

Juulia Tavasti

KOSTEIKOT HARMAIDEN VESIEN PUHDISTUKSESSA

Kandidaatintyö
Tekniikan ja luonnontieteiden tiedekunta
Tarkastaja Hannele Auvinen
Huhtikuu 2023

TIIVISTELMÄ

Juulia Tavasti: Kosteikot harmaiden vesien puhdistuksessa
Constructed Wetlands for Greywater Purification
Kandidaatintyö
Tampereen yliopisto
Tekniikan ja luonnontieteiden TkK-tutkinto-ohjelma
Bio- ja ympäristötekniikka
Huhtikuu 2023

Ilmastonmuutos, kuivuus ja pula puhtaasta vedestä ovat synnyttäneet tarpeen tehostaa veden saatavuutta ja kierrätystä tulevaisuudessa. Yksi mahdollinen keino tähän on harmaan veden paikallinen puhdistus ja uudelleenkäyttö.

Harmaa vesi on jätevettä, jossa on mukana kaikki muut paitsi vessanpöntöstä tulevat jätevedet, eli esimerkiksi jätevedet keittiöstä, pesukoneista, suihkusta ja lavuaareista. Harmaa vesi on puhtaampaa kuin varsinainen jätevesi, sillä se ei sisällä juuri ulosteperäisiä bakteereja ja vain vähän typpeä, mutta se ei silti ole sellaisenaan sopivaa käytettäväksi.

Rakennetut kosteikot ovat luonnon omia puhdistusprosesseja hyödyntäviä puhdistusmenetelmiä. Niiden energiantarve on vähäinen ja käyttö helppoa, mutta tilantarve melko suuri. Perinteisimmät rakennetut kosteikot ovat pintavirtauskosteikot, sekä kaksi erilaista pohjavirtauskosteikkoa: vertikaalinen – ja horisontaalinen pohjavirtauskosteikko. Työssä selvitettiin, mikä näistä kolmesta kosteikkotyypistä sopisi ominaisuuksiltaan parhaiten harmaiden vesien puhdistukseen.

Puhdistusmenetelmät kosteikoissa ovat yhdistelmä erilaisia biologisia, kemiallisia ja fysikaalisia puhdistusprosesseja. Rakennettujen kosteikoiden erot puhdistustuloksissa olivat melko vähäisiä, mutta vertikaalinen pohjavirtauskosteikko vaikuttaisi vastaavan parhaiten harmaan veden puhdistuksen tarpeisiin. Kosteikolla puhdistettua harmaata vettä voitaisiin käyttää viljelmien kastelussa ja vessanpöntön huuhtelussa.

Kosteikkoa suunniteltaessa ja rakentaessa tulee puhdistettavan veden määrän, haitta-aineiden pitoisuuksien ja vaadittavan puhdistustuloksen lisäksi ottaa huomioon ympäristöolosuhteita, kuten paikallinen ilmasto ja ekologia. Kosteikoiden käyttö harmaan veden puhdistukseen ja kierrätykseen vaatii myös ratkaisuja harmaan veden erilliskeräykseen, sekä vesien siirtoon puhdistamolle ja uudelleenkäytettäväksi.

Avainsanat: harmaa vesi, horisontaalinen pohjavirtauskosteikko, rakennettu kosteikko, pintavirtauskosteikko, vedenpuhdistus, vertikaalinen pohjavirtauskosteikko.

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO	1
2. RAKENNETUT KOSTEIKOT	2
2.1 Rakennettujen kosteikoiden ominaisuudet	2
2.2 Pintavirtauskosteikko	4
2.3 Pohjavirtauskosteikko	5
3. HARMAAN VEDEN PUHDISTUS RAKENNETUISSA KOSTEIKOISSA.....	8
3.1 Harmaan veden ominaisuudet	8
3.2 Puhdistusprosessit kosteikoissa.....	10
3.3 Kosteikoiden sopivuus harmaan veden puhdistukseen	11
4. PUHDISTETUN VEDEN KÄYTTÖ	13
4.1 Yleistä käyttömahdollisuuksista.....	13
4.2 Kastelu.....	14
4.3 Vessan huuhtelu	14
5. KOSTEIKOIDEN RAKENTAMINEN	16
5.1 Kosteikon suunnittelu	16
5.2 Mitoitus esimerkki	17
6. JOHTOPÄÄTÖKSET	20
LÄHTEET	21

1. JOHDANTO

Maailmanlaajuisesti puhtaan veden saatavuuden haasteet ovat lisääntyneet. Syitä tälle ovat esimerkiksi kaupungistuminen (Friedler 2004), populaation määrän kasvu ja ilmaston epävakaus (Kobayashi et al. 2020). Nämä syyt ovat johtaneet vesipulaan myös maissa, joissa ei perinteisesti ole ollut ongelmia puhtaan juomaveden kanssa. Tämän vuoksi veden hankkimiseen ja käsittelyyn pyritään kehittämään uusia ratkaisuja. Hyödyt saavutetaan tehokkaimmin silloin, kun samalla kannustetaan vettä säästäviin toimenpiteisiin ja kierrätetään vettä vaihtoehtoisena ratkaisuna (Friedler 2004).

Vedenkäsittelyn ikääntyvä infrastruktuuri antaa valtioille ja kaupungeille mahdollisuuden päivittää talous- ja jäteveden käsittelysystemejä sekä veden kuljetuksen ja siirron ratkaisuja. Yksi vaihtoehto on hajautettu eli lähellä jäteveden syntypaikkaa tapahtuva erilliskerättyjen jätevesien käsittely. Erilliskeräyksessä jätevedet kerätään syntypaikasta riippuen erilleen. Harmaa vesi on erilliskerättyä jätevettä, joka voi koostua kaikesta muusta kuin vessanpöntöstä tulevasta vedestä. (Kobayashi et al. 2020)

Työssä selvitettiin kirjallisuuskatsauksena kuinka erilaiset kosteikkotyypit soveltuvat harmaiden vesien puhdistukseen. Rakennetut kosteikot ottavat mallia luonnon omista vedenpuhdistamoista eli kosteikoista. Kosteikoita voidaan rakentaa monia eri käyttötarkoituksia ajatellen, esimerkiksi villieläinten elinympäristöksi tai tulvien ennaltaehkäisyyn (Kandasamy & Vigneswaran 2008). Kun tässä työssä puhutaan rakennetuista kosteikoista, tarkoitetaan nimenomaan jäteveden puhdistukseen tarkoitettuja rakennettuja kosteikoita.

Tässä työssä keskitytään erilaisten rakenteiden vaikutus puhdistustulokseen. Työstä on siis rajattu pois eri kasvien tai erilaisten materiaalien vaikutus toimintaan. Harmaiden jätevesien laatua käsitellään hyvin yleisellä tasolla, sillä yksityiskohtaisempi tarkastelu vaatisi paljon enemmän tutkimustyötä.

Työn toisessa luvussa käsitellään eri kosteikkotyyppisiä ja niiden ominaispiirteitä. Kolmannessa luvussa käydään läpi lyhyesti harmaan veden ominaisuuksia, jotta voidaan perehtyä tarkemmin eri kosteikkotyyppien sopivuuteen harmaiden vesien puhdistuksessa. Neljännessä luvussa tutustutaan puhdistetun harmaan veden käyttötarkoituksiin ja viidennessä käsitellään mitä eri asioita tulee huomioida kosteikon rakentamisessa. Kuudennessa luvussa tulokset kootaan yhteen johtopäätöksiksi.

2. RAKENNETUT KOSTEIKOT

Rakennettu kosteikko (*constructed wetland*) on systeemi, joka on suunniteltu ja rakennettu mallintamaan luonnon kosteikoiden prosesseja veden käsittelyyn ja puhdistamiseen. Näitä kosteikoita voidaan kutsua myös ihmisten tekemiksi, teknillisiksi tai keinotekoisiksi kosteikoiksi. (Vymazal 2010) Rakennetuissa kosteikoissa voidaan kontrolloida vedenkäsittelyn tulosta paremmin kuin luonnon kosteikoissa. Rakentaessa voidaan optimoida maaperää, kasvillisuutta, mikrobeja ja virtausta eli tärkeimpiä kosteikon ominaisuuksia puhdistustarpeelle sopivaksi. (Kadlec et al. 2000; Vymazal & Kröpfelová 2008) Seuraavissa luvuissa käsitellään yleisesti rakennettujen kosteikoiden ominaisuuksia ja sen jälkeen erityyppisiä kosteikoita.

2.1 Rakennettujen kosteikoiden ominaisuudet

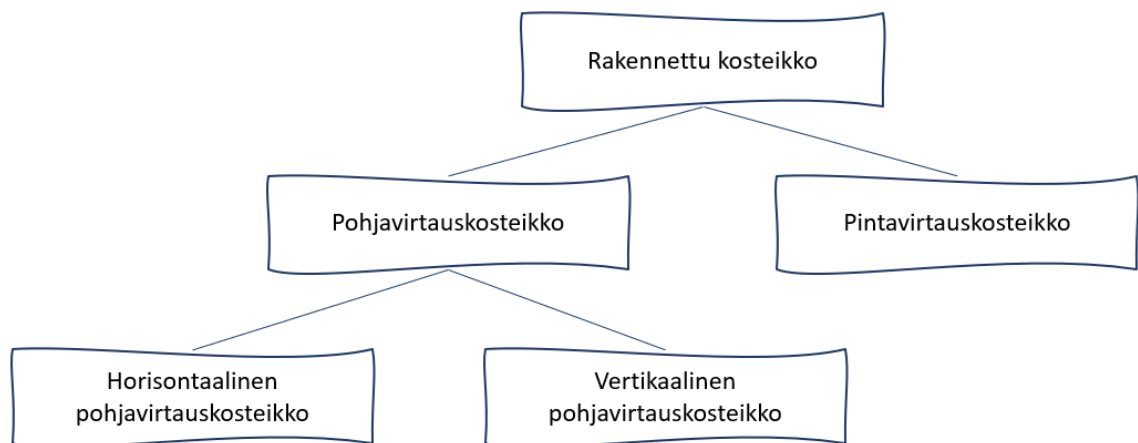
Kosteikko tarjoaa edullisen ja tehokkaan puhdistusratkaisun. Ne ovat monikäyttöisiä, suhteellisen matalia sekä pidättävät vettä, ravinteita, orgaanista ainesta ja haitta-aineita. Kosteikossa erilaisia puhdistusprosesseja voi tapahtua yhtäaikaaisesti, osittain limittäin ja jotkut voivat myös olla toisistaan riippuvia. Nämä erilaiset puhdistusprosessit ja -mekanismit tapahtuvat ikään kuin samassa altaassa, mikä on poikkeuksellista verrattuna perinteisiin vedenpuhdistamoihin. (Kadlec et al. 2000; Kandasamy & Vigneswaran 2008) Tässä työssä kosteikon materiaaliksi oletetaan sora ja hiekka, mutta materiaaleina voidaan käyttää myös erilaisia kierrätysmateriaaleja, kuten rakennusjätettä (Li et al. 2023).

Rakennetuilla kosteikoilla on alhainen energian tarve, sillä suurin osa kosteikon materiaaleista saa energiansa suoraan auringosta. Näin ollen kosteikoissa voidaan saavuttaa korkea jäteveden puhdistustaso vähäisellä ylläpidolla. Ne kestävät vedenlaadun ja -määrän vaihtelua, mikä on jätevettä puhdistettaessa välttämätön ominaisuus. Kosteikon puhdistustulos yleensä jopa paranee ikääntyessä, joten käyttöikään vaikuttaa vain rakenteiden kestävyys. Vedenpuhdistuksen lisäksi kosteikot parantavat ilmanlaatua, tarjoavat tilaa eläinten elinympäristöksi, sekä ihmisille mahdollisuuksia virkistys- ja opetuskäyttöön. (Kandasamy & Vigneswaran 2008)

Kosteikoiden käyttöä rajoittaa eniten niiden suuri tilantarve. Kosteikko myös vaatii aikaa ennen kuin se alkaa toimia kunnolla, jotta mikrobiyhteisö on tarpeeksi kehittynyt. Myös kasvillisuuden kasvamiseen menee oma aikansa. Haasteena on myös se, että puhdistusprosesseja ei täysin saa optimoitua olosuhteisiin sopivaksi, sillä kaikkia

puhdistustulokseen vaikuttavia ominaisuuksia ei kosteikoista vielä täysin tunneta. Puhdistustulosta voi heikentää myös kosteikon ympäristön omat haitta-ainepitoisuudet. Kosteikot sijaitsevat yleensä ulkona, joten ne altistuvat sään vaihteluille, kuten myrskyille, tuulelle ja tulville. Erilaiset hyönteiset ja tuholaiset saattavat myös käyttää kosteikkoa lisääntymiseen. Lisäksi käyttöönottoa voi rajoittaa maantieteellisesti paikoittain jyrkät pinnanmuodot ja korkea vedenpinnan korkeus. (Kandasamy & Vigneswaran 2008)

Rakennetut kosteikot voidaan perinteisesti jakaa virtausominaisuuksien perusteella kahteen eri tyyppiin: pintavirtauskosteikot (*surface flow* tai *free water surface*) ja pohjavirtauskosteikot (*sub-surface flow*). Pohjavirtauskosteikot jaetaan vielä kahteen eri tyyppiin virtaussuunnan mukaan. (Dotro et al. 2017) Jako on nähtävillä kuvassa 1.



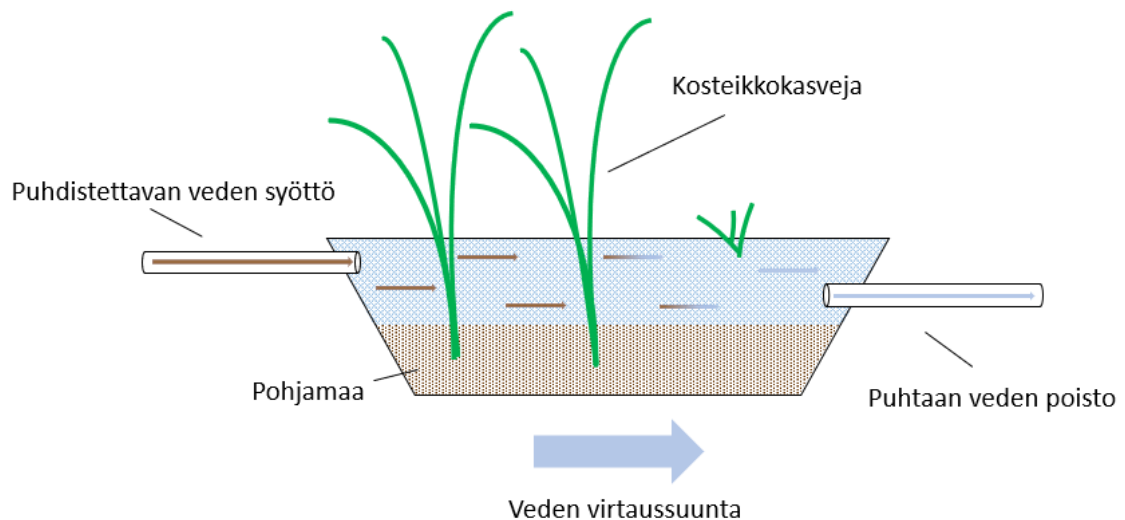
Kuva 1: Rakennettujen kosteikoiden luokittelu

Ulkomuodon ja toiminnan lisäksi erityyppiset kosteikot eroavat myös puhdistusmekanismeiltaan. Jos yksittäinen kosteikko ei tuota haluttua lopputulosta, voidaan erilaisia kosteikoita hyödyntämällä rakentaa hybridejä. Silloin saadaan yhdistettyä eri kosteikoiden parhaat ominaisuudet ja voidaan saavuttaa laadukkaampi lopputulos. (Vymazal 2010)

Näiden perinteisten kosteikotyyppien lisäksi tutkimuksen kohteena on muita, uudenlaisia kosteikotyypppejä, jotka veisivät vähemmän tilaa. Esimerkkinä tällaisesta on viherseinien tyyppiset kosteikot (da Cunha et al. 2018). Tässä työssä keskitytään kuitenkin vain pintavirtauskosteikkoon sekä horisontaaliseen- ja vertikaaliseen pohjavirtauskosteikkoon.

2.2 Pintavirtauskosteikko

Pintavirtauskosteikko, kuvassa 2, muistuttaa ulkoisesti ja hydrologisilta järjestelmiltään luonnon kosteikoita, kuten soita. Niiden syvyys on muutamasta sentistä metriin. Vesi virtaa sedimentin, maatuneen materiaalin ja lietteen yläpuolella, eli kosteikon pinnalla. Kosteikko ei ole tällä hetkellä käytössä ainoana puhdistusmuotona, mutta sitä hyödynnetään sekundäärisenä tai tertiäärisenä vaiheena puhdistuksessa. (Kadlec et al. 2000; Dotro et al. 2017)



Kuva 2: Pintavirtauskosteikko

Pintavirtauskosteikot voidaan jakaa edelleen kosteikossa kasvavien kasvien kasvutavan perusteella. Kasvit voivat kasvaa esimerkiksi kosteikon veden pinnalla, tai maaperästä ylöspäin koko kosteikon läpi. (Vymazal 2010; Dotro et al. 2017) Kasveissa oleellisinta ei ole laji, vaan kasvin elinvoimaisuus kosteikossa. Yleensä suositaan kasveja, joita esiintyy paikallisissa luonnon kosteikoissa, sillä ne ovat jo sopeutuneet ilmastoon, maaperään, ympäröiviin kasveihin ja eläimiin. Kuitenkaan mitkä tahansa kosteikkokasvit eivät käy vedenpuhdistukseen, sillä puhdistustarkoituksessa kasvien tulee kestää jatkuvaa tulvimista sekä korkeita ja vaihtuvia pitoisuuksia epäpuhtauksia. (Kadlec et al. 2000)

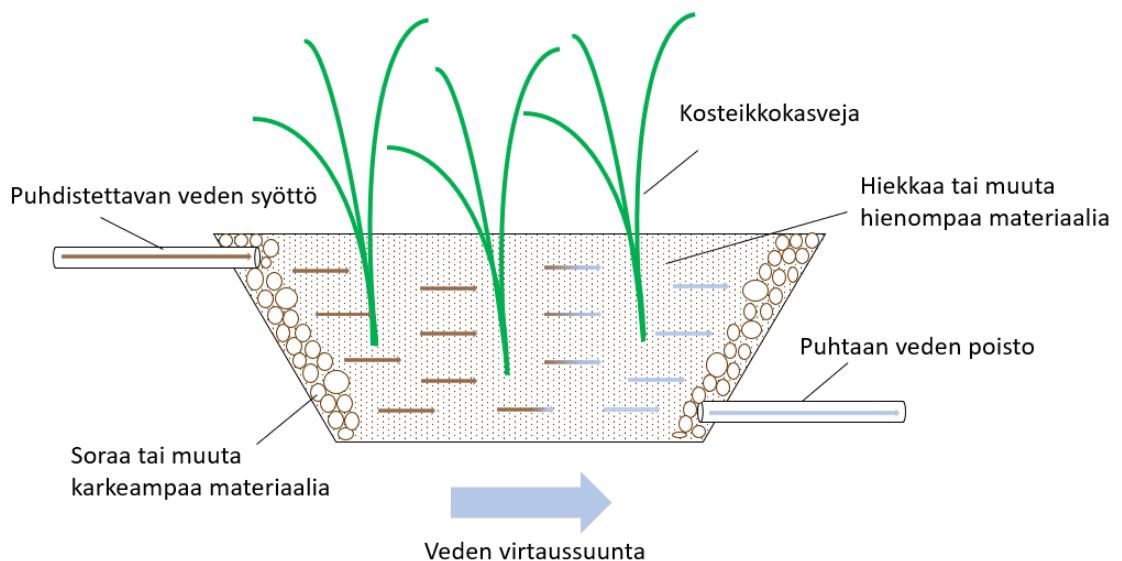
Pintavirtauskosteikot vaativat hyvin laajan pinta-alan. Tämä on yksi kosteikon haittapuoli. Tämä on monesti yksi kosteikon haittapuoli. (Kadlec et al. 2000; Dotro et al. 2017) Toinen haittapuoli on avoimuus ihmisen toiminnan vaikutuksille. Etuina pintavirtauskosteikoilla on, että investointi- ja käyttökustannukset ovat alhaiset ja rakentaminen, käyttö, sekä huolto suoraviivaista. (Kadlec et al. 2000)

2.3 Pohjavirtauskosteikko

Pohjavirtauskosteikot jaetaan vielä kahteen puhdistettavan veden virtaussuunnan mukaisesti. Horisontaalisessa (*horizontal flow*), kuvassa 3, kosteikossa vesi virtaa vaakasuoraan ja vertikaalisessa, kuvassa 4, (*vertical flow*) pystysuoraan. (Dotro et al. 2017) Kosteikossa jätevesi virtaa suhteellisen läpäisevän maan tai vastaavan substraatin läpi (Kandasamy & Vigneswaran 2008).

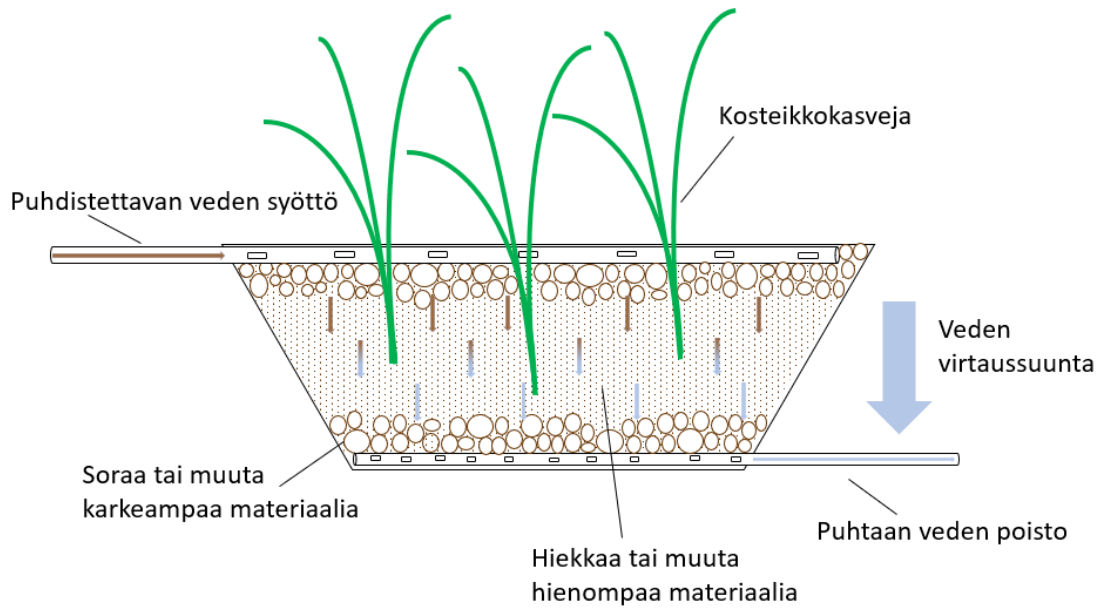
Yhteistä molemmille kosteikoille on perusrakenne. Kosteikko koostuu tasaisesta pedistä, jossa on porrastetusti soraa, hiekkaa ja siinä kasvavia kasveja. Koko kosteikkopeti on eristetty ympäröivästä maasta muovilla ja suodatinkankailla. Puhdistettava vesi syötetään kosteikkoon yleensä muovisten putkien avulla. (Vymazal & Kröpfelová 2008)

Kasvien rooli kosteikon toiminnassa jakaa mielipiteitä. Dotro et al. (2017) mukaan kasvien merkitys itse puhdistustulokseen on pieni, mutta kosteikon toimimiseen suuri. Kasvien tärkein tehtävä on fyysikaalinen, sillä ne jakavat veden virtausta, tarjoavat mikrobien kasville lisää pinta-alaa ja parantavat kosteikon suodatuskykyä. Lisäksi ne estävät eroosiota. Kasvit myös tuottavat kosteikkoon pienen määrän happea ja orgaanista hiiltä. Kylmissä ilmastoissa kasvit voivat antaa kosteikolle myös lisäeristystä. (Dotro et al. 2017)



Kuva 3: Horisontaalinen pohjavirtauskosteikko

Horisontaalisessa pohjavirtauskosteikossa puhdistettava vesi syötetään kosteikkoon toisesta reunasta ja vesi virtaa suurin piirtein vaakasuorassa kosteikkopedin huokosten läpi. Vesi puhdistuu, kun se kulkeutuu aerobisten, anaerobisten ja anoksisten alueiden läpi. Toisessa päässä vesi kerätään ja poistetaan kosteikosta. (Kadlec et al. 2000; Dotro et al. 2017) Tarkemmin puhdistusmenetelmiä käsitellään luvussa kolme.



Kuva 4: Vertikaalinen pohjavirtauskosteikko

Vertikaaliseen pohjavirtauskosteikkoon sen sijaan syötetään jaksottain suuri määrä vettä, joka puhdistuu kulkiessaan pystysuorasti huokosten läpi ennen veden keräämistä pois. Kosteikko tyhjennetään keräämisvaiheessa vedestä kokonaan, jotta kosteikko ilmaantuu ja kosteikkoon syntyy aerobiset olosuhteet. (Vymazal & Kröpfelová 2008) Kosteikko voidaan tyhjentää kokonaan myös, jos jäätyminen on uhkana. Tämä on suurin ero pohjavirtauskosteikoiden välillä, sillä horisontaaliseen kosteikkoon tulee happea vain joko tarkoituksella ilmaamalla se, jäteveden mukana tai kasvien juuriston kautta. (Dotro et al. 2017)

Vertikaaliset pohjavirtauskosteikot voidaan jaotella vielä kolmeen sen mukaan, mihin suuntaan vesi kulkee. Ylhäältä syötettäessä vesi virtaa hitaasti suodatinpedissä alaspäin ja puhdistettu vesi kerätään alta pois. Vaihtoehtoisesti vesi voidaan syöttää kosteikkoon myös pohjasta, jolloin se suodattuu ylös noustessaan ja kerätään pinnalta. Myös vuorottainen veden kulku on mahdollista. (Vymazal & Kröpfelová 2008; Vymazal 2010)

Pohjavirtauskosteikoiden ylläpidossa tärkeintä on varmistaa, etteivät kosteikon huokokset tukkeudu ja täyty kiintoaineella jäteveden sijaan. Tämä vähentää jäteveden biologiseen puhdistukseen tarvittavia kontakteja ja suodatinmateriaalin läpi kulkemiseen menevää aikaa, jolloin myös fyysikaalisen suodatuksen tulos heikentyy. Tukkeutumista pyritään estämään puhdistettavan veden esikäsitteilyllä ja kosteikon suunnittelulla. Kosteikon päädyt voidaan esimerkiksi rakentaa karkeammasta sorasta, kuin mitä kosteikon keskellä käytetään. Jos kosteikko kuitenkin tukkeutuu, on sen kunnostus haastavaa. Kaikki suodatinmateriaali tulee nostaa ylös ja joko vaihtaa uudeksi tai pestä kokonaan. (Dotro et al. 2017)

Vertikaalisen kosteikon käyttö- ja ylläpitokustannukset ovat yleensä korkeammat kuin horisontaalisella, sillä vertikaalisessa kosteikossa vesi syötetään kosteikkoon pumppaamalla (Vymazal 2010). Mikäli olosuhteet sen sallivat, voidaan käyttää myös lappoa (Dotro et al. 2017). Pohjavirtauskosteikoita voidaan käyttää yhteiskunta- ja teollisuusjätevesien käsittelyyn (Kadlec et al. 2000) ja niitä onkin käytössä sekundäärisessä ja tertiäärisissä käsittelyissä (Dotro et al. 2017). Koska harmaan veden puhdistus on lähempänä sekundääristä kuin tertiääristä käsittelyä, voisi pohjavirtauskosteikot siis olla sopiva vaihtoehto puhdistukseen.

3. HARMAAN VEDEN PUHDISTUS RAKENNETUISSA KOSTEIKOISSA

Harmaassa vedessä on vähemmän epäpuhtauksia kuin varsinaisessa jätevedessä, joten erityisesti sen uudelleenkäytöstä ollaan kiinnostuneita veden riittävyyden parantamiseksi. Harmaata vettä muodostuu teollisuusmaiden sisätiloissa paljon, noin 60-70 % käytetystä vedestä poistuu kotitalouksista harmaana vetenä. (Eriksson et al. 2002; Friedler 2004). Vaikka harmaa vesi on patogeenien ja orgaanisten aineiden pitoisuuksien osalta puhtaampaa kuin jätevesi, voi se silti olla hyvin saastunutta. Tästä johtuen myös harmaa vesi tulee puhdistaa, muuten uudelleenkäyttö voi olla riski ihmisen terveydelle tai ympäristölle. (Friedler 2004; Etchepare & van der Hoek 2015) Tässä luvussa käsitellään harmaan veden ominaisuuksia, kosteikoiden puhdistusominaisuuksia ja kuinka ne kohtaavat.

3.1 Harmaan veden ominaisuudet

Harmaan veden laatu ja määrä vaihtelevat ajasta ja paikasta riippuen. Laatuun vaikuttavia tekijöitä ovat muun muassa käyttöveden alkuperäinen laatu, putkistojen kunto ja kotitalouden käyttötottumukset. Epäpuhtaudet tulevat veteen eri lähteistä ja niiden määrään vaikuttavat elämäntyyli ja -tavat, laitteet ja niiden asennukset, kotitalouden kemikaalien käyttö sekä paikallinen lainsäädäntö. (Eriksson et al. 2002; Meininger & Oldenburg 2009; Maimon et al. 2014; Etchepare & van der Hoek 2015) Taulukossa 1 on lueteltu eri lähteiden mukaisia harmaan veden ominaisuuksia.

Taulukko 1. *Harmaan veden ominaisuudet*

Ominaisuus	Eriksson et al. 2002	Hernández et al. 2011	Noutsopoulos et al. 2018
Lämpötila C	18-38		
SS (mg/l)	17-330		
TS (mg/l)	113-2410		325-2535
TSS (mg/l)			11-319
COD (mg/l)	13-8000	414-1082	390-2072
BOD (mg/l)	5-1460		185-1363
N _{tot} (mg/l)	0,6-80	3,66-87,5	<0,5-6,5
NH ₄ -N (mg/l)	0,002-25	0,25-7,32	0,11-1,4
P _{tot} (mg/l)	0,062-74	2,3-34,5	0,10-187

Kiintoainesta tulee veteen kaikista harmaan veden lähteistä. Kiintoaineen määrä vaikuttaa harmaan veden fysikaalisiin ominaisuuksiin, kuten väriin, sameuteen ja hajuun. Lisäksi monet harmaaseen veteen päätyvät synteettiset aineet nostavat veden pH-arvoa. Harmaan veden lämpötila on korkea, koska ihmiset käyttävät oman hygieniansa hoitoon paljon lämmintä vettä. (Eriksson et al. 2002)

Orgaanisen hiilen pitoisuus harmaassa vedessä vaihtelee suuresti, kuten voidaan nähdä taulukosta 1. Kemiallista ja biologista hapenkulutusta nostavat eniten pesuaineet ja muut kodin kemikaalit, joten arvot voivat olla lähteestä riippuen yhtä suuret kuin jätevedessä. (Eriksson et al. 2002; Noutsopoulos et al. 2018) Suuret määrät erilaisia kemikaaleja henkilökohtaisen hygienian ja kodinhoitoon tarkoitetuista tuotteista näkyvät harmaassa vedessä suurena tensidien ja xenobioottisten orgaanisten yhdisteiden (XOC) määränä. Erilaisia XOC – yhdisteitä on tunnistettu yli 900 kappaletta, joista osa on myös myrkyllisiä ympäristölle. Vaikka itse kemikaali ei olisi kovin haitallinen, voi haittaa aiheuttaa eri kemikaalien reagoiminen keskenään tai kemikaalin hajoamistuotteet. (Eriksson et al. 2002; Hernández et al. 2011)

Kotitalouksissa suurin typen lähde on virtsan mukana tuleva ammoniumtyppi, joten harmaassa vedessä typpeä on vain 3 % jätevedessä olevasta typen määrästä. Myös fosforin määrä on harmaassa vedessä selkeästi pienempi kuin jätevedessä. Suurin fosforin lähde kotitalouksissa on tiskikoneiden pesuaineet. Aiemmin fosfaattipitoisten pesuaineiden kieltäminen vähensi fosforin määrää, kun siirryttiin käyttämään orgaanisia fosforiaineita. (Eriksson et al. 2002) Nykyään tiskikoneiden määrä on kuitenkin lisääntynyt, joten myös kokonaisfosforin pitoisuudet ovat lähteneet nousuun (Meinzinger & Oldenburg 2009).

Patogeeniset virukset, bakteerit, alkueläimet ja suolistomadot leviävät ihmisen eritteiden välityksellä. Harmaan veden joukkoon näitä eritteitä voi päätyä käsienpesusta, vauvojen ja pienten lasten pesusta vaipanvaihdon yhteydessä, sekä vaippojen tai likaisten vaatteiden pesusta. Myös keittiöstä voi päätyä harmaan veden joukkoon haitallisia patogeeneja raa'an lihan ja kasvien mukana. (Eriksson et al. 2002; Meinzinger & Oldenburg 2009) Harmaiden vesien korkeat lämpötilat parantavat mikrobien kasvu ympäristöä ja voivat kylläisissä vesissä lisätä saostumista (Noutsopoulos et al. 2018).

Raskasmetalleja on yleensä vähäisesti harmaissa vesissä. Isommat pitoisuudet voivat johtua putkistosta (Meinzinger & Oldenburg 2009) tai niitä voi tulla harmaaseen veteen astian- ja pyykinpesukoneen kautta (Noutsopoulos et al. 2018).

3.2 Puhdistusprosessit kosteikoissa

Kosteikoiden puhdistusprosessit ovat monimuotoinen yhdistelmä mikro-organismeja ja erilaisia kemikaalisia, fysikaalisia ja biologisia prosesseja. Fysikaaliset ja kemialliset puhdistusprosessit ovat sekä horisontaalisissa, että vertikaalisissa pohjavirtauskosteikossa samanlaisia. Pohjavirtauskosteikoiden puhdistuksen erot johtuvat biologisista prosesseista, sillä kosteikkotyypistä riippuen olosuhteet ovat joko anaerobiset tai aerobiset. (Dotro et al. 2017)

Kiintoaineet ja partikkelimaiset orgaaniset aineet poistetaan vedestä kosteikossa fysikaalisen suodatuksen tai sedimentaation avulla (Kandasamy & Vigneswaran 2008; Dotro et al. 2017). Kandasamy & Vigneswaran (2008) mukaan tärkein fysikaalinen poistoprosessi kiintoaineelle on sedimentaatio ja sen jälkeen tapahtuvat laskeutuminen, kerrostuminen, suodatus ja flokkulaatio. Suodatuksen tehoon vaikuttaa suodatinmateriaalin eli kosteikon maa-aineksen koko ja suodatusaika, mutta suodatus ei välttämättä aina onnistu esimerkiksi tukkeutumisen vuoksi. (Kandasamy & Vigneswaran 2008; Dotro et al. 2017).

Liunneen orgaanisen ja suspendoituneen kiintoaineksen puhdistustulos on kosteikoissa hyvä. Kosteikosta riippuen poisto tapahtuu joko aerobisella tai anoksisella ja anaerobisella mikrobien hajotuksella. (Vymazal 2010) Kandasamy & Vigneswaran (2008) mukaan tärkein biokemiallinen väylä on orgaanisen hiilen fotosynteesi ja sen jälkeinen respiraatio, sillä orgaanisen aineksen hyödyntämisen lisäksi se myös tuottaa happea.

Kosteikoissa typen käsittelyssä hyödynnetään luonnon omaan typen kiertokulkuun kuuluvia typen muunnoksia, tosin vain osa prosesseista on hyödyllisiä veden puhdistuksen kannalta (Vymazal & Kröpfelová 2008; Dotro et al. 2017). Nitrifikaatiota ja ammonifikaatiota tapahtuu, mutta ne eivät varsinaisesti poista typpeä, vaan muuttavat sitä eri muotoon. Paras lopputulos saadaan, kun aerobista nitrifikaatiota seuraa anaerobinen denitrifikaatio. (Kandasamy & Vigneswaran 2008) (Vymazal & Kröpfelová 2008)

Fosforin pääasiallinen poistumisreitti on adsorptio. Kapasiteetti siihen on rajallinen ja vaikea määrittää. Fosforia ja myös typpeä on mahdollista jonkin verran poistaa myös sorptiolla ja saostuksella. Jos fosforinpoisto on puhdistuksen tärkein tavoite, ei kosteikkoa kuitenkaan suositella pääasialliseksi puhdistustavaksi. (Brix & Arias 2005; Kandasamy & Vigneswaran 2008; Vymazal & Kröpfelová 2008)

Kosteikot ovat hyviä biosuodattimia, koska niissä on monia patogeeneja poistavia prosesseja (Vymazal & Kröpfelová 2008). Dotron et al. (2017) mukaan patogeeneit

poistetaan pääasiassa suodatuksen avulla. Kuitenkin poisto on mahdollista myös antamalla patogeenein kuolla luonnollisesti ajan kuluessa tai poistaa ne jollain toisella mikrobilla, sedimentaatiolla, pinta-adheesiolla tai käsittelemällä UV-säteilyllä (Kandasamy & Vigneswaran 2008; Dotro et al. 2017)

Raskasmetallien poisto on pääasiassa fysikaalista tai kemiallista. Kosteikossa ne voivat sitoutua sedimenttiin, saostua suolana tai poistua kasvien, bakteerien tai levien käsittelyn myötä. Saostusta tapahtuu erityisesti vanhemmissa kosteikoissa. (Kandasamy & Vigneswaran 2008)

3.3 Kosteikoiden sopivuus harmaan veden puhdistukseen

Koska harmaan veden laatu vaihtelee paljon, käsittelymenetelmän tulee olla spesifioitu. Menetelmän tulee myös soveltua käsiteltävien vesien määrän ja pitoisuuksien suuriin vaihteluihin. Eri lähteistä tulevat harmaat vedet voivat olla sopivia erilaisiin käyttötarkoituksiin erilaisten haitta-aineiden vuoksi (Noutsopoulos et al. 2018). Maimonin et al. (2014) tutkimuksen mukaan kolme tärkeintä käsittelyn jälkeiseen veden laatuun vaikuttavaa seikkaa ovat käsittelyn tapa, käsittelysystemin suunnittelijan taidot ja keittiön jätevesien mukanaolo. Esikäsittelyllä on myös merkitystä lopputulokseen (Vymazal & Kröpfelová 2008).

Suomen lainsäädännön vedenpuhdistusvaatimusten mukaan suomalaisten tuottamista harmaista vesistä ei tarvitse puhdistaa muuta kuin orgaaninen aines, eikä ollenkaan typpejä tai fosforia. Siinä kuitenkin oletetaan, että puhdistettu vesi ollaan laskemassa luontoon, eikä oteta jatkokäyttöön. (Vesi n.d.)

Kirjallisuuskatsauksessa ei tullut ilmi, että patogeenein tai partikkelimaisten ainesten osalta kosteikkotyypillä olisi merkitystä puhdistustulokseen. Raskasmetallien poistoon pintavirtauskosteikot ovat parempia kuin pohjavirtauskosteikot (Vymazal & Kröpfelová 2008). Yleisesti ottaen pinta-alayksikköä kohden pohjavirtauskosteikot kuitenkin tuottavat paremman lopputuloksen kuin pintavirtauskosteikot (Kandasamy & Vigneswaran 2008).

Orgaanisen ja suspendoituneen kiintoaineen poistossa tehokkain on vertikaalinen pohjavirtauskosteikko aerobisten olosuhteiden takia. Normaaleissa olosuhteissa kokonaistypen poisto on kaikissa matala. Nitrifikaatio on pientä horisontaalisissa, kun taas vertikaalisissa korkea. Denitrifikaatio sen sijaan on korkeampaa horisontaalisissa, etenkin jos mukana on tarpeeksi typpeä ja orgaanista hiiltä, kun taas vertikaalisissa ja pintavirtauskosteikossa matalaa tai olematonta. Paras lopputulos typenpoiston kannalta saataisiin, jos muodostetaan hybridi, jossa on ensin vertikaalinen ja sitten

horisontaalinen pohjavirtauskosteikko. (Vymazal & Kröpfelová 2008; Vymazal 2010; Dotro et al. 2017) Typenpoistoa voidaan myös parantaa kierrättämällä kosteikosta poistunutta vettä uudestaan kosteikkoon (Brix & Arias 2005).

4. PUHDISTETUN VEDEN KÄYTTÖ

Harmaan veden kierrätyksen yleistymistä hidastavat puuttuva tekniikka ja käyttäjien negatiiviset asenteet. Vettä käytetään mieluiten, jos sen ulkoiset laadulliset ominaisuudet eli haju ja maku, muistuttavat puhdasta vesijohtovettä. Jo pieni poikkeama näissä ominaisuuksissa heikentää halukkuutta kierrätetyn veden käyttöön, vaikka kierrättäminen olisi taloudellisesti edullisempi ratkaisu. (Amaris et al. 2020) Ennakkoluuloihin vaikuttavat myös erilaiset hengelliset, kulttuurilliset ja sosioekonomiset tekijät eri puolilla maailmaa (Lambert & Lee 2018; Amaris et al. 2020).

Kierrätettävän veden tulisi täyttää neljä vaatimusta: hygieeninen turvallisuus, esteettisyys, ympäristön kestävyys sekä tekninen ja taloudellinen toteutettavuus. Kuitenkaan monessa maassa ei ole ohjeita tai säädöksiä veden uudelleenkäyttöä varten tai ne vaativat päivitystä. (Al-Jayyousi 2003) Tässä luvussa perehdytään erilaisiin kierrätetyn harmaan veden käyttötarkoituksiin ja niiden vaatimuksiin käytetyltä vedeltä.

4.1 Yleistä käyttömahdollisuuksista

Kierrätettyä harmaata vettä on eniten ehdotettu ja tutkittu muuhun kuin juomavesikäyttöön. Harmaata vettä on käytetty pohjaveden määrän lisäämiseksi, maisemointiin ja kasvien kasteluun. (Etchepare & van der Hoek 2015) Kobayashin et al. (2020) tutkimuksessa harmaata vettä käytettiin uudestaan vessan huuhteluun, pyykkämiseen ja puutarhan kasteluun. Friedlerin (2004) ja Radingoanan (2020) mukaan harmaan veden toteuttamiskelpoisimmat kierrätysideat ovat vessanpöntön huuhteleminen ja kastelu. Näistä poikkeuksena Lakho et al. (2020) tutki siirrettävän rakennetun kosteikon käyttämistä väliaikaisten tapahtumien harmaan veden käsittelyssä, jolloin jälkikäsitteilyn jälkeen kierrätetty vesi oli juomakelpoista. Kobayashin et al. (2020) tutkimuksessa kosteikolla puhdistettua harmaata vettä käytettiin vain puutarhan kasteluun, sillä vesi ei täyttänyt puhtausvaatimuksia sopiakseen muihin käyttötarkoitukseen.

Ongelmia harmaan veden uudelleenkäytölle tuottavat mahdollisesti syntyvät pitkät seisotusajat varastotankissa, jolloin mikrobien kasvu lisääntyy (Kobayashi et al. 2020). Harmaa vesi kannattaisi siis käsitellä mahdollisimman pian sen muodostumisen jälkeen (Al-Jayyousi 2003). Kehittyneemmät ratkaisut voivat kuluttaa enemmän energiaa, mutta toisaalta silloin voidaan saavuttaa laadukkaampi lopputulos, jolloin puhdistetulla vedellä on enemmän mahdollisia käyttötarkoituksia. Esimerkiksi Kobayashi et al. (2020)

tutkimuksessa käsittelyyn lisättiin MBR-tekniikkaa ja Lakhon et al. (2020) tutkimuksessa jälkikäsittelyvaihe ja saavutettiin näin haluttu lopputulos.

4.2 Kastelu

Kastelukäytössä vesi voi aiheuttaa ihmiselle terveystarpeita, jos altistuminen on pitkäaikaista tai tapahtuu ihokontaktin kautta (Maimon et al. 2014). Mahdollisia ympäristöriskejä ovat maaperän pilaantuminen eri haitta-aineiden vaikutuksista, erityisesti koska kaikkien haitta-aineiden yhteisvaikutuksia ei ole tutkittu tarkkaan. Harmaan veden emäksisyys on haitallista joillekin kasveille ja aiheuttaa silloin ongelmia kasvien kasvussa, esimerkiksi heikentämällä mikroravinteiden saantia maaperästä. (Radingoana et al. 2020) Myös kemikaalit ja suolat, kuten natrium tai boori harmaassa vedessä saattavat aiheuttaa vakavia pitkäaikaisia vahinkoja maaperälle tai kasveille, jolloin niiden esiintyminen estää käytön kastelussa. (Eriksson et al. 2002; Hernández et al. 2011)

Tällä hetkellä erityisesti kuivilla ja köyhillä alueilla harmaata vettä saatetaan käyttää myös käsittelemättömänä kotiviljelmien kastelemiseen. Varsinkaan pitkäaikaista käyttöä ei suositella, mutta jo lyhytaikaisessa käytössä viljelijät ja kuluttajat voivat altistua esimerkiksi koleralle ja lavantaudille. (Radingoana et al. 2020) Rakennetut kosteikot parantaisivat erityisesti näiden seutujen ihmisten asemaa, sillä puhdistetun harmaan veden käyttö kastelussa lisäisi ruuantuotannon varmuutta ja parantaisi näin ihmisten elinolosuhteita.

Kastelemisen lisäksi harmaasta vedestä voi olla kasveille hyötyä parantamalla maaperän hedelmällisyyttä sen sisältämien ravinteiden, kuten typen, fosforin, kaliumin ja orgaanisen aineen vuoksi. Kaikkea näitä ei siis edes kannattaisi puhdistaa vedestä, vaan ennemmin varastoida ravinteet multa. (Al-Jayyousi 2003; Radingoana et al. 2020) Jos ravinteita on vedessä oikeassa suhteessa, voi veden käyttö vähentää tarvetta käyttää kemiallisia lannoitteita (Radingoana et al. 2020).

4.3 Vessan huuhtelu

Suomessa vessanpöntön huuhteluun menee vessanpöntöstä riippuen 2-9 litraa per huuhtelu ja vuodessa noin 20 000 litraa per henkilö (Verto 2019; Remes 2021). Harmaan veden käyttö vessan huuhtelussa voi Friedlerin (2004) mukaan vähentää kotitalouden puhtaan veden kulutusta 40-60 l/hlö/päivä, mikä johtaa 10-20 % vähenemiseen kaupunkimaisessa puhtaan veden kulutuksessa. Tämä on merkittävää erityisesti tilanteissa, joissa vettä on vähäisesti. Vessanpöntön huuhteleminen on

kaikista toteuttamiskelpoisin idea veden kierrättämiseksi kaupunkiympäristössä, sillä puutarhan kastelun määrällinen hyöty on paljon pienempi tiheästi asutulla kaupunkialueilla. (Friedler 2004)

Vessan huuhtelusta syntyy terveysriskejä, jos huuhdellessa vedessä olevat mikrobit päätyvät aerosoliksi ilmaan ja siitä käyttäjään (Eriksson et al. 2002). Aerosolien määrä on suuri erityisesti silloin, jos vessanpöntön kantta ei suljeta, mutta sulkeminen ei estä mikrobien muodostumista aerosoliksi kokonaan (Fennelly et al. 2020). Suositus olisi, että jos halutaan käyttää harmaata vettä vessan huuhteluun, vesi tulisi ennen käyttöä vielä suodattaa ja desinfioida. Vedessä ei tulisi olla ulosteperäisiä koliformisia bakteereja (per 100 ml), jonka lisäksi myös biologista hapenkulutusta ja kloorin määrää tulee tarkkailla. (Al-Jayyousi 2003)

5. KOSTEIKOIDEN RAKENTAMINEN

Kosteikoita on käytössä ympäri maailmaa, eniten lämpimämmillä ilmastoalueilla, mutta ne toimivat myös kylmemmässä. Rakennetut kosteikot sopivat erityisesti hajautettuun harmaan veden puhdistukseen, koska ne ovat ympäristöystävällisiä, luotettavia, sekä helppoja käyttää ja ylläpitää. Kosteikkoa voi hyödyntää pienien yhteisöjen, naapurustojen tai yksittäisten kotitalouksien vedenpuhdistukseen, mutta liian pienessä kosteikossa laadun vaihtelu voi olla suurempaa ja ylläpito vaikeammin kontrolloitavissa. (Vymazal 2011; Kobayashi et al. 2020).

Luvun kolme perusteella paras yksittäinen kosteikkotyyppi harmaiden vesien puhdistukseen olisi vertikaalinen pohjavirtauskosteikko. Vertikaaliset kosteikot ovat myös yleisempiä Euroopassa (Vymazal 2011). Tässä luvussa käsitellään kosteikon suunnittelua, mitoitusta ja rakennusvaatimuksia.

5.1 Kosteikon suunnittelu

Kosteikot suunnitellaan kokemusperäisen tiedon ja mahdollisten kansallisten ohjeiden mukaisesti. Suunnittelussa tulee ottaa huomioon käsittelykosteikon tyyppi, syötettävän veden laatu, haluttu tai vaadittu puhdistustulos, veden määrä, kosteikon koko ja syvyys, kuormitus, ilmasto, ympäristö ja erityisesti veden määrän lisääntyminen tai väheneminen esimerkiksi tulvien ja sateiden vuoksi, ekologia ja alueelliset kasvit. Vertikaalisen pohjavirtauskosteikon suunnittelumalleja ovat peukalosääntö ja kuormitustilastot. (Dotro et al. 2017)

Peukalosääntö on ohjaileva suunnittelun lähestymistapa, joka perustuu tietyn kosteikon toimintaan tietyllä ilmasto- tai maantieteellisellä alueella. Tällä tavalla on käytännöllistä aloittaa suunnittelu, jos vastaavanlainen kosteikko löytyy jo jostain. Ilmasto ja lämpötila vaikuttavat muun muassa kuormituksen määrään ja pinta-ala vaatimuksiin. Peukalosäännön etuna on se, että se on yksinkertainen käyttää. Haittapuolia taas se, että se ei ota huomioon veden laadun vaihtelua tai esikäsittelymenetelmiä. Harmaille vesille ei tiedettävästi myöskään ole omia ohjeita. (Dotro et al. 2017)

Kuormitustilastoissa suunnittelu pohjautuu laajalta kerättyihin tietoihin vedenlaadusta. Suunnittelun lähtökohtana on tulevan veden kuormitus, haluttu puhdistustulos ja riskien sietokyky. Tässä tavassa otetaan huomioon tulevan ja lähtevän veden haitta-aineiden pitoisuudet, sekä tulevan veden määrä. Tapa myös jossakin määrin huomioida taustakonsentraation ja ei-halutut virtaukset kosteikoissa, koska tilastot on luotu

todellisen vedenlaadun perusteella todellisissa systeemeissä. Tämän tavan heikkouksia on se, ettei pystytä ottamaan kunnolla huomioon eri haitta-aineiden yhteisvaikutuksia tai lämpötilakorjauksia. (Dotro et al. 2017)

5.2 Mitoitusesimerkki

Tässä esimerkissä lasketaan vertikaalisen kosteikon vaadittava koko ja suunnittelutiedot pienelle naapurustolle perustuen tanskalaisiin ohjeisiin, sillä Suomessa ei ole omia. Esikäsitteilyä käytetään maan alle kaivettua saostuskaivoa ja jälkikäsitteilyä on klooraus ennen uudelleenkäyttöä. Suunnittelun lähtöarvot ovat taulukossa 2.

Taulukko 2. Suunnittelun lähtöarvot kosteikolle

Ominaisuus	Arvo	Lähde
Naapuruston koko	40 hlö	
Käyttövesi	113 l / d / hlö	Korhonen 2020
Muodostuva harmaa vesi	60–70 % käyttövedestä, valitaan 65 % → 73,45 l / d / hlö	Eriksson et al. 2002
COD jätevedessä	120 g / hlö / d	Dotro et al. 2017
COD harmaassa vedessä	pitoisuus sama kuin jätevedessä	Eriksson et al. 2002
BOD jätevedessä	60 g / hlö / d	Dotro et al. 2017
BOD harmaassa vedessä	60 % jäteveden pitoisuudesta	Eriksson et al. 2002
N _{tot} jätevedessä	11 g / hlö / d	US EPA, lähteestä Groundstone 2019
N _{tot} harmaassa vedessä	3 % jäteveden pitoisuudesta	Eriksson et al. 2002

Kosteikkoon tulevan harmaan veden määrä Q_i , sekä COD, BOD ja typen pitoisuudet lasketaan seuraavasti:

$$Q_i = 40 \text{ hlö} \times 113 \frac{\text{l}}{\text{hlö} \cdot \text{d}} \times 65 \% = 2\,938 \frac{\text{l}}{\text{d}} \approx 2,9 \frac{\text{m}^3}{\text{d}} \quad (1)$$

$$\text{COD} = 120 \frac{\text{g COD}}{\text{hlö} \cdot \text{d}} \div 113 \frac{\text{l}}{\text{hlö} \cdot \text{d}} = 1,0619 \frac{\text{g COD}}{\text{l}} \approx 1\,100 \frac{\text{mg COD}}{\text{l}} \quad (2)$$

$$\text{BOD} = \left(60 \frac{\text{g BOD}}{\text{hlö} \cdot \text{d}} \div 113 \frac{\text{l}}{\text{hlö} \cdot \text{d}} \right) \times 60 \% = 0,318 \frac{\text{g BOD}}{\text{l}} \approx 320 \frac{\text{mg BOD}}{\text{l}} \quad (3)$$

$$N_{\text{tot}} = \left(11 \frac{\text{g } N_{\text{tot}}}{\text{hlö} \cdot \text{d}} \div 113 \frac{\text{l}}{\text{hlö} \cdot \text{d}} \right) \times 3 \% = 0,0029 \frac{\text{g } N_{\text{tot}}}{\text{l}} \approx 2,9 \frac{\text{mg } N_{\text{tot}}}{\text{l}} \quad (4)$$

Esikäsitteilyä käytetään maan alle kaivettua saostuskaivoa. Saostuskaivon tulee olla kaksi- tai kolmekammioinen, vähintään 2 m³ yhdelle viiden hengen taloudelle (Brix & Arias 2005). Saostuskaivon tilavuus V_{SK} on

$$V_{SK} = 2 \frac{m^3}{5 \text{ hlö}} = 16 \frac{m^3}{40 \text{ hlö}}. \quad (5)$$

Saostuskaivon pinta-alan tulee olla henkeä kohden vähintään 0,06 m², jolloin 40 hengelle minimiala on 2,4 m² (Dotro et al. 2017). Valitaan saostuskaivon pinta-alaksi 3,4 m², jolloin syvyys on

$$\text{syvyys} = \frac{16 \text{ m}^3}{3,4 \text{ m}^2} = 4,7 \text{ m}. \quad (6)$$

Käytetään saostuskaivossa kolmea kammiota, jolloin ensimmäisen koko on 50 % yhteistilavuudesta ja toinen ja kolmas ovat molemmat 25 %. Kolmas toimii kosteikon syöttötankkina. Saostuskaivossa poistuu jo 1/3 COD:sta. Saostuskaivon tiedot ovat esillä taulukossa 3. Lasketaan hydraulinen viipymä HRT ensimmäisessä ja toisessa saostuskaivossa: (Dotro et al. 2017)

$$\text{HRT 1. ja 2. saostuskaivossa} = \frac{8m^3+4m^3}{2,9 \text{ m}^3/d} = 4,1 \text{ d}. \quad (7)$$

Taulukko 3. Saostuskaivon ominaisuudet

Ominaisuus	Arvo
Saostuskaivon tilavuus	16 m ³
Saostuskaivon pinta-ala	3,4 m ²
Saostuskaivon syvyys	4,7 m
Saostuskaivon 1. kammio	8 m ³
Saostuskaivon 2. kammio	4 m ³
Saostuskaivon 3. kammio	4 m ³
COD saostuskaivon jälkeen	2/3 * 1 100 = 733 mg/l
HRT ₁₊₂	4,1 d

Kosteikon mitoitustulokset ovat nähtävillä kootusti taulukossa 4. Kosteikon pinta-alan tulee olla 3 m²/hlö (Brix & Arias 2005), eli saadaan kosteikon pinta-alaksi A_{VF} :

$$A_{VF} = 3 \frac{m^2}{hlö} \times 40 \text{ hlö} = 120 \text{ m}^2 \quad (8)$$

Kosteikon typenpoistoa voidaan parantaa kierrättämällä puhdistettavaa vettä puhdistuksessa ja tuomalla nitraattipitoista vettä kontaktiin orgaanisen aineksen kanssa (Brix & Arias 2005; Dotro et al. 2017) Kierrätetään tässä puolet kosteikon poistovedestä kolmanteen saostuskaivoon. Tällöin hydrauliseksi kuormaksi HLR_s saadaan (Dotro et al. 2017):

$$HLR_s = \frac{Q_i}{A} = \frac{2,9 \text{ m}^3/d + 1,45 \text{ m}^3/d}{120 \text{ m}^2} = 0,036 \text{ m}^3 / \text{m}^2 * d = 36 \text{ l} / \text{m}^2 * d. \quad (9)$$

Suodatinmateriaalina kosteikossa käytetään hiekkaa ja syvyys suodatinpedille on 1 m. Suodatinpedin ympärillä tulee olla suojakalvo, joka on suojattu molemmilta puolilta geotekstiilillä. (Brix & Arias 2005). Hiekkaa käytettäessä kosteikon täyttöväli on 6 tuntia (Dotro et al. 2017), jolloin yhden syötön aikana veden virtaus Q_s on

$$Q_s = \frac{Q_i}{24/6} = \frac{2,9 m^3 + 1,45 m^3}{4} = 1,08 m^3. \quad (10)$$

Täytettäessä kosteikkoa vedellä, veden hyvä jakautuminen koko kosteikon alalle tulee varmistaa, jotta hyödynnetään koko suodatuskapasiteetti. Tähän voidaan käyttää 40 mm halkaisijan muoviputkia pyöreillä, vähintään 8 mm suuruisilla rei'illä. Kun käytetään suodatinmateriaalina hiekkaa, tulisi reikiä olla vähintään yksi aina kahdelle neliömetrille. (Dotro et al. 2017) Putkia voidaan suojata jäätymiseltä laittamalla niiden päälle esimerkiksi puuhaketta (Brix & Arias 2005). Jäätymistä ehkäisee myös se, että putket kuivuvat täyttöjen välissä. (Dotro et al. 2017).

Tanskalaisten ohjeiden mukaan ohjeita noudattamalla päästään vaadittuihin puhdistustuloksiin, jolloin kosteikossa olisi 95 % BOD poisto ja 90 % nitrifikaatio. (Brix & Arias 2005) Lakho et al. (2020) tutkimuksessaan harmaan veden käsittelytulokset olivat 90 % COD poisto, 95 % BOD poisto ja 25 % kokonaistypenpoisto. Puhdistustulokset tässä esimerkissä näillä prosenteilla ovat taulukossa 4.

Taulukko 4. *Kosteikon ominaisuudet ja lopulliset puhdistustulokset*

Ominaisuus	Arvo
Kosteikon pinta-ala	120 m ²
HLR _s	36 l/m ² * d
Suodatinpedin syvyys	1 m
Q _i	2,9 m ³ /d
Veden kierrätys kosteikossa	½ * 2,9 = 1,45 m ³ /d
Täyttöväli	6 h
Yhden syötön Q _s	1,08 m ³
COD puhdistetussa vedessä	73,3 mg/l
BOD puhdistetussa vedessä	16 mg/l
N _{tot} puhdistetussa vedessä	2,17 mg/l
Nitrifikaatio	

Suunnittelun ohjeissa on huomioitu talven kylmemmät ilmat. Talvella hitaampi hajotusprosessi rajoittaa kosteikkoon ilman tukkeutumiseriskiä syötettävää orgaanisen aineksen määrää. (Dotro et al. 2017)

6. JOHTOPÄÄTÖKSET

Erilaiset kosteikkotyypit soveltuvat hyvin harmaiden vesien puhdistukseen, sillä niiden puhdistusominaisuudet vastaavat hyvin harmaiden vesien puhtauden haasteisiin. Perinteisistä kosteikkotyypeistä paras on vertikaalinen pohjavirtauskosteikko, mutta hybridit ja muut uudemmat teknologiat voivat olla tehokkaampia ja niitä voi saada parhaiten vastaamaan haluttuun puhdistustarpeeseen.

Kosteikoiden etuja ovat niiden edullisuus, helppokäyttöisyys ja tehokkuus. Kosteikko voidaan suhteellisen helposti toteuttaa paikalla missä sille on tarvetta, jos vain kosteikolle on tilaa. Jos kosteikon toteuttaa kuivemmille alueille, voidaan hyvin vastata ruoantuotannon ongelmiin.

Kosteikon puhdistustulos ei aina pelkästään riitä uudelleenkäyttöön, mutta esi- ja jälkikäsitteilyn myötä puhdistustulosta voidaan saada parannettua käyttötarpeisiin soveltuvaksi. Sopivimmat käyttötarkoitukset ovat kasteleminen ja vessanpöntön huuhtelu. Tällä hetkellä erityisesti kastelussa voi olla käytössä puhdistamatonta harmaata vettä, koska vesi ei muuten riitä. Tällaisissa paikoissa kosteikoista voisi olla paljon apua. Likaisen veden tuottamat ongelmat näkyvät erityisesti muutenkin heikommassa asemassa olevilla naisilla ja lapsilla.

Kosteikon toimivuuteen vaikuttavat jonkin verran ilmasto ja yleisesti sääolosuhteet, talven pakkaset heikentävät kosteikon toimivuutta. Tältä voidaan kuitenkin suojautua ottamalla se huomioon jo suunnitteluvaiheessa. Lämpimissä maissa tätä ongelmaa ei esiinny.

Harmaan veden kierrätys ei ole kuitenkaan ratkaistu pelkästään kosteikon rakentamisella. Käyttöönottoa varten tarvittaisiin tarkempaa tietoa juuri kyseisen alueen harmaiden vesien laadusta, sillä laatu vaihtelee ympäri maailman. Lisäksi pitää ratkaista harmaan veden erilliskeräys, siirrot kosteikkoon ja kosteikosta käyttöön, esi- ja jälkikäsitteily ja kierrätetyn veden käyttötavat. Toimiessaan harmaan veden kierrätys antaa ratkaisun veden riittävyden haasteisiin, mutta monessa paikkaa vettä säästävät ratkaisut voivat olla tehokkaampia.

LÄHTEET

Al-Jayyousi, O.R. (2003). Greywater reuse: towards sustainable water management, *Desalination*, Vol. 156, Iss. 1-3, pp. 181-192.

Amaris, G., Dawson, R., Gironás, J., Hess, S. & de Dios Ortúzar, J. (2020). Understanding the preferences for different types of urban greywater uses and the impact of qualitative attributes, *Water research*, Vol. 184, pp. 116007.

Brix H. & Arias C. A. (2005). Danish guidelines for small-scale constructed wetland systems for onsite treatment of domestic sewage. *Water Science and Technology*, 51(9), 1-9.

Da Cunha, J. A. C., Arias, C. A., Carvalho, P., Rysulova, M., Canals, J. M., Pérez, G., Bosch, M. G. & Morató, J. F. (2018). "WETWALL" – an innovative design concept for the treatment of wastewater at an urban scale, *Desalination and Water Treatment*, Vol. 109, pp. 205-220.

Dotro, G., Langergraber, G., Molle, P., Nivala, J., Puigagut, J., Stein, O. & von Sperling, M. (2017). *Treatment Wetlands*, IWA Publishing, London, UK, 155 p.

Eriksson, E., Auffarth, K., Henze, M. & Ledin, A. (2002). Characteristics of grey wastewater, *Urban Water*, Vol. 4, Iss. 1, pp. 85-104.

Etchepare, R. & van der Hoek, J. (2015). Health risk assessment of organic micropollutants in greywater for potable reuse, *Water research*, Vol. 72, pp. 186-198.

Fennelly, M., Hellebust, S., Sodeau, J. & Prentice, M. (2020). Real-time Monitoring of Aerosols Generated from Toilet Flushing, *Access microbiology*, Vol 2, Iss 2.

Friedler, E. (2004). Quality of Individual Domestic Greywater Streams and its Implication for On-Site Treatment and Reuse Possibilities, *Environmental technology*, Vol. 25, Iss. 9, pp. 997-1008.

Groundstone (2019). Nitrogen in Sewage Systems: The Chemical Element & Human Impact To Fresh Water [verkkoartikkeli]. Saatavilla (viitattu 26.3.2023): <https://groundstone.ca/2019/01/nitrogen-in-sewage-systems>

Hernández Leal, L., Temmink, H., Zeeman, G. & Buisman, C.J.N. (2011). Characterization and anaerobic biodegradability of grey water, *Desalination*, Vol. 270, Iss. 1-3, pp. 111-115.

Kadlec, R.H., Knight, R.L., Vymazal, J., Brix, H., Cooper, P. & Haberl, R. (2000). *Constructed Wetlands for Pollution Control*, IWA Publishing, London, UK, 156 p.

Kandasamy, J. & Vigneswaran, S. (2008). *Constructed wetlands*, Nova Science Publishers, Inc, New York, 136 p.

Kobayashi, Y., Ashbolt, N.J., Davies, E.G.R. & Liu, Y. (2020). Life cycle assessment of decentralized greywater treatment systems with reuse at different scales in cold regions, *Environment International*, Vol. 134, pp. 105215.

- Korhonen A. (2020). Tutkimuksen mukaan vedenkulutus on vähentynyt, TTS Työteho-seura [verkkoartikkeli]. Saatavilla (viitattu 1.3.2023): https://www.tts.fi/uutishuone/uutiset/asumisen_uutiset/tutkimuksen_mukaan_vedenkulutus_on_vahentynyt.6767.news
- Lakho, F.H., Le, H.Q., Van Kerkhove, F., Igodt, W., Depuydt, V., Desloover, J., Rousseau, D.P.L. & Van Hulle, Stijn W. H. (2020). Water treatment and re-use at temporary events using a mobile constructed wetland and drinking water production system, *Science of The Total Environment*, Vol. 737, pp. 139630.
- Lambert, L.A. & Lee, J. (2018). Nudging greywater acceptability in a Muslim country: Comparisons of different greywater reuse framings in Qatar, *Environmental Science & Policy*, Vol. 89, pp. 93-99.
- Li Q., Ma Y., Chen J., Cai Y., Lu Q., Yu Q., Duan X., Zhao D. & An S. (2023). The negative effect of the high pH of waste concrete in constructed wetlands on COD and N removal, *Journal of Water Process Engineering*, Vol. 51, pp. 103356.
- Maimon, A., Friedler, E. & Gross, A. (2014). Parameters affecting greywater quality and its safety for reuse, *Science of The Total Environment*, Vol. 487, pp. 20-25.
- Meinzinger, F. & Oldenburg, M. (2009). Characteristics of source-separated household wastewater flows: a statistical assessment, *Water Science and Technology*, Vol. 59, Iss. 9, pp. 1785-1791.
- Noutsopoulos, C., Andreadakis, A., Kouris, N., Charchousi, D., Mendrinou, P., Galani, A., Mantziaras, I. & Koumaki, E. (2018). Greywater characterization and loadings – Physicochemical treatment to promote onsite reuse, *Journal of environmental management*, Vol. 216, pp. 337-346.
- Radingoana, M.P., Dube, T. & Mazvimavi, D. (2020). Progress in greywater reuse for home gardening: Opportunities, perceptions and challenges, *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, Vol. 116, pp. 102853.
- Remes M. (2021). Fiksu lotraa vähemmän, Lumo [verkkoartikkeli]. Saatavilla (viitattu 10.1.2023): <https://lumo.fi/lumo-elamaa/fiksu-lotraa-vahemman>
- Vesi (n.d.) Haja-asutuksen jätevesien käsittely – Syken puhdistamosivusto [verkkosivu]. Saatavilla (viitattu 25.2.2023): <https://www.vesi.fi/teemasivu/haja-asutuksen-jatevedenkasittely/>
- Verto (2019). Kuusi vinkkiä fiksuun vedenkäyttöön, VertoNordic Oy [verkkoartikkeli]. Saatavilla (viitattu 10.1.2023): <https://www.verto.fi/kuusi-vinkkia-fiksuun-vedenkayttoon>
- Vymazal, J. (2010). Constructed Wetlands for Wastewater Treatment, *Water*, Vol. 2, Iss. 3, pp. 530-549.
- Vymazal, J. (2011) Constructed Wetlands for Wastewater Treatment: Five Decades of Experience. *Environmental science & technology*. 45 (1), 61–69.
- Vymazal, J. & Kröpfelová, L. (2008). Wastewater Treatment in Constructed Wetlands with Horizontal Sub-Surface Flow, 1 edn., Springer Netherlands, Dordrecht, 566 p.