metropolialue, missä on juomavedelle kysyntää noin 500 000 m³ päivässä. Tästä on kuitenkin vajetta arviolta 150 000 m³ päivittäin. (UNEP 2010, s. 245) Kun otetaan lisäksi huomioon mahdollinen pohjavesivarantojen ehtyminen, käänteisosmoosilaitos/-laitokset voisivat osaltaan olla tarjoamassa alueella puhdasta juomavettä.

Ghanan pääkaupungissa Accrassa kysyntä ylittää tarjonnan selvästi. Kysyntää on 570 000 m³, kun kaksi kaupunkiin ja ympäristöön tuottavaa vesilaitosta tuottaa 310 000 m³. Erietyisesti pääkaupungin alueella on olemassa putkiverkosto, mutta vettä säännöstellään ajallisesti. Toinen vesilaitoksista on lisäksi 75 km päässä Accrasta, ja matkasta johtuen vettä joudutaan pumppaamaan matkalla. Lisäksi vuodoista johtuvat häviöt kasvavat etäisyyden myötä. (Norström 2009)

Togon pääkaupunki Lomé sijaitsee maan rannikolla. Kaupunki saattaisi tarjota riittävän kysynnän desalinaatiolaitoksen rakentamiseksi, mutta todennäköisesti vesihuoltoa kannattaa kehittää muilla tavoin. Togo on hyvin köyhä maa, ja tarvittavan infrastruktuurin rakentamiseen vaadittavien pääomien hankinta on ainakin lähitulevaisuudessa vaikeaa. (World Bank 2011) Tarvittaessa Togossa onkin luultavasti parempi kehittää vesihuoltoa Volta-joen valuma-alueella yhteistyössä Ghanan kanssa.

Beninin rannikolla on voimakkaasti kasvava Cotonou (UNEP 2010, s. 239). Alueen makean veden varannot käyvät vähiin kysynnän kasvaessa, ja kasvava kuormitus altistaa pohjavesiä suolaantumislle (Dietz et al. 2014) Vedentuotantokapasiteetti Cotonoussa on riittämätön jo nyt, mutta erityisesti eteläisessä Beninissä on runsaat makean veden varannot. (MMEH 2006) Juomaveden tuotanto merivedestä voisi vähentää makean veden varantojen kuormitusta Beninin rannikolla.

Nigeriassa on useita suuria kaupunkeja Atlantin rannikolla. Idästä länteen lähimpänä Kamerunin rannikkoa on Calabar, missä on noin puoli miljoonaa asukasta. Calabarissa vesihuolto on suhteellisen hyvällä tasolla muuhun maahan verrattuna, ja kaupungin läheltä kulkeva Cross River tarjoaa runsaat pinta- ja pohjavesivarannot. Alueella on lisäksi runsaat sademäärät. (WSSSRP II) Port Harcourtissa asuu noin 1,3 miljoonaa ihmistä vuonna 2019 (arvio). Kaupungin vesilaitoksen kapasiteettia pyritään nostamaan 60 000 kuutiosta päivässä 180 000 kuutiioon. (ADB 2014) Kaupunki sijaitsee lahtenpohjukassa, noin 50 km päässä avomerestä, ja kaupungin edustalla on merkittävää öljynporausta. Desalinaatiolaitos tulisi luultavasti rakentaa tai ainakin vesi johtaa avomereltä asti, jotta veden vaihtuvuus olisi riittävän suuri eivätkä retentaatit aiheuttaisi ongelmia. Kaupungin vesihuoltoa kannattanee kehittää muilla tavoin.

Lähellä Beninin rajaa on Lagos, 20 miljoonan asukkaan metropoli ja maailman kolmanneksi väkirikkain kaupunki. Kaupungissa on suunnitelmissa rakentaa kolme kapasiteetillaan 190 000 m³/d desalinaatiolaitosta. Osa lisärakentamisesta voitaisiin välttää kehittämällä verkostoa ja pienentämällä verkosto- ja muita häviöitä. (Jideonwo 2014) Koska Lagos on erittäin suuri, ja makean veden varannot ovat rajalliset, desalinaatio toiminee osana kaupungin vesihuoltoa.

3.2 Käänteisosmoosin hyödyntämiskapasiteetti

Hallitustenvälinen ilmastonmuutospaneeli IPCC on tehnyt erilaisia skenaarioita ihmiskunnan kehityksestä, kuten muun muassa ihmiskunnan sosioekonomisesta kehityksestä. Alcamo et al. (2010) ovat hyödyntäneet IPCC:n kasvuskenaarioita A2 ja B2 mallintaakseen vesivarojen riittävyyttä eri puolilla Maapalloa. Molempien skenaarioiden mukaan Afrikan väkiluku 720 miljoonaa vuonna 1995 kasvaisi vuoteen 2055 mennessä kolminkertaiseksi arviolta 2,2–2,3 miljardiin ihmiseen. Samaan aikaan raportissa arvioidaan bruttokansantuotteen henkeä kohti viisinkertaistuvan. Koko Afrikan mittakaavassa vedentarpeen arvioidaan noin 3,5 kertaistuvan ja kotitalouskäytön käsittävän tästä valtaosan (Alcamo et al. 2010).

Tarvittavan kapasiteetin arvioimiseksi on haarukoitu tarvittava päivittäinen vesimäärä henkeä kohti päivässä. Maslowin tarvehierarkian mukaan ensiksi tulevat lyhyen ajan selviytymiseen liittyvät tarpeet. Juomiseen ja ruoanlaittoon riittää noin 20 l/d. Ylläpitoon, hygieniaan ja kotitaloustöihin ja ruokaviljelmille tarvittavaksi määräksi on arvioitu 70 l/d. Tämän jälkeen tulee muu vedenkäyttö, kuten karjan, puutarhoiden ja teollisuuden vedentarpeet. (WHO 2013) Tässä työssä arvioksi otetaan 120 l/d/henkilö, joka kattaa niin suoran kotitalouskäytön, kuin maanviljelyn ja teollisuuden tarpeet. Vastaavia arvioita ovat esittäneet muun muassa International Water Management Institute, ja Ogawan (2016) esittelemän laitoksen suunnittelijat.

Käänteisosmoosi vaati suhteellisen paljon energiaa. Senegaliin suunnitellun uuden laitoksen yhteydessä arvioitiin, että laitos päivittäinen sähkönkulutus on noin 208 MWh ja tehontarve noin 8,7 MW. 53 000 m³/d nimellistuotannolla saadaan vesikuution puhdistamiseen vaadittavaksi energiaksi 3,9 kWh/m³. (SONES 2015) Saman raportin yhteydessä arvioitiin, että käyttö ja huoltokustannuksista 71 % tulee sähkölaskuista ja 17 % tarvittavista kemikaaleista. Näin voidaan todeta, että sähkön saatavuus on kriittinen tekijä laitoksen suunnittelussa. Arvioidaan, että valtioissa, joissa on alle 500 MW sähköntuotantokapasiteetti ei ole riittävä vastaavan laitoksen tarpeisiin. Laitos vaatisi tällöin jatkuvasti vähintään 4 % koko valtion sähköntuotannosta. Toisaalta valtioissa, joissa on 500 MW tai suurempi sähköntuotantokapasiteetti, oletetaan oleva riittävä infrastruktuuri laitoksen tarpeisiin. Ehdon täyttäviä rannikkovaltioita ovat Ghana, Guinea, Mauritania, Norsunluunrannikko, Nigeria ja Senegal (Taulukko 3). Näistä valtioista tarkastellaan tarkemmin, onko niissä rannikolla sopivia kohteita desalinaatiolaitokselle. Muissa rantavaltioissa desalinaatiolaitokset voivat toimia vaihtoehtona, jos ympäröivä infrastruktuuri, erityisesti sähköntuotanto, sen mahdollistaa. Tässä työssä ei kuitenkaan arvioida sähköntuotannon kehittymistä, eikä siitä johtuvia olosuhteiden muutoksia sen laajemmin.

Mauritanian Nouakchottissa pystytään arvioiden mukaan lähes täyttämään juomaveden kysyntä Senegal-joesta johdetulla vedellä (Terra Daily 2010; Taulukko 4), mutta 2030-luvun lähestyessä voi tulla tarpeen jo varautua jatkuvaan väestönkasvuun ja veden kysynnän kasvamiseen. Noukchottin vesihuoltoa voitaisiin kehittää 2020- ja 2030-lukujen taitteessa valmistuvalla 50 000 m³/d desalinaatiolaitoksella, joka olisi mahdollista laajentaa kaksinkertaiselle kapasiteetille esimerkiksi 2030-luvun aikana.

Taulukko 3. Länsi-Afrikan valtioiden sähköntuotantokapasiteetit (Central Intelligence Agency 2013)

Valtio	Energiantuotantokapasiteetti (MW)	Valtio	Energiantuotantokapasiteetti (MW)
Benin	200	Mali	600
Burkina Faso	300	Mauritania	519
Norsunluunrannikko	1 900	Niger	102
Gambia	91	Nigeria	12 520
Ghana	3 656	Senegal	1 000
Guinea	500	Sierra Leone	100
Guinea-Bissau	39	Togo	86
Liberia	60		

Dakarin vedentuotantokapasiteetti vuona 2014 on ollut 285 000 m³/d (SONES 2015). Väkiluvun ja vedentarpeen kasvaessa voimakkaasti (Taulukko 4) syntyy voimakas tarve suuremmalle kapasiteetille. Dakarissa desalinaatiokapasiteettia voitaisiin kasvattaa 100 000–300 000 m³/d viimeistään 2030-luvulla. Tarvittava kapasiteetti riippuu muun muassa

ilmastonmuutoksen vaikutuksista alueen sademääriin, sekä suolaveden tunkeutumiseen pinta- ja pohjavesiin (SONES 2015).

Abidjanin metropolialueella on noin 430 000 kuutiometrin tuotantokapasiteetti päivässä (SODECI 2016). Vedentarpeen ennustetaan kasvavan arviolta 920 000 kuutiometriin päivässä vuoteen 2030 mennessä. Tuottamalla juomavettä 100 000–300 000 m³/d nykyistä enemmän merivedestä vähennettäisiin pohjavesiin kohdistuvaa raskautusta.

Taulukko 4. Valittujen kaupunkien väkiluvun ja vedentarpeen kehitys (*World Of Meters 2017; UN 2016*). Vedentarve on arviolta 120 l/d henkilöä kohti

Kaupunki	Väkiluku	Vedentarve (m ³ /d)	Väkiluku 2030 (arvio)	Vedentarve 2030 (arvio) (m ³ /d)
Nouakchott	968 000	116 160	1 600 000	200 000
Dakar	3 520 000	422 400	6 000 000	720 000
Accra	2 277 000	273 240	3 200 000	390 000
Abidjan	4 860 000	583 200	7 700 000	920 000
Lagos	13 123 000	1 574 760	24 000 000	2 880 000

Ghanan Pääkaupungissa Accrassa on noin 160 000 m³/d kapasiteetti vedentuotantoon (International Water Management Institute). Se ei riitä edes nykyisellään kaupungin tarpeisiin, ja vuoteen 2030 mennessä tarve kasvaa lähes 390 000 kuutioon päivässä (Taulukko 4). Kysynnän vastaamiseksi vuoteen 2030 mennessä voitaisiin rakentaa 100 000–150 000 m³/d desalinaatiokapasiteetti, ja pyrkiä tuottamaan loput tarvittavasta juomavedestä muilla tavoin.

Lagosin metropolialueen väkiluku vastaan suunnilleen muiden tässä mainittujen kaupunkien/alueiden yhteenlaskettua väkilukua (Taulukko 4). Vastaavasti vesihuollon mitta-kaava on aivan toista luokkaa kuin näiden muiden miljoonakaupunkien. Kaupungin nykyinen vedentuotanto on noin 800 000 m³/d, mikä on vain puolet nykyisestä tarpeesta. Suunnitelmissa on kasvattaa kapasiteettia 2,8 miljoonaan kuutiometriin päivässä. (Daily Times 2016; LWC 2016) Suunnitellusta uudesta kapasiteetista vuoteen 2020 mennessä noin 570 000 m³/d on arvioitu toteutettavaksi desalinaatiolla, mahdollisesti käänteisosmoosilla (LWC 2016). Kapasiteetin laajentaminen voi jatkua 2020-luvulla tarvittaessa lisäämällä desalinaatiokapasiteettia 50 000–100 000 m³/d.

4. KULTTUURI JA KIELI

Puhdas juomavesi ei ole itsestäänselvyys, vaan se vaatii työtä, ylläpitoa ja oikeanlaista käyttöä. Virheitä jotka pilaavat juomaveden voi tapahtua monessa vaiheessa. Esimerkiksi uusi kaivo voi olla liian matala, väärässä paikassa, tai huonosti suojattu pintavedeltä. Tällöin on kyse rakentamis- ja käyttöönottovaiheen virheistä. Käänteisosmoosilaitoksella, tai muulla vedentuotantolaitoksella voi tapahtua ammatilliseen käyttöön liittyviä virheitä prosessinohjaukseen, kunnossapitoon tai yleiseen hygieniaan liittyen. Virheitä voi tehdä myös kaivon käyttäjä tai ylipäättään kuka tahansa loppukäyttäjät pilaamalla joko omansa tai toisen käyttövesiä. Väärä tai huonosti toteutettu käyttö on myös suuri ongelma yksilötasoa laajemmassa perspektiivissä. Juomaveteen vaikuttavia päätöksiä tekevät voidaan jakaa karkeasti kolmeen ryhmään: Juomaveden laatuun työnsä puolesta vaikuttavat (operaattorit), loppukäyttäjät sekä hallinnolliset elimet.

Länsi-Afrikka lukuisten heimojen, kansojen, kulttuurien ja kielten koti. Paikallisten kielten lisäksi alueen valtioissa käytetään hallintokielenä siirtomaaisänniltä periytyneitä englantia ja ranskaa. Yhteinen kieli tuo edellytyksiä kommunikaatiolle, ja sen puute vaikeuttaa sitä. Englanti ja ranska voivat toimia yhteisenä kielenä tieteellisessä ja teollisessa ympäristössä muiden kansainvälisten toimijoiden kanssa, sekä esimerkiksi julkisessa ja teollisessa hallinnossa. Englantia tai ranskaa osaamattomien kanssa tulee toimia jollakin muulla yhteisellä kielellä. Ja vastaavasti kulttuurit voivat olla samankaltaisia, tai poiketa toisistaan niin, että yhteistyö vaikeutuu. Seuraavaksi tarkastellaan operaattoreiden ja loppukäyttäjien näkökulmasta kieltä ja kulttuuria, sekä miten ne voivat vaikuttaa vesihuollon toimivuuteen ja sen haasteisiin.

4.1 Operaattorit

Vedentuotannossa kehitysmaissa on huomioitava, että työvoima ei ole yhtä koulutettua, kuin esimerkiksi Suomessa. Momba et al. (2005) tutkivat vesihuollon ongelmia haja-asutusalueen vedenpuhdistuslaitoksella Etelä-Afrikassa. He havaitsivat, että operaattoreiden puutteellinen tuntemus prosessista yhdessä muun muassa riittämättömän huollon kanssa oli johtanut siihen, että tuotettu vesi ei aina ollut juomakelpoista. Koulutuksessa on mukaan huomioitava kielimuuri, sillä monet työntekijät puhuvat vain paikallista kieltä. Myös koulutusmateriaali oli liian vaikeaselkoista ja väärällä kielellä. Koulutuksen tulisi tapahtua paikan päällä ja työntekijöille tutuilla työvälineillä. (Momba et al. 2005) Koulutuksessa tulisi lisäksi käyttää kaksikielistä tai paikallisella kielellä olevaa materiaalia, joka on selkeätä ja kuvilla selkeytettyä, hän jatkaa. Kaksikielisyydestä on se hyöty, että paikallista kieltä osaamaton mahdollinen asiantuntija pystyy ohjeiden avulla paremmin kommunikoimaan työntekijöiden kanssa, myös koulutustilanteessa sama hyöty.

Koulutus on tärkeä osa organisaation tehokkuutta, mikä korostuu entisestään vesihuollossa, jossa sijoitettu pääoma yhtä työntekijää kohti on korkea ja toiminnalla on merkittävä vaikutus yleiseen terveyteen. Maissa, joissa yleinen koulutustaso on matala, yleensä julkisen vesihuollon on kilpailtava kyvykkäistä työntekijöistä muiden toimijoiden kanssa. Kilpailija voi olla esimerkiksi yksityinen energiantuotantolaitos. Tämän vuoksi vesilaitosten tulisi tarjota mahdollisuuksia muun muassa edetä uralla kykyjen, ei pelkän iän perusteella, houkutellessa nuoria työntekijöitä. Monissa valtioissa suuri osa väestöstä on lukutaidotonta. Siksi koulutus ja ohjeet on suunniteltava visuaalisiksi, ja kouluttajilla olisi hyvä olla kokemusta ja tietoa ei-kirjallisesta kommunikoinnista. Ohjeiden vaaratilanteita ja muita harvinaisia tilanteita varten on oltava myös lukutaidottomien ymmärrettävissä. Kuvia, julisteita ja kaavioita tulisi käyttää runsaasti tiedonvälittämiseen, sekä vesilaitoksen tulisi tukea työntekijöidensä luku- ja kirjoitustaidon kehittämistä. (Franklin 1983)

4.2 Käyttäjät

Länsi-Afrikassa vajaa puolet miehistä ja yli puolet naisista on lukutaidottomia. Vertailtaessa maita lukutaidon perusteella huonoimmista kymmenestä maasta seitsemän on Länsi-Afrikassa. Yhteensä lukutaidottomia on noin 65 miljoonaa, joista 40 miljoonaa on naisia. Monissa alueen maissa koulunkäyntiä vaikeuttaa se, että peruskoulun alusta lähtien opetus on maan hallintokielellä, eikä siis aina lapsen äidinkielellä. Lukutaidottomuus vaikeuttaa kouluttautumista, oman elintason nostamista sekä osallistumista yhteiskunnan toimintaan. (Pearce 2009)

Afrikassa kotitalouden vedensaannista huolehtivat yleensä nimenomaan naiset. Naiset huolehtivat noin 70 % kotitalouden vedensaannista. (UNEP 2009) Kielimuureista ja alhaisesta koulutusasteesta johtuen on veteen ja hygieniaan liittyvä informaatio ja ohjeet suunniteltava hyvin. Samoin kuin operaattoreille, myös käyttäjille suunnatun konkreettisen materiaalin tulee olla kuvallista, selkeää ja yksikäsitteistä, sekä sen yhteydessä tulee tarvittaessa olla ohjeet paikallisilla kielillä ja hallintokielellä. Tällöin lukutaitoiset voivat jakaa ohjeiden tietoja muille. Suositeltavampaa kuitenkin olisi, että veden puhtauteen ja hygieniaan kriittisesti liittyviä uusia asioita, kuten jonkin apuvälineen käyttöä, koulutettaisiin mahdollisimman perusteellisesti, konkreetian avulla.

5. POHDINTAA

Vesihuoltoverkosto koostuu monesta osasta, vedenpuhdistuslaitoksista, jakeluverkostoista ja jätevedenpuhdistamoista. Lisäksi on otettava huomioon ympäröivät vesistöt. Desalinaatiolaitos vaatii toimiakseen toimivan jakeluputkiston, sillä tankkiautoilla veden toimittaminen ei olisi taloudellista, ja keskitetyn vedentuotannon tehokkuudesta menetettäisiin paljon. Wang et al. (2013) mainitsevat suurimmiksi haasteiksi vesihuollolle Afrikassa nimenomaan infrastruktuurin kehittymättömyyden. Toinen heidän mainitsemansa haaste on sähkönjakelun ongelmat. Käänteisosmoosilla juomaveden desalinaatio kuluttaa runsaasti energiaa. Lyhyetkin katkot sähkönjakelussa voivat häiritä toimintaa huomattavasti, sillä laitos puhdistaa vettä aktiivisesti pumppaamalla. Wang et al. (2013) ehdottavat jätevedenpuhdistamoiden hyödyntämistä energiantuotantoon prosessissa mahdollisesti syntyvän biokaasun avulla. Erityisesti rakennettaessa vedentuotantolaitosta ympäristöön, jossa ei ole vesijohtoverkosta valmiina kannattaa harkita jätevesiverkoston ja jätevedenpuhdistamon rakentamista samalla kertaa. Haittana tästä ovat suuret yhtäaikaiset investointikustannukset.

Tässä työssä tutkittiin 12 Länsi-Afrikan valtion rantakaupunkeja ja niiden vesihuoltoa. Alueelta tutkittiin mitkä kaupunki- tai metropolialueet ovat riittävän suuria, jotta niissä on mahdollisesti kannattavaa tuottaa vettä käänteisosmoosilaitoksella. Lisäksi arvioitiin karkeasti valtion sähköntuotantokapasiteettia ja sen avulla sähkösaannin luotettavuutta. Vielä perehdyttiin tarkemmin joidenkin kaupunkien nykyiseen vesihuoltoon ja sen laajentamissuunnitelmiin ja –tarpeisiin. Näille kaupungeille laskettiin tarvittava vedentuotantokapasiteetti vuodelle 2030 (Taulukko 4). Lopulta tehtiin arviot viiden eri kaupungin osalta mahdollisesta vedentuotantokapasiteetista käänteisosmoosilla.

Koko Länsi-Afrikkaa ajatellen merivedestä tuotetaan, ja tullaan tuottamaan luultavasti vain osa käytettävästä juomavedestä. Suuri(n) osa juomavedestä tehdään ja tullaan tekemään jollakin muulla menetelmällä. Yhdistyneiden kansankuntien ruoka- ja maanviljelysorganisaation tietojen pohjalta lasketaan kunkin valtion osalta henkeä käytetty päivittäinen vesimäärä (UN FAO 2013). Päivittäisen vesimäärän ja väkiluvun avulla arvioidaan, kuinka suuri kapasiteetti tarvittaisiin 120 litran päivittäiseen tavoitteeseen tarvittaisiin. Lisäksi arvioidaan, kuinka suuri kapasiteetti tarvittaisiin vuonna 2030 väestönkasvuennusteen mukaan. Tulokset esitellään taulukossa 5.

Taulukossa 5 vertaillaan Länsi-Afrikan valtioiden ja Suomen veden kotitalouskäyttöä. Tarvittavaa uutta kapasiteettia arvioidaan oletuksella, että päivittäinen 120 litran tavoite henkilöä kohti tulisi kotitalouskäytöstä. Arvio on hieman epätarkka taulukoitaessa vesivarojen käyttöä henkilöä kohti, sillä 120 litran tavoitteeseen voi kuulua myös esimerkiksi maatalouden vedenkäyttöä. Arvio kuitenkin paranee arvioitaessa lisätuotannon tarvetta.

Uuden vedentuotannon tarve on saatu laskemalla erotus tavoitteellisen ja toteutuneen vesivarojen käytön välillä. Arvio lisätuotannosta tarpeesta vuoteen 2030 mennessä on laskettu käyttämällä samaa 120 litran vedentarvetta henkeä kohti, ja vähentämällä tarvittavasta kokonaiskapasiteetista olemassa oleva tuotantokapasiteetti. Luvussa 3.2. arvioitiin, että uutta käänteisosmoosikapasiteettia rakennetaan 970 000–1 520 000 m³/d. Verrattaessa kokonaisvedentarpeen kasvuun havaitaan, että kyseisellä teknologialla saadaan vain rajallinen osuus tarpeesta täytettyä. Yhteensä lisätuotannon tarvetta on tällä hetkellä noin 43 miljoonaa kuutiota päivässä, ja vuonna 2030 noin 62 miljoonaa kuutiota päivässä. Uusi käänteisosmoosikapasiteetti vastaisi noin 3 % tarpeen kasvusta ja 2 % prosenttia kokonaistuotannosta vuonna 2030. Jos muun vedentuotannon kokonaismäärä säilyisi samana vuoteen 2030 asti, vastaisi käänteisosmoosituotanto noin 6 % koko tuotannosta, mutta tämä vaihtoehto on hyvin epätodennäköinen. Noin puolet lisätarpeesta tulee yhdestä valtiosta, Nigeriasta. Tuottamalla juomavettä käänteisosmoosilla merivedestä voidaan ratkaista rajallinen osuus vedentuotannon haasteista Länsi-Afrikassa.

Taulukko 5. Veden käyttö (Municipal use) Länsi-Afrikan valtioissa ja Suomessa, ja ennuste vuoteen 2030 (UN DESA 2017; UN FAO 2013).

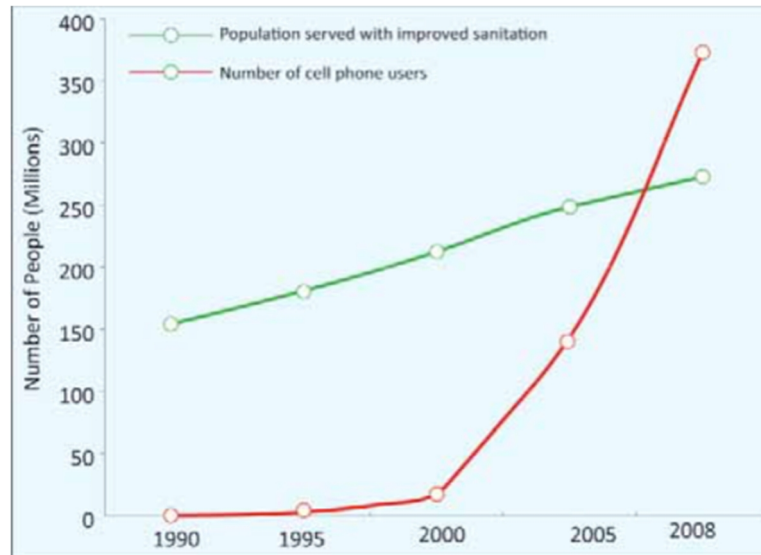
Valtio	Väkiluku (miljoonaa) (2010)	Väkiluku (miljoonaa) (2030)	Veden käyttö (m ³ /d)(2002-2005)	Veden käyttö henkilöä kohti (l/d)	Lisätuotannon tarve (m ³ /d)	Lisätuotannon tarve 2030 (m ³ /d)
Benin	9,2	15,6	110 000	12,3	990 000	1 760 000
Burkina Faso	16,3	27,4	770 000	47,0	1 190 000	2 520 000
Norsunluunrannikko	21,6	33,3	1 700 000	78,6	890 000	2 300 000
Gambia	1,8	3,0	90 000	53,1	120 000	270 000
Ghana	34,3	37,3	900 000	26,3	3 220 000	3 570 000
Guinea	10,3	17,6	570 000	55,2	670 000	1 550 000
Guinea-Bissau	1,7	2,5	60 000	38,8	130 000	240 000
Liberia	4,1	6,5	190 000	47,3	300 000	590 000
Mali	13,3	27,1	1 600 000	120,3	0	1 640 000
Mauritania	3,4	6,1	270 000	79,8	140 000	460 000
Niger	15,9	35,0	810 000	51,0	1 100 000	3 390 000
Nigeria	158,3	264,1	11 020 000	69,6	7 970 000	20 670 000
Senegal	12,9	22,1	240 000	19,0	1 300 000	2 410 000
Sierra Leone	5,8	9,7	300 000	51,3	400 000	870 000
Togo	6,8	10,5	250 000	36,3	570 000	1 010 000
Yhteensä	315,5	517,8	18 890 000	52,4	21 330 000	43 250 000
Finland	5,4	5,7	1 100 000	204,8	-450 000	-410 000

Suomalainen kuluttaa noin 205 litraa vettä vuorokaudessa. Tämä on yli kuusitoistakertainen Beninin vastaavaan lukuun verrattuna ja yli nelinkertainen Länsi-Afrikan keskiarvoon verrattuna. Taulukon 6 perusteella suomalaista yhteiskuntien vedenkulutusta voitaisiin leikata kolmanneksella, ja silti ylittäisimme 120 litran päivittäisen rajan. Suomessa

tulisikin tehostaa vedenkäyttöä, sillä tehokkuuden parantuessa koko veden käyttöketjun läpi voidaan saada huomattavia säästäjä esimerkiksi energiankulutuksessa. Paikalliset olosuhteet, erityisesti talvi on kuitenkin otettava huomioon vedenkäytön suunnittelussa jo verkostojen rakentamisesta lähtien. Esimerkiksi pienenevä veden virtaama voi lisätä putkiston jäätymisriskiä niin asunnoissa kuin runkoverkostossakin. Suomessa on kuitenkin niin taloudellista kuin tiedollista pääomaa runsaasti juomaveteen liittyvien ongelmien ratkaisemiseksi. Kun suomalaiset panostavat omaan puhtaaseen veteen, samalla syntyy ratkaisuja monen muun ongelmiin.

Käänteisosmoosi vaatii sähköntuotannon vakautta. Vakaus paranee, kun sähköverkosto ja tuottajien määrä kasvaa. Valtioiden välisten siirtoverkkojen kehitys vakauttaisi koko alueen kysyntää ja tarjontaa. Länsi-Afrikassa on joitakin maiden välisiä yhteyksiä, ja verkostoa on tarkoitus laajentaa koko Länsi-Afrikkaan (UNEP 2010, s. 149). Lisäksi verkostot voisivat auttaa esimerkiksi Guinean ja Sierra Leonen valjastamattoman vesivoiman hyödyntämisessä, kun tuotettu sähkö pystyttäisiin myymään laajemmilla markkinoilla. Vesivoimaa pystyttäisiin mahdollisesti hyödyntämään säätövoimana myös lähimaiden alueella, vastaavasti kuin esimerkiksi pohjoismaissa. Tällöin myös käänteisosmoosia energiaintensiivisenä teknologiana voitaisiin hyödyntää laajemmin.

Jotta vesihuollon monipuoliseen haasteeseen kyettäisiin vastaamaan, asukkaiden, työntekijöiden ja julkisen vallan arvostuksen puhtaan veden suhteen on oltava riittävä. Esimerkkiä ja ajatuksia vesihuollon kehittämiseen voidaan hakea matkapuhelimien yleistymisestä Afrikassa. Matkapuhelimet ovat yleistyneet Afrikassa erittäin voimakkaasti, niin kuin muuallakin maailmassa. Matkapuhelinten käytön yleistymiseen verrattuna saniteettitilojen kehitys on todella hidasta (Kuva 1). Keinoina kehittää vesihuoltoa ja saniteettiverkostoja voitaisiin hyödyntää niiden brändäämistä ja asukkaiden sitouttamista. Esimerkiksi jos asukkaat saadaan sijoittamaan varojaan vessoihin, kuten he ovat sijoittaneet puhelmiin, niin myös käyttö yleistyisi. Samoin vessan ajattelu statussymboliksi ja sitä kautta tavoiteltavaksi auttaisi saniteettiympäristön kehittämistä. UNEP (2010) Alueilla, joissa talousvesi saadaan joko kaivoista, sadevesikeräimillä tai muuten pienen mittakaavan toiminnalla, voitaisiin pyrkiä nostamaan oma puhdas kaivo tai turvallinen sadevesikeräin säiliöineen ylpeyden aiheeksi. Tällöin niistä pidettäisiin paremmin huolta, ja esimerkiksi ulosteiden saastuttamat kaivot saataisiin vähenemään, kun kaivot suojattaisiin asianmukaisesti.



Kuva 1. Matkapuhelimen käyttäjät ja henkilöt joilla käytössään suojatut saniteettimahdollisuudet Afrikassa vuosina 1990-2008. Punaisella merkitään matkapuhelinten käyttäjiä ja vihreällä väestöä, jolla on käytössään suojattu sanitaatio. Luvut esitetty miljoonina (UNEP 2010)

Jotta vedentuotannon tavoitteisiin Länsi-Afrikassa päästään, tarvitaan monenlaisia ratkaisuja. Ratkaisut ovat laaja-alaisia sadevesikeräimistä, kyläkaivoista ja vedenpuhdistustableteista perinteisiin vedentuotantolaitoksiin ja desalinaatiolaitoksiin. Tärkeää on kussakin tapauksessa saada puhdistettua vesi ja tämän jälkeen suojattua se kontaminaatiolta. Käytännössä miljoonat ihmiset tekevät omaan, ja läheistensä juomaveden laatuun tekeviä valintoja jatkuvasti, joko parantaen tai huonontaen vedensaannin mahdollisuuksia. Siksi onkin tärkeää koulutuksen kautta levittää perustietoa vedenkeräyksen ja säilytyksen biologiasta, fysiikasta ja kemiasta. Tällöin säästytään monelta kantapään kautta oppimiselta.

6. YHTEENVETO

Länsi-Afrikan viidestätoista mannervaltiosta kolmesta sijaitsee Atlantin rannikolla. Kaikissa niissä on ongelmia niin puhtaan juomaveden saatavuuden kuin riittävyyden suhteen. Jos kasvavan kysynnän tarpeisiin ei pystytä vastamaan, niin uhkana on paikallisesti vesivälitteisesti leviävien infektioiden aiheuttamat taudit, sekä laajemmassa mittakaavassa vesipakolaisuus ja siihen liittyvät sosiaaliset ja ihmisoikeusongelmat.

Desalinaatiolla, eli suolan poistamisella vedestä, voidaan hyödyntää muutoin juomakelvotonta merivettä juomavetenä. Pelkkä suolan poisto ei kuitenkaan riitä, vaan vesi käsitellä niin, että se täyttää juomavettä koskevat vaatimukset. Kannattavin teknologia tällä hetkellä on useimmiten käänteisosmoosi. Käänteisosmoosissa vesi pumpataan ulkoisella paineella läpi suodattimesta, jonka reiät ovat noin kahden vesimolekyylin kokoisia. Tällöin suurin osa vesimolekyylillä suuremmista partikkeleista, kuten natrium- ja kloridi-ionit suodattuvat pois vedestä. Käänteisosmoosi vaatii veden esi- ja jälkikäsittelyä suodattimien toiminnan mahdollistamiseksi ja tuotettavan puhtaan juomaveden stabiloimiseksi.

Käänteisosmoosilla juomaveden tuottamisella merivedestä saataisiin Länsi-Afrikassa rajallinen hyöty. Tekniikka ja mittakaava ovat sopivia lähinnä rannikkoalueiden suurkaupungeille, joilla ei ole riittävää makean veden varantoa, käytännössä jokea, käytettävissään. Tällä hetkellä kapasiteettia on noin 50 000 m³/d, mutta laajoja laajennussuunnitelmia on esimerkiksi Lagosissa (LWC 2016). 2030-luvulla juomavettä voitaisiin tuottaa käänteisosmoosilla Länsi-Afrikassa 970 000–1 520 000 m³/d.

Noin puolet arvioidusta tulevasta käänteisosmoosikapasiteetista on Lagosin alueella Nigeriassa, jonne sitä ollaan rakentamassa 570 000 m³/d. Tuota kapasiteettia voidaan vielä laajentaa 620 000–670 000 m³/d määriin asti. Kolmeen muuhun kaupunkiin, Accraan, Abidjaniin ja Dakariin, käänteisosmoosilla voitaisiin tuottaa suuruusluokkaa 200 000 m³/d. 200 000 m³/d vastaa 120 litran vesimäärää 1,7 miljoonalle ihmiselle kussakin kaupungissa. Mauritanian Nouackhottiin arvioidaan rakennettavan 50 000 m³/d juomavesituotantoa käänteisosmoosilla.

Käänteisosmoosi vaatii ulkoisen energianlähteen, minkä vuoksi se ei ole aina kilpailukykyinen vaihtoehto. Tiiviisti asutuilla rannikkoalueilla sen avulla voidaan kuitenkin vähentää makean veden varantoihin kohdistuvaa kuormitusta. Tämän vuoksi käänteisosmoosi voi tarjota luotettavasti juomavettä alueilla, joilla makean veden varantoja ylikuormitetaan ja niissä on voimakasta kausittaista vaihtelua, kuten osassa Länsi-Afrikkaa. Tilanteessa, jossa makeaan vettä on runsaasti saatavilla, ei käänteisosmoosi ole yleensä järkevä vaihtoehto, vaan perinteiset vedenpuhdistuslaitokset ja kaivot pystyvät tuottamaan hyvälaatuista juomavettä pienemmillä investointi- ja käyttökustannuksilla.

Ympäröivää infrastruktuuria ja sen mahdollisia muutoksia huomiointiin rajallisesti. Työssä huomioitiin valtion sähkötuotantokapasiteettia arvioitaessa, kuinka vakaa sähköntuotanto on käänteisosmoosilaitoksen tarpeisiin. Yllättäviä tapahtumia, kuten luonnonkatastrofeja ja sisä- tai ulkopoliittisia kriisejä alueella ei oteta huomioon lainkaan. Kuitenkin muistutetaan, että esimerkiksi ilmastonmuutoksesta voi aiheutua Länsi-Afrikan alueella hyvin erilaisia muutoksia elinolosuhteisiin. Liberiasta ja Sierra Leonesta opimme myös, että vesihuollon kehitys voi taantua pahimmillaan pitkäksi aikaa. Siksi kuten muitakin asioita, vesihuoltoakin tulee kehittää yhteinen etu tärkeimpänä päämääränä, ja osapuolten tulee ymmärtää, että puhdas juomavesi on kaikkien etu.

LÄHTEET

African Development Bank Group (ADBG) (2014). Urban Water Sector Reform and Port-Harcourt Water Supply and Sanitation Project – Project Appraisal Report. Saatavissa: https://www.afdb.org/fileadmin/uploads/afdb/Documents/Project-and-Operations/Nigeria_-_Urban_Water_Sector_Reform_and_Port-Harcourt_Water_Supply_and_Sanitation_Project_-_Appraisal_Report.pdf. Viitattu 2.8.2017.

Alcamo, J., Flörke, M., Märker, M. (2010). Future long-term changes in global water resources driven by socio-economic and climatic changes. *Hydrological Sciences Journal*. Vol.52(2), pp.247–275.

Busch, M., Mickols, W.E. (2004). Reducing energy consumption in seawater desalination. *Desalination*. Vol.165, pp.299–312.

Central Intelligence Agency (2013). The World Factbook. Saatavissa: <https://www.cia.gov/library/publications/the-world-factbook/index.html>. Viitattu 10.7.2017.

Daily Times (2016). Lagos govt. needs \$3,5b to execute Water Master Plan. Verkkouutinen. Saatavissa: <https://dailytimes.ng/news/lagos-govt-needs-3-5b-execute-water-master-plan/>. Viitattu 5.9.2017.

Dietz, T., Nijzink, L., Seuren, G., Veldkamp, F. (2014). Water dynamics in the seven African countries of Dutch policy focus: Benin, Ghana, Kenya, Mali, Mozambique, Rwanda, South Sudan – Report on Benin. African Studies Centre Leiden. 17 p.

El-Dessouky, H. T., Ettouney, H. M. (2002). Fundamentals of Salt Water Desalination. 690 p.

Elimelech, M., Phillip, W. (2011). The Future of Seawater Desalination: Energy, Technology, and the Environment. *Science*. Vol.333, pp.712–717.

Franklin, R. (1983). Waterworks Management on Developing Communities. Franklin Associates. 191 p.

Fritzmann, C., Löwenberg, J., Wintgens, T., Melin, T. (2007). State-of-the-art of reverse osmosis desalination. *Desalination*. Vol.216, pp.1–76.

Fry, L., Cowden, J., Watkins, D., Clasen, T., Mihelcic, J. (2010). Quantifying Health Improvements from Water Quantity Enhancement: An Engineering Perspective Applied to Rainwater Harvesting in West Africa. *Environmental Science & Technology*. Vol.44(24), pp.9535–9541.

Hugo, G. (2011). Future demographic change and its interactions with migration and climate change. *Global Environmental Change*. Vol.21(S1), pp.S21-S33.

International Water Management Institute. Issue Brief: Adapting to Climate Change - Addressing the Water Supply Deficit in Accra, Ghana. Saatavissa: [http://uradapt.iwmi.org/Data/Sites/23/projectdocuments/accra-issue-brief-\(latest-version\).pdf](http://uradapt.iwmi.org/Data/Sites/23/projectdocuments/accra-issue-brief-(latest-version).pdf). Viitattu 9.8.2017.

Irin News (2004). Desert capital struggles with water crisis. Verkkouutinen. Saatavissa: <http://www.irinnews.org/news/2004/04/15/desert-capital-struggles-water-crisis>. Viitattu 21.9.2017.

Jideonwo, J. (2014). Ensuring Sustainable Water Supply in Lagos, Nigeria. University of Pennsylvania. 181 p.

Karttunen (2004). RIL 124-2 Vesihuolto II. Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry. 688 s.

Lagos Water Corporation (2016). Lagos Water Supply Master Plan. Saatavissa: <http://lagoswater.org/wp-content/uploads/2016/04/Lagos-Water-Master-Plan.pdf>. Viitattu 11.8.2017.

Momba, M.N.B., Makala, N., Tyafa, Z., Brouckaert, B.M. (2005). A model partnership for sustainable production of safe drinking water for rural communities in South Africa. *South Africal Journal of Science*. Vol.101, pp.335–336.

Memento (1989). *Technique de l'eau*. Lagrande. 592 p.

Ministere des Mines de l'Energie et de l'Hydraulique (MMEH) (2006). *Strategie Nationale en l'Approvisionnement en Eau Potable en Milieu Urbain 2006 – 2015*. Saatavissa: <http://www.soneb.com/soneb15/pg-service-eau>. Viitattu 21.9.2017.

National Water Company of Senegal (SONES) (2015). *Preparatory Survey for Mamelles Sea Water Desalination Plant Construction Project – Final Report*. 394 p.

Norström, A (2009). *Water and sanitation in Ghana – Focus on Adenta Municipal District in the Greater Accra Region*. CIT Urban Water Management AB.

Ogawa, F. (2016). Ghana: Government's Sea Water Desalination Plant Brings Relief to Teshie-Nungua and Surrounding Areas. All Africa. Verkkouutinen. Saatavissa: <http://allafrica.com/stories/201602091622.html>. Viitattu 21.9.2017.

Pearce, C. (2009). From closed books to open doors – West Africa's literacy challenge. Oxfam International. Saatavissa: https://www.oxfam.org/sites/www.oxfam.org/files/bp_closed_books_west_africa.pdf. Viitattu 21.8.2017.

Sincero, A. P., Sincero, G. A. (2003). Physical-chemical treatment of water and wastewater. London. IWA Publishing. 856 p.

Société de distribution d'eau de la Côte d'Ivoire (2016) Rapport de Gestion. Saatavissa: <http://www.sodeci.ci/application/themes/exquiso/rapports/sodeci-rapport-de-gestion-2016.pdf>. Viitattu 9.8.2017.

Subramani, A., Jacangelo, J. (2015). Emerging desalination technologies for water treatment: A critical review. Water Research. Vol.75, pp.165-187.

Terra Daily (2010). Mauritania's dry capital opens water supply from Senegal. Verkkouutinen. Saatavissa: http://www.terradaily.com/reports/Mauritania_dry_capital_opens_water_supply_from_Senegal_999.html. Viitattu 21.9.2017.

UN (2016). The World's Cities. Saatavissa: http://www.un.org/en/development/desa/population/publications/pdf/urbanization/the_worlds_cities_in_2016_data_booklet.pdf. Viitattu 9.8.2017.

UN FAO (2013). AQUASTAT database. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Saatavissa: <http://www.fao.org> Viitattu 5/2013.

UN FAO (2016). AQUASTAT Main Database. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). Saatavissa: <http://www.fao.org/nr/water/aquastat/data/query/index.html>. Viitattu 23.9.2017.

UNEP (2010). "Africa Water Atlas". Division of Early Warning and Assessment (DEWA). United Nations Environment Programme (UNEP). Nairobi, Kenia. 314 p.

UN DESA (2017). World Population Prospects: The 2017 Revision, Key Findings and Advance Tables. United Nations Department of Economic and Social Affairs. Saatavissa: https://esa.un.org/unpd/wpp/Publications/Files/WPP2017_KeyFindings.pdf. Viitattu 20.9.2017.

UNICEF (2014). Vuosituhattavoitteet. Saatavissa: <https://www.unicef.fi/unicef/tyomme-paakohteet/vuosituhatavoitteet/>. Viitattu 14.8.2016.

UNICEF. Water, Environment and Sanitation – Country Profile: Guinea Bissau. Saatavissa: https://www.unicef.org/guineabissau_wes.pdf. Viitattu 31.7.2017.

Voutchkov, N. (2008). Seawater Reverse Osmosis Design and Optimization. Luentokalvot. Stanford University.

Wang et Al. (2013). Water and Wastewater Treatment in Africa – Current Practices and Challenges. Clean - Soil, Air, Water 2014, Vol.42(8), pp. 1029-1035.

Water Supply and Sanitation Sector Reform Programme Phase II (WSSSRP II) – Cross River. Verkkosivu. Saatavissa: <http://wsssrp.org/crossriver>. Viitattu 8.9.2017.

WHO (2013). How much water is needed in emergencies. Saatavissa: http://www.who.int/water_sanitation_health/publications/2011/WHO_TN_09_How_much_water_is_needed.pdf?ua=1. Viitattu 21.9.2017.

WHO (2011). Guidelines for Drinking-water quality 4th edition. World Health Organisation (WHO). Malta. 518 p.

World Bank (2011). Water Supply and Sanitation in Togo – Turning Finance into Services for 2015 and Beyond. Saatavissa: <https://wsp.org/sites/wsp.org/files/publications/CSO-Togo.pdf>. Viitattu 31.7.2017.