

Venla Ruotanen

BIOSUODATUS HULEVESIEN RASKAS- METALLIEN HALLINNASSA

Kandidaatintyö
Tekniikan ja luonnontieteiden tiedekunta
Tarkastaja: Annina Takala
5/2022

TIIVISTELMÄ

Venla Ruotanen: Biosuodatus hulevesien raskasmetallien hallinnassa
Bioretention in stormwater management of heavy metals
Kandidaatintyö
Tampereen yliopisto
Tekniikan ja luonnontieteiden TkK-tutkinto-ohjelma, ympäristö- ja energiatekniikka
Toukokuu 2022

Hulevesiin eli sade- ja sulamisvesiin kertyvät haitta-aineet kaupunkiympäristössä ovat maailmanlaajuinen ongelma. Lämpisemättömien pintojen määrä on kasvanut, jolloin sadevedet eivät enää pääse imeytymään maahan. Näin ollen sadevesi kerää pinnoilta mukaansa haitta-aineita, ravinteita ja sedimenttejä. Haitta-aineista varsinkin raskasmetallit ovat huolenaiheena, sillä ne ovat myrkyllisiä eläville eliöille. Tämän työn tarkoituksena onkin selvittää, mitä raskasmetalleja hulevesissä on, mistä ne ovat peräisin ja kuinka suurina pitoisuuksina raskasmetallit esiintyvät hulevesissä. Lisäksi työssä pureudutaan biosuodatukseen ja sen kykyyn pidättää raskasmetalleja. Tavoitteena on siis saada kokonaiskuva hulevesien raskasmetalleista ja biosuodatuksen mahdollisuuksista hallita niitä. Tarkoituksena on myös selvittää, miten biosuodatus soveltuu suomalaisiin olosuhteisiin.

Työ on toteutettu kirjallisuuskatsauksena. Tarkastelun kohteena on ollut kirjallisuus, jossa on käsitelty hulevesien raskasmetallipitoisuuksia ja niiden lähteitä. Jotta pitoisuuksille saatiin vertailukohtaa, on työssä arvioitu myös Valtioneuvoston asetusta ympäristölle vaarallisista ja haitallisista aineista sekä Tukholman läänin hulevesille ehdotettuja raja-arvoja. Biosuodatusta on tarkasteltu yleisesti sen toiminnan ja rakenteen osalta. Biosuodatuksessa on tarkemmin syvennytty rakenteen kykyyn pidättää raskasmetalleja. Suomessa tutkimusta hulevesistä ja biosuodatuksesta on tehty melko niukasti, joten työssä on pyritty hyödyntämään kirjallisuutta, joka soveltuu myös Suomen olosuhteisiin.

Kansainvälisissä tutkimuksissa on havaittu, että hulevesissä esiintyy eniten sinkkiä ja kuparia. Niiden pitoisuudet ylittävät Tukholman läänin hulevesille ehdotetut raja-arvot. Suomessa vastaavat pitoisuudet ovat olleet keskimääräisesti matalia, eivätkä ne ylitä raja-arvoja. Enimmäkseen raskasmetallit ovat peräisin liikenteestä, mutta niitä päätyy hulevesiin myös maankäytön ja laskeuman seurauksena. Usein lähde on kuitenkin vaikea määritellä tarkasti, sillä metallit voivat muuntua tai varastoitua kulkeutumisen aikana.

Hulevesistä syntyneisiin ongelmiin on haettu erilaisia ratkaisuja, joista yksi potentiaalinen vaihtoehto on luontopohjaisiin menetelmiin kuuluva biosuodatus. Hulevesi ohjautuu biosuodatusalueen kasvipeitteiseen painanteeseen, jolloin rakenne toimii myös hulevettä viivyttävänä rakenteena. Rakenne koostuu erilaisista kerroksista, joissa materiaaleina käytetään muun muassa hiekkaa ja orgaanista ainesta kuten multaa. Kerrosten paksuudet vaihtelevat, mutta tyypillisesti rakenne ulottuu noin metrin syvyydelle. Tärkeimmät mekanismit hulevesien raskasmetallien pidättymiseen ovat suodattuminen, saostuminen ja sorptio. Biosuodatuksella on saavutettu laboratorio-olosuhteissa noin 90 % poistotehokkuuksia ja tulokset ovat olleet koekentällä parhaimmillaan samaa luokkaa. Suomessa tulokset ovat olleet heikompia, mutta tulosten luotettavuutta laskee tutkimusten vähyyks. Suomessa hulevesien raskasmetalleista ja biosuodatuksesta tarvitaan lisää tietoa, jotta biosuodatuksen potentiaali voidaan hyödyntää. Yleisesti biosuodatus toimii hyvin raskasmetallien hallinnassa, joten niiden sijoittaminen esimerkiksi liikenneväylien edustalle on perusteltua ja tarpeellista.

Avainsanat: biosuodatus, hulevesien hallinta, raskasmetallit, luontopohjaiset menetelmät

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO	1
2. HULEVESIEN RASKASMETALLIT KAUPUNKIYMPÄRISTÖSSÄ	3
2.1 Raskasmetallien lähteet ja kulkeutuminen.....	3
2.2 Hulevesien raskasmetallien laatukriteerit	3
2.3 Hulevesien raskasmetallipitoisuudet	4
3. BIOSUODATUS.....	7
3.1 Luokittelu	7
3.2 Rakenne	8
3.3 Käytettävät kasvit ja materiaalit.....	9
3.4 Haasteet ja edut.....	11
3.5 Tulevaisuudennäkymät	12
4. BIOSUODATUKSEN TOIMINTA RASKASMETALLIEN HALLINNASSA.....	14
4.1 Biosuodatuksen raskasmetallien pidätyskyky laboratorionkokeissa	14
4.2 Biosuodatusalueiden raskasmetallien pidätyskyky koekentällä	15
4.3 Biosuodatusalueiden sijoittaminen kaupunkiympäristöön.....	17
5. JOHTOPÄÄTÖKSET	19
LÄHTEET	21

LYHENTEET, MERKINNÄT JA TERMINOLOGIA

<i>AA, Annual Average</i>	Vuosikeskiarvo (the European Parliament 2008)
<i>Absorptio</i>	Neste tai kaasu imeytyy nesteeseen tai kiinteään aineeseen. Esimerkiksi kemikaali voi kiinnittyä maahiukkaseen maaperässä kulkeutuessaan, jolloin se ei ole mikrobien saatavilla (Tieteen termipankki 2014b)
<i>Adsorptio</i>	Prosessi, jossa kiinteä aine sitoo kaasun, nesteen tai liuenneen aineen molekyylejä ohuena kalvona (Sanakirja.fi 2022)
<i>Biosuodatus, bioretention</i>	Hulevesien hallintajärjestelmä, jossa hulevettä suodatetaan kasvipeitteisen painanteen (Kuntaliitto 2012) tai rakennetun suodatinkerroksen läpi, jolloin vesi puhdistuu (Kasvio <i>et al.</i> 2016)
<i>Emt.</i>	Edellä mainittu teos
<i>Ensihuuhtouma, first flush</i>	Sadantatapahtuma, jonka aikana hulevesi huuhtoo mukaansa läpäisemättömille pinnoille kertyneet haitta-aineet (Airola <i>et al.</i> 2014)
<i>EQS, Environmental Quality Standards</i>	Ympäristölaatonormit (the European Parliament 2008)
<i>Evapotranspiraatio</i>	Kokonaishaihdunta, joka koostuu transpiraatiosta eli kasveista tapahtuvasta haihdunnasta sekä evaporaatiosta eli maasta tapahtuvasta haihdunnasta (Finto 2018)
<i>Hulevesi</i>	Hulevedellä tarkoitetaan maan pinnalle, rakennuksien katoille tai jollekin muulle pinnalle kertyvää sade- ja sulamisvettä (Vesihuoltolaki 119/2001 2001)
<i>Hydraulinen johtavuus</i>	Permeabiliteetti, maaperän vedenläpäisykyky (Leppäranta <i>et al.</i> 2017, 151)
<i>Low impact development, LID</i>	Toimintatapa, jonka tavoitteena on tuoda käytännöllisempää lähestymistapaa hulevesien hallintaan. Yksi sen tavoitteista on vähentää läpäisemättömien pintojen määrää ja näin ollen hulevesien syntymistä. Yksi esimerkki LID-menetelmästä on biosuodatus (Shrestha <i>et al.</i> 2018)
<i>Luontopohjaiset menetelmät, Nature-Based Solutions NBS</i>	Menetelmät, joilla pyritään vastaamaan ympäristöllisiin, taloudellisiin ja sosiaalisiin haasteisiin kestäväällä tavalla. Ne ovat toimia, jotka saavat lähtökohtansa luonnon prosesseista (European Commission 2022)

MAC, Maximum Allowable Concentration

Sallittu enimmäispitoisuus (the European Parliament 2008)

Sorptio

Aineen poistumista kaasuista tai nesteestä absorboitumalla tai adsorboitumalla (Tieteen termipankki 2014a)

SS, Suspended Solids, suspendoitunut kiintoaine

Mineraalisia tai eloperäisiä hiukkasia, jotka ovat kooltaan yli 0,45 µm ja kulkeutuvat vesipatsaan mukana (Turunen *et al.* 2019)

TOC, Total Organic Compound, kokonaishiilipitoisuus

Veden partikkelit, jotka sisältävät orgaanista hiiltä (European Environment Agency 2022)

Vihreä infrastuktuuri, Green Infrastructure GI

Verkosto, johon kuuluu luonnon ja ihmisten luomia viheralueita, pihvoja ja vesialueita sekä muita luonnon elementtejä (EUR-Lex 2013; Ympäristö.fi 2020)

1. JOHDANTO

Hulevedellä tarkoitetaan maan pinnalle, rakennuksien katoille tai jollekin muulle pinnalle kertyvää sade- ja sulamisvettä (Vesihuoltolaki 119/2001 2001). Hulevesien muodostumiseen vaikuttaa alueen ominaisuuksien lisäksi sateen kesto ja intensiteetti sekä kuivien kausien pituus. Hulevesien hallinnalla puolestaan tarkoitetaan ratkaisuja, joiden tavoitteena on parantaa veden kiertoa ja valunnan laatua rakentamista edeltäneeseen tasoon. Yleiset periaatteet hulevesien hallintaan ovat hulevesien muodostumisen estäminen, niiden määrän vähentäminen, johtaminen hidastavalla tai suodattavalla menetelmällä, hulevesien johtaminen viivyttävälle tai hidastavalle alueelle ja viimeiseksi niiden johtaminen purkuvesiin tai pois alueelta. (Kuntaliitto 2012)

Haitta-aineiden kertyminen kaupunkiympäristöön on maailmanlaajuinen ongelma. Ihmisten toiminnan myötä läpäisemättömien pintojen määrä on kasvanut, jolloin sadevedet eivät enää pääse imeytymään maahan. Tällöin sadevedet valuvat pitkin läpäisemättömiä pintoja keräten mukaansa haitta-aineita, ravinteita ja sedimenttejä. (Gurung *et al.* 2018) Hulevesien kuljettamat raskasmetallit aiheuttavat huolta, sillä ne ovat myrkyllisiä eläimille, ihmisille ja kasveille. Mikro-organismit kuitenkin kykenevät pidättämään raskasmetalleja. Organismien pidätyskyky on kuitenkin rajallinen ja sen ylittyessä raskasmetallit vapautuvat takaisin maaperään. Sieltä ne voivat kulkeutua takaisin ilmaan ja vesistöihin. (Guo *et al.* 2020)

Yksi hulevesien hallintajärjestelmä on biosuodatus. Biosuodatuksessa hulevesi ohjataan kasvipeitteiseen painanteeseen, jonka jälkeen se suodattuu suodatinkerroksen läpi ja vesi puhdistuu (Kuntaliitto 2012; Kasvio *et al.* 2016). Sen tarkoituksena on parantaa veden luonnollista kiertoa, tasoittaa tulvahuippuja ja vähentää vesistöjen haitta-ainekuormitusta (Trowsdale ja Simcock 2011). Biosuodatuksen avulla on saavutettu hyvä puhdistuskyky raskasmetalleille, ulosteperäisille koliformisille bakteereille, kiintoaineelle, hiilivedyille, öljylle sekä rasvalle. Ravinteiden pidätyskyky kuitenkin vaihtelee eri tutkimusten välillä. (Shrestha *et al.* 2018)

Työn tavoitteena on selvittää, mitä on biosuodatus ja miten se toimii suomalaisissa olosuhteissa. Tarkemman tarkastelun kohteena ovat kaupunkien hulevesien raskasmetallien lähteet ja pitoisuudet sekä biosuodatuksen kyky pidättää raskasmetalleja niin laboratorio-olosuhteissa kuin koekentälläkin.

Työn aluksi tutustutaan hulevesien raskasmetallien lähteisiin ja pitoisuuksiin. Tämän jälkeen pureudutaan tarkemmin biosuodatuksen rakenteeseen, materiaaleihin, etuihin ja haasteisiin sekä tulevaisuudennäkymiin. Lopuksi syvennyttään biosuodatuksen toimivuuden raskasmetallien hallinnassa ja pohditaan sen soveltuvuutta suomalaisiin olosuhteisiin.

2. HULEVESIEN RASKASMETALLIT KAUPUN- KIYMPÄRISTÖSSÄ

2.1 Raskasmetallien lähteet ja kulkeutuminen

Useimmiten raskasmetallit huuhtoutuvat pinnoilta ensihuuhtouman (*first flush*) aikana. Ensihuuhtoumaksi kutsutaan sadantatapahtumaa, jonka aikana hulevesi huuhtoo mukaansa läpäisemättömille pinnoille kertyneet haitta-aineet. Tällöin veden laatu on huonoimmillaan. (Airola *et al.* 2014) Hulevesien raskasmetallipitoisuuksiin kiinnitetään huomiota, sillä esimerkiksi kadmium (Cd) on myrkyllinen ja aiheuttaa haitallisia vaikutuksia jo pieninä pitoisuuksina. Kupari (Cu), nikkeli (Ni) ja sinkki (Zn) ovat puolestaan tärkeitä aineenvaihdunnan reaktioissa tarvittavia aineita, mutta suurina pitoisuuksina nekin ovat myrkyllisiä. (Diaconu *et al.* 2020)

Haitta-aineiden lähteitä on joskus vaikea tunnistaa, sillä ne voivat muuntua ja varastoitua kulkeutumisensa aikana. Siksi mitatut pitoisuudet voivat ennemmin kuvata yksittäistä tapahtumaa kuin haitta-aineen lähdettä. (Lundy *et al.* 2012) Tyypillisimpiä lähteitä raskasmetalleille ovat kuitenkin ilman kuiva- ja märkälasseuma, liikenne, rakennustyömaat sekä asuinalueet. Myös maanpinnan eroosio, jätteet ja viheralueilla käytetyt lannoitteet vaikuttavat hulevesien laatuun. (Kuntaliitto 2012) Lundy *et al.* (2012) mukaan hulevesien haitta-aineiden pääasiallisena lähteenä on kuitenkin liikenne, ja haitta-aineiden kuljettajana toimivat vilkkaasti liikennöityjen teiden pinnat.

Tieliikenteestä raskasmetallipäästöjä aiheuttavat renkaiden ja jarrupäällysteiden kuluminen. Kulkuneuvojen voiteluöljyt ja rasvat ovat muun muassa lyijyn lähteitä. (Helmreich *et al.* 2010) Myös osa ilmakehän laskeumasta kulkeutuu kattojen kautta hulevesien joukkoon (Lundu *et al.* 2012). Kattorakenteiden vesitiiveissä liitoksissa ja kouruissa käytetään esimerkiksi lyijyä, josta aiheutuu kulumisen myötä haitta-ainekuormaa (Petrucci *et al.* 2014).

2.2 Hulevesien raskasmetallien laatukriteerit

Taulukossa 1 on Tukholman läänin hulevesille ehdotetut raja-arvot (Riktvärdesgruppen 2009) ja valtioneuvoston asetus ja sen muutokset annettuihin raja-arvoihin ympäristölle vaarallisista ja haitallisista aineista (*Environmental Quality Standards EQS* (the European Parliament 2008)) (1022/2006, 868/2010). Tukholman läänin ehdotetussa raja-arvoasteikossa on viisi porrasta. Pienimmän raja-arvon saa suoraan pieneen vesistöön

laskevat hulevedet. Suurimman raja-arvon saavat suureen vesistöön, kuten mereen, laskevat hulevedet. Näitä arvoja kutsutaan taulukossa 1 pienimmäksi ja suurimmaksi raja-arvoksi. Kun MAC-EQS-arvoa (sallittu enimmäispitoisuus, *Maximum Allowable Concentration MAC* (the European Parliament 2008)) ei sovelleta, niin silloin AA-EQS-arvon (vuosikeskiarvo, *Annual Average AA* (the European Parliament 2008)) katsotaan antavan paremman suojan lyhytaikaisilta pilaantumishuipuilta.

Taulukko 1. Valtioneuvoston asetus ympäristölle vaarallisista ja haitallisista aineista ja Tukholman läänin ehdotetut raja-arvot (perustuu lähteisiin ¹VnA 868/2010 2010, ²VnA 1022/2006 2006, ³Riktvärdesgruppen 2009).

Raskasmetalli [µg/L]	Valtioneuvoston asetus, AA-EQS ^{1,2}	Valtioneuvoston asetus, MAC-EQS ^{1,2}	Tukholman läänin pie- nin ja suurin raja-arvo ³
Kadmium	0,1	≤0,45–1,5	0,4 ja 0,5
Kromi			10 ja 25
Kupari			18 ja 40
Lyijy	7,3	ei sovelleta	8 ja 15
Nikkeli	21	ei sovelleta	15 ja 30
Sinkki			75 ja 125

Hulevesioppaassa (Kuntaliitto 2012) todetaan laaduntarkkailun tärkeimmäksi parametriksi kiintoainetta. Sen perusteella voidaan tehdä päätelmiä huleveden laadusta. Myös Helmreich *et al.* (2010) tutkimuksessa huomattiin, että yhden haitta-aineen löytyminen yleensä ilmentää muidenkin epäpuhtauksien löytymistä. Esimerkiksi sinkin ilmeminen korreloi orgaanisen hiilen (*Total Organic Compound, TOC* (Turunen *et al.* 2019)) ja suspendoituneen kiintoaineen (*Suspended solids, SS* (European Environment Agency 2022)) löytymiseen.

2.3 Hulevesien raskasmetallipitoisuudet

Saksassa tehdyssä Helmreich *et al.* (2010) tutkimuksessa sinkin todettiin olevan merkittävin raskasmetalli raskaasti liikennöidyn tien hulevesissä, mutta myös kuparin, lyijyn ja kadmiumin pitoisuudet ovat merkittäviä. Sinkin määrä nousi lumen sulamisvesien aikaan

arvosta 500 µg/L arvoon 1200 µg/L. Pitoisuuden muutosta selitetään galvanoitujen pintojen herkkyydellä sääolojen muutoksiin. Muille raskasmetalleille ei mitattu yhtä vaihtelevia pitoisuuseroja.

Airolan *et al.* (2014) selvityksessä tutkittiin metallien pitoisuuksia Helsingissä asuin- ja teollisuusalueilla sekä paikoitusalueilla. Metallien pitoisuudet vaihtelivat vähän eri alueiden välillä. Vain kromille ja kuparille saatiin tilastollisessa testauksessa eroavaisuuksia eri alueiden välillä. Helsingin hulevesien raskasmetallipitoisuudet ovat melko pieniä, ja esimerkiksi kadmiumin pitoisuus jää useimmiten alle määritysrajan. Taulukossa 2 on listattuna hulevesien raskasmetallien lähteet ja niiden pitoisuudet.

Taulukko 2. Hulevesien raskasmetallipitoisuudet (perustuu lähteisiin ¹Helmreich *et al.* 2010 ja ²Airola *et al.* 2014).

Raskasmetalli [µg/L]	¹ Liikenne	² Asuinalue	² Teollisuusalue	² Paikoitusalue
Kadmium	<0,5–4.8	0–0,9	0–1	0–0,7
Kupari	24–604	5–124,3	4–122,7	3,9–260
Lyijy	<5–405	0–15,3	0–15,3	0–21
Nikkeli	4,2–403	18–0,5	0,5–11	0,9–18
Sinkki	128–2470	14–170,5	2,6–865,7	14–422,8
	Keskiarvo	Mediaani	Mediaani	Mediaani
Kadmium	<0,5	0,5	0,2	0,5
Kupari	191	13	23	22
Lyijy	56	1,7	2	2
Nikkeli	35	3	3	3
Sinkki	847	49	42,7	52

Raskasmetallit taulukossa 2 eivät kuitenkaan ole kaikki liukoisessa muodossa. Sama määrä metallia eri lähteistä ei aiheuta aina samoja vaikutuksia ympäristölle metallien eri hapetuslukujen vuoksi (Gurung *et al.* 2018). Myös taulukossa 1 olevat ympäristönlaitunormit viittaavat metallien liukoiseen pitoisuuteen (VnA 868/2010 2010). Tämä vaikeuttaa taulukossa 2 ilmoitettujen pitoisuuksien vertailua ohjearvoihin.

Helmreich *et al.* (2010) tutkimuksessa todettiin tieliikenteen hulevesien sinkistä 27 %, kuparista 21 % ja nikkelistä 17 % olevan liukoisessa muodossa. Kadmiumia ei todettu olevan liukoisessa muodossa, mutta sitä ei löydettykään kuin kolmesta näytteestä. Kadmiumia löytyi ainoastaan pieninä pitoisuuksina, mutta tutkimuksessa korostettiin löydön merkittävyyttä metallin myrkyllisyyden vuoksi.

Taulukkoon 1 verrattuna hulevesien pitoisuudet ovat Suomessa keskimääräisesti laatu-kriteerien alapuolella. Kadmium on raja-arvojen yläpuolella, mutta johtopäätöksiä korkeista pitoisuuksista on vaikeaa tehdä, sillä useimmissa näytteissä pitoisuudet olivat alle määritysrajan. Kupari ylittää Tukholman läänin pienimmän raja-arvon mediaanilla tarkasteltuna. Mittausten maksimiarvoja tarkasteltaessa laatu-kriteerit kuitenkin ylittyvät. Niiden suhteellista osuutta ei kerrottu tutkimuksissa. Airola *et al.* (2014) kuitenkin toteavat, että puhdistamiselle ei olisi tarvetta kuin paikallisesti, joten oletettavasti pitoisuudet ovat pysyneet maltillisina laatu-kriteereihin verrattuna.

Helmreich *et al.* (2010) mittaukset antavat viitteitä siitä, että hulevesien puhdistamiselle on tarvetta vilkkaasti liikennöidyillä osuuksilla. Kuparin ja sinkin pitoisuudet ylittävät moninkertaisesti taulukossa 1 olevien Tukholman läänin suurimman raja-arvon. Tutkimuksessa kerrottiin päivittäisen liikenteen keskimäärin olevan vuositasolla 57 000 ajoneuvoa, ja esimerkiksi Helsingissä vastaava luku on noin 40 000 (Väylävirasto 2021). On siis mahdollista, että Helsingin liikenteen hulevesien raskasmetallipitoisuudet ovat korkeammat kuin Airolan *et al.* (2014) tutkimuksesta voisi päätellä. Myös Lundy *et al.* (2012) summaavat, että hulevesien raskasmetallit ovat peräisin pääosin liikenteestä.

3. BIOSUODATUS

3.1 Luokittelu

Low impact development (LID) on Yhdysvalloissa 1990-luvulla kehitetty toimintatapa, jonka tavoitteena on tuoda käytännöllisempää lähestymistapaa hulevesien hallintaan. Yksi sen tavoitteista on vähentää läpäisemättömien pintojen määrää ja näin ollen hulevesien syntymistä. LID-menetelmät tarjoavat myös työkaluja maisema-arkkitehtuuriin, jolloin hulevesien suodattumista, evapotranspiraatiota ((kokonaishaihduntaa (Finto 2018)), pohjaveden muodostumista ja huleveden uudelleenkäyttöä voidaan tehostaa. LID-menetelmien hallintakeinoista yksi tunnetuin on biosuodatus. (Shrestha *et al.* 2018)

LID-menetelmään rinnastettavia termejä ovat *Green Infrastructure (GI)*, *Best Management Practices (BMP)*, *Sustainable Urban Drainage Systems (SUDS)*, *Water Sensitive Urban Design (WSUD)* ja *Innovative Stormwater Management (ISM)*. (Fletcher *et al.* 2015) Määritelmistä Suomessa on käytössä vihreän infrastruktuurin käsite (*GI*), johon kuuluu luonnon ja ihmisten luomia viheralueita, pihoja ja vesialueita sekä muita luonnon elementtejä (EUR-Lex 2013; Ympäristö.fi 2020).

Euroopassa ja Suomessa biosuodatus määritellään osaksi luontopohjaisia ratkaisuja (*Nature-based solutions, NBS*) (Hankonen *et al.* 2018; Paloniemi 2019) ja sitä käytetään myös tässä työssä. Määritelmänä se on kuitenkin hieman laajempi kuin Yhdysvalloissa käytettävän LID-menetelmän. Euroopan komission (nd.) mukaan luontopohjaisilla ratkaisuilla pyritään vastaamaan ympäristöllisiin, taloudellisiin ja sosiaalisiin haasteisiin kestäväällä tavalla. Ne ovat toimia, jotka saavat lähtökohtansa luonnon prosesseista. Niiden tarkoituksena on huomioida niin ekosysteemin kuin ihmistenkin tarpeet.

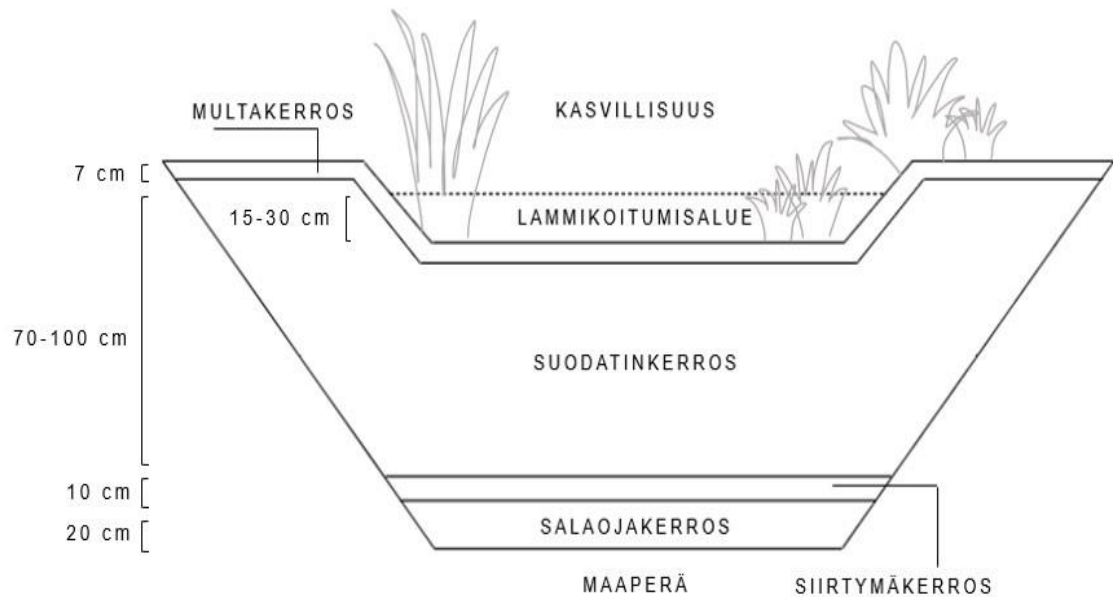
Biosuodatus (*bioretention*) on siis hulevesien hallintajärjestelmä. Biosuodatuksessa hulevettä suodatetaan kasvipeitteisen painanteen (Kuntaliitto 2012) tai rakennetun suodatinkerroksen läpi, jolloin vesi puhdistuu (Kasvio *et al.* 2016). Biosuodatusalueella puolestaan tarkoitetaan aluetta, jonne hulevesi ohjataan suodattumaan tai imeytymään. Näitä alueita kutsutaan myös sadepuutarhoiksi (*rain garden*). (Emt.) Maailmalla ja erityisesti Yhdysvalloissa menetelmä on laajasti tutkittu ja käytetty (Davis *et al.* 2009; Shrestha *et al.* 2018), mutta Suomessa biosuodatus on kuitenkin vielä harvinainen menetelmä, jonka toimivuudesta tarvittaisiin lisää tutkimustietoa (Kasvio *et al.* 2016).

Biosuodatusta voidaan hyödyntää pohjaveden muodostumisen ja veden luonnollisen kierron ylläpitämiseen sekä huleveden haitta-aineiden hallintaan (Davis *et al.* 2009). Biosuodatusalueet tasoittavat hulevesien virtaamia, vähentävät valuma-alueiden vesistöjen haitta-ainekuormitusta ja hillitsevät veden virtauksesta aiheutuvaa eroosiota. Alueiden etuna ovat myös niiden vähäinen pinta-alan tarve sekä kaupunkialueiden viihtyisyyden parantuminen viheralueiden myötä. (Trowsdale ja Simcock 2011)

3.2 Rakenne

Yksinkertaisimmissa suodatusjärjestelmissä hulevesi suodattuu kasvipeitteisen pintavalutuskentän tai viherpainanteen läpi. Näistä suodatusjärjestelmistä rakennetuimpia ovat biosuodatusalueet (Kuntaliitto 2012), jotka koostuvat tyypillisimmin rakennetusta kasvillisuus- ja suodatinkerroksesta sekä salaoja- tai siirtymäkerroksesta (Davis *et al.* 2009; Endreny ja Collins 2009; Hunt 2015; De-Ville *et al.* 2021). Biosuodatusalueet sijoitetaan yleensä teiden varsille, parkkipaikoille ja kaduille. (Shrestha *et al.* 2018)

Ylin kerros on ohut monipuolisesta kasvillisuudesta koostuva kerros, jonka alapuolella on 0,7–1 m:n paksuinen suodatinkerros (Davis *et al.* 2009). Suodatinkerroksen tarkoituksena on parantaa kasvien kasvuolosuhteita, maan rakennetta ja hydraulista johtavuutta eli vedenläpäisykykyä. Suodatinkerroksen alapuolella on siirtymäkerros, jonka tarkoituksena on estää materiaalien huuhtoutumista rakenteesta. (De-Ville *et al.* 2021) Rakenteen alimmaisena kerroksena on vielä salaojakerros, jonne haihtumaton ja imeytymätön vesi suodattuu (Endreny ja Collins 2009). Salaojakerrosta ei kuitenkaan tarvita, jos rakenteen ympärillä oleva luonnontilainen maaperä on riittävän läpäisevä. Salaojakerroksen tarkoituksena on siis estää veden pitkäaikainen lammikoituminen rakenteissa. (Davis *et al.* 2009) Vesi siis imeytyy lopulta maahan tai kulkeutuu salaojien kautta viemärijärjestelmään. (Shrestha *et al.* 2018) Biosuodatuksen rakennetta havainnollistetaan kuvassa 1.



Kuva 1. Biosuodatusalueen periaatekuva ja sen rakennekerrokset (perustuu lähteisiin Davis et al. 2009; Shrestha et al. 2018; Tahvonen 2018).

Systeemiin voidaan lisätä erilaisia kerroksia ja suodatinmateriaaleja tiettyä tavoitetta varten. Tietyillä suodatinmateriaaleilla voidaan vaikuttaa halutun haitta-aineen poistotehokkuuteen. Systeemi voidaan myös räätälöidä toimimaan paikallisten toimintatapojen mukaisesti. Multakerroksella ylläpidetään suodatintehokkuutta ja vähennetään biosuodatusrakenteen tukkeutumisen todennäköisyyttä. (De-Ville et al. 2021)

Biosuodatusalueiden mitoitustarve arvioidaan tarkasteltavan kohteen maaperän, geologisen rakenteen, tulvaherkkyiden ja haitta-aineiden hallinnan tarpeen mukaan (Shrestha et al. 2018). Alueen koko suhteessa valuma-alueen kokoon on vähintään 2 % (Bratieres et al. 2008). Mitoitus tehdään 15–30 cm maastoa matalammaksi, jolloin biosuodatusalueet toimivat myös viivyttävänä patorakenteena. (Shrestha et al. 2018) Alueita ei kuitenkaan ole tarkoitettu pitkäaikaiseksi patorakenteeksi, sillä ne voivat tukkeutua (Davis et al. 2009). Mitoituksessa onkin määritelty maksimaaliset lammikoitumisajat, jotka vaihtelevat 24–96 tunnin välillä (Tahvonen 2018).

3.3 Käytettävät kasvit ja materiaalit

Suodatinmateriaaleiksi tulee valita hyvin vettä läpäisevä materiaali (Davis et al. 2009; Kuoppamäki et al. 2021). Suodatinkerroksen materiaaleja valittaessa saven määrällä voidaan vaikuttaa hydrauliseen johtavuuteen, kasvuolosuhteisiin ja haitta-aineiden pidättymiseen. (Tahvonen 2018; Jiang et al. 2019). Hienorakeisemmilla maalajeilla on parempi adsorptiokyky eli kyky sitoa nesteen tai liuoksen aineen molekyylejä, mikä vaikuttaa esimerkiksi raskasmetallien pidättymiseen (Gülbaz et al. 2015).

Suodatinkerros voi koostua maalajien seoksista tai niiden kerroksista. Maalajeina käytetään yleisimmin hiekkaa, hienorakeisia maalajeja kuten savea ja silttiä sekä orgaanista ainesta kuten multaa. (Davis *et al.* 2009; Trowsdale ja Simcock 2011) Perinteisessä biosuodatusjärjestelmässä suodatinkerroksessa on tilavuudesta 30-60 % hiekkaa, 20-30% multaa ja 20-40 % orgaanista ainesta (De-Ville *et al.* 2021; Jiang *et al.* 2019). Orgaaninen aines parantaa kasvillisuuden tilaa, puskuroi pH:n muutoksia sekä parantaa mikrobiologista hajotustoimintaa sekä kerroksen rakennetta. Salaoja- ja siirtymäkerroksessa käytetään karkeampia maalajeja. (Tahvonen 2018)

Kasvit ovat tärkeitä haitta-aineiden hallinnassa. Erityisesti typen poistumisen kannalta kasvuston vaikutuksen on huomattu olevan tärkeä. Kasvien juuristo ylläpitää maaperän vedenläpäisevyyttä, mikä vaikuttaa biosuodatusrakenteen pitkäaikaiseen suodatuskapasiteettiin. Koska kasveilla on erilainen kyky sopeutua biosuodatuksen rakenteisiin, tulee kasvien valinnassa huomioida lajien vedentarve ja niiden kasvu. Systeemiä suunniteltaessa tulee kiinnittää huomiota kasvuston tiheyteen, kasvillisuuden valintaan ja mullan vaikutukseen. (Hunt 2015) Tahvosen (2018) tutkimuksissa kuitenkin huomattiin, että kasvuston kasvuun vaikutti enemmän maaperän laatu kuin sen syvyys.

Biosuodatusalueilla käytetään monipuolisesti erilaista kasvillisuutta. Kasvillisuutta pyritään saamaan jokaiseen kasvillisuuskerrokseen: pohja-, kenttä-, pensas- ja puukerrokseen. (Tahvonen 2018) On kuitenkin osoitettu fosforin ja typen reduktioiden olleen hyviä jo nurmikollakin (Davis *et al.* 2009; Gülbaz *et al.* 2015). Tällaisen systeemin rakentaminen on halvempaa, mutta se voi tuottaa ongelmia myöhemmin: tärkeää juuristoa ei muodostu, mikä voi vaikuttaa veden läpäisevyyteen ja haitta-aineiden poistotehokkuuksiin (Davis *et al.* 2009).

Suodatinmateriaalien hyvien ominaisuuksien lisäksi niiden halutaan olevan ympäristöystävällisiä ja lähellä tuotettuja. Valinnassa kiinnitetään huomioita myös materiaalin haitallisiin vaikutuksiin, kuten haitta-aineiden liukenemiseen rakenteesta itsestään. (Kuoppamäki 2021) Joissakin tutkimuksissa on havaittu liuenneiden ravinteiden pitoisuuden jopa kasvaneen suodattumisen jälkeen (Li ja Davis 2014; Kasvio *et al.* 2016)

Eniten suodatinmateriaalin valinta on vaikuttanut fosforin poistumiseen (Davis *et al.* 2009; Shrestha *et al.* 2018). Sopivien maalajien ja maakerroksien paksuuden valinnassa tulee kuitenkin huomioida rakenteen kyky ylläpitää kasvillisuutta, veden kiertoa ja haitta-aineiden pidätyskykyä. Myös rakenteen taloudellisuus ja kestävyys pitkällä aikavälillä tulee huomioida. (Davis *et al.* 2009)

Kuoppamäki *et al.* (2021) tutkimuksessa perinteisen hiekan todettiin olevan tehokkain materiaali ravinteiden ja metallien pidättämisessä. Hiekkaa kuitenkin pyritään korvaamaan ympäristölle kestävämmillä materiaaleilla, sillä hiekanotto aiheuttaa ympäristölle haitallisia vaikutuksia muun muassa maanoton ja hydrologian kautta (UNEP 2014). Myös biohiili nähdään potentiaalisena vaihtoehtona esimerkiksi liukoisten ravinteiden ja metallien pidättämisessä (Kuoppamäki *et al.* 2021).

Jiang *et al.* (2019) tutkimuksessa puolestaan käytettiin perinteistä biosuodatuksessa käytettävää suodatinmateriaaliseen yhdistettynä esimerkiksi kierrätysmateriaaleihin kuten biohiileen ja lentotuhkaan. Tutkimuksessa painotettiin erilaisia lähtökohtia, kuten hintaa ja vedenläpäisykykyä. Parhaimmat tulokset useimmalla parametrilla painotettuna saavutettiin materiaaliseoksella, johon oli sekoitettuna 10 % lentotuhkaa.

Kierrätysmateriaalien hyödyntämisestä biosuodatuksessa on vielä vähän tutkimusta. Alam *et al.* (2021) on kuitenkin tutkinut kierrätysbetonin ja -lasin sekä riisinkuorten toimivuutta ravinteiden ja kiintoaineen poistamisessa erilaisissa virtausolosuhteissa. Tutkimuksessa rakenne, joka hyödynsi lasimursketta ja riisinkuorta, saavutti lupaavia poistotehokkuuksia ravinteille ja kiintoaineelle erityisesti pienillä virtauksilla. Myös kierrätysbetonilla saavutettiin hyviä poistotehokkuuksia fosforille.

3.4 Haasteet ja edut

Biosuodatusalueet ovat monikäyttöisiä, sillä ne edistävät tilan tehokasta käyttöä tiheästi rakennetuissa kaupunkiympäristöissä ja tarjoavat mahdollisuuksia uudelleen kaupunkisuunnitteluun. (Tahvonen 2018) Yksityiskohtia biosuodatusalueelle on kuitenkin vaikea määritellä, sillä olosuhteet vaikuttavat suunnitteluun. Myös alueelliset erot ja tiedon vähyys voivat heikentää biosuodatusalueiden koko potentiaalinen hyödyntämistä.

Vesikuormitus on yksi yleisimmistä ongelmista kaupungeissa, sillä osa kasveista kuivuu ja osa hukkuu seisovaan veteen. Biosuodatusrakenteen tulisikin johtaa vettä, mutta kuitenkin pidättää sitä tarpeeksi kasvien kasvun tarpeisiin. (Tahvonen 2018) Tahvosen (2018) tutkimuksessa huomattiinkin, että hulevesien määrällinen hallinta ei tukenut optimaalisesti kasvillisuuden kasvua.

Lämpötilan on todettu vaikuttavan myös biosuodatuksen toimintaa. Biosuodatusalueella todettiin kuitenkin suodattumista, vaikka maa oli osittain jäässä (Tahvonen 2018). Muutoin biosuodatusalueiden kyvystä pidättää raskasmetalleja viileässä ilmastossa on vain

vähän tutkimusta. Biosuodatus ei kuitenkaan sovi suolojen poistamiseen kylmissä olosuhteissa, sillä esimerkiksi kloridi-ionit ovat niin liikkuvia, etteivät ne vuorovaikuta muiden ionien kanssa (Khan *et al.* 2012).

Hulevesien raskasmetallipitoisuuksissa on kausikohtaisia eroja, mikä voi osoittautua biosuodatuksen haasteeksi niin suunnittelussa kuin toiminnassakin. Talvella lumeen kerääntyy lika-aineita ja ne ovat suurimmilta osin sitoutuneena lumen hiukkasiin (Vakkilainen *et al.* 2005). Tämän vuoksi lumen sulamisveden laatu on huonompi kuin sadekauden hulevesien laatu. (Vakkilainen *et al.* 2005; Kuoppamäki *et al.* 2014; Helmreich *et al.* 2010). Lumen sulamisvesien aikaan alueille voi siis muodostua merkittäviäkin valuntaja kuormituspiikkejä.

Pitkällä aikavälillä biosuodatuksessa huolenaiheena on tukkeutuminen, mikä aiheutuu suspendoituneiden aineiden laskeutumisesta biosuodatusalueen pinnalle. Tutkijat kuitenkin arvioivat, että tukkeutumista tapahtuu yleisimmin kerroksissa noin 0-20 cm syvyydellä (H. Li ja Davis 2008; Paus *et al.* 2013; Wang *et al.* 2017) ja se on paikallista (Paus *et al.* 2013). Wang *et al.* (2017) kuitenkin huomauttavat, että raskasmetallien kertyminen rakenteen pintakerrokseen voi aiheuttaa myöhemmin metallien huuhtoutumisen.

Yleisesti toisena huolenaiheena on haitta-aineiden poistotehokkuuden lasku. Raskasmetallit ovat hajoamattomia, myrkyllisiä ja kumuloituvat biosuodatusrakenteeseen. Kuitenkaan 4–6 vuoden biosuodatusalueen toiminnan jälkeen rakenteessa ei huomattu merkittävää hydraulisen johtavuuden laskua. (Paus *et al.* 2013)

3.5 Tulevaisuudennäkymät

Biosuodatusalueen toiminnassa tulisi tarkastella sen koko elinkaarta, jolloin toimivuutta voitaisiin arvioida kokonaisvaltaisemmin eri vaiheissa. Elinkaaritarkastelun avulla pystyttäisiin analysoimaan, kuinka kauan biosuodatusalueet toimivat ja milloin rakenne tarvitsee kunnostusta. (Lehikoinen 2015) Myös rakenteissa tapahtuvia biologisia ja kemiallisia prosesseja tulisi ymmärtää paremmin, jotta niiden vaikutukset voitaisiin huomioida paremmin hallintaratkaisuja tehtäessä (Lahden kaupunki 2019).

Biosuodatusalueen pitkäaikainen tutkimus olisi tärkeää, jotta rakenteen hydraulisesta johtavuudesta ja kasvillisuuden selviytymisestä saataisiin lisää tietoa. Suomessa huleveden käsittely ja biosuodatus ovat ylipäätään melko uusia tutkimusaiheita, joten niiden suunnittelusta, toteutuksesta kuin kunnossapidostakin tarvittaisiin lisää tutkimusaineistoa (Lehikoinen 2015). Myös ilmastonmuutoksen tuomat vaikutukset tulisi huomioida, sillä Suomessa talven lumipeite luultavimmin vähenee eteläisessä Suomessa ja sade-

ja kasvukausi pitenee (Tahvonen 2018). Lumipeitteen väheneminen luultavasti vähentää kevään valunta- ja haitta-ainekuormitusta.

Luontopohjaiset ratkaisut, kuten biosuodatus, voivat olla tulevaisuudessa merkittävä keino edistää luonnon tilaa, sillä Euroopan Unioni valmisteleekin elinympäristöjen ennallistamislakia. Laista julkaistaan lakiesitys kevään 2022 aikana. Ennallistamisella tarkoitetaan usein alueen palauttamista tilaan ennen häiriötä. On kuitenkin vielä epäselvää, miten ennallistaminen määritellään laissa, koska sillä voidaan tarkoittaa myös kunnostamista tai tilan edistämistä. (Kareksela *et al.* 2022)

Esityksen mukaan vuoteen 2030 mennessä tulisi ennallistaa 30 % niistä elinympäristöistä, jotka ovat heikentyneet. Ennallistamistavoite voi Suomessa tarkoittaa 1,2 miljoonaa hehtaaria ja noin 1,6 miljardia euroa. Ennallistaminen koskee luontodirektiivin liitteessä I mainittuja luontotyypppejä. (Kareksela *et al.* 2022)

Kareksela *et al.* (2022) selvityksessä on eriteltynä sisävesien ennallistamistoimenpiteet, joissa edellytetään valuma-alueiden vesiensuojelun tehostamista. Mainittu toimenpide on muun muassa veden pidätyskyvyn parantaminen, joka kytkeytyy tämän kandidaatin työn keskeiseen aiheeseen, biosuodatukseen. Kuitenkaan suoria johtopäätöksiä luontopohjaisten ratkaisujen merkittävydestä on näin varhaisessa vaiheessa vaikea tehdä.

4. BIOSUODATUKSEN TOIMINTA RASKASMETALLIEN HALLINNASSA

4.1 Biosuodatuksen raskasmetallien pidätyskyky laboratorio-kokeissa

Biosuodatuksessa hulevedet puhdistuvat fysikaalisten, kemiallisten ja biologisten prosessien kautta (Shrestha *et al.* 2018). Raskasmetallien pitoisuudet vähenevät suodattamisen, saostumisen ja sorption kautta sekä mikrobiologisten prosessien vaikutuksesta (Paus *et al.* 2013). Sorptio voi olla joko adsorptiota tai absorptiota (Tieteen termipankki 2014a). Adsorptiolla tarkoitetaan prosessia, jossa kiinteä aine sitoo nesteeseen tai liuonneen aineen molekyylejä ohuena kalvona (Sanakirja.fi 2022). Absorptiolla puolestaan tarkoitetaan prosessia, jossa aine imeytyy johonkin materiaaliin, eikä tällöin ole enää esimerkiksi mikrobien saatavilla (Tieteen termipankki 2014b).

Sunin ja Davisin (2007) laboratoriotutkimuksessa biosuodatuksen toimivuutta testattiin kolmella sylinterillä. Testattavana hulevetenä käytettiin hanavettä, johon oli liuotettuna raskasmetalleja. Tutkimus kesti 183 päivää. Sinkin, kuparin, lyijyn ja kadmiumin poistotehot olivat keskimäärin 94, 88, 95 ja >95 %. Tutkimuksessa käytettiin liuosta, jonka raskasmetallien pitoisuudet vaihtelivat välillä 0,66–71 µg/L. Toisessa liuoksessa raskasmetallien pitoisuudet vaihtelivat välillä 1,44–170 µg/L, jolloin poistotehokkuudet olivat sinkille 97 %, kuparille 93 %, lyijylle 97 % ja kadmiumille >98 %.

Wang *et al.* (2017) laboratoriotutkimuksessa testattiin neljää biosuodatussylinteriä, joihin johdettiin synteettistä hulevettä. Tulovirtaaman raskasmetallipitoisuudet tutkittavissa hulevesissä olivat välillä 303,6–1808,8 ja 710–771,5 sekä 1116,4–3416,8 µg/L. Koetestit toistettiin neljä kertaa kuukauden aikana toukokuussa 2014. Sadetapahtumaintervalli kesti seitsemän päivää. Poistotehokkuus vaihteli neljässä sylinterissä 92,3–100 % välillä ja keskimääräisesti se oli 97 %. Lyijylle saatiin tutkimuksessa lähes 100 % poistotehokkuus. Kahden tutkimuksen tulokset on esitetty taulukossa 3.

Taulukko 3. Raskasmetallien poistotehokkuudet biosuodatuksen laboratoriokeissa (perustuu lähteisiin ¹Sun ja Davis 2007, ²Wang et al. 2017).

Raskasmetalli	¹ Poistotehokkuus, keskiarvo [%]	² Poistotehokkuus, keskiarvo [%]
Kadmium	95–98	98,4–100
Kupari	87–94	97,1–99,5
Lyijy	95–97	99,1–100
Sinkki	93–97	98,5–100

Hanavedessä oli liuotettuna metalleja biosaatavassa muodossa. Tilanne siis kuvaa kaikkein pahinta mahdollista tilannetta hulevesien osalta. (Sun ja Davis 2007) Wangin *et al.* (2017) tutkimuksen trendit osoittavat, että poistotehokkuudet olivat lähes samoja raskasmetallin pitoisuudesta riippumatta. Tulovirtaaman pitoisuuksilla on siis vähän vaikutusta lähtövirtaamien raskasmetallipitoisuuksiin. (Wang *et al.* 2017)

Laboratoriokeiden perusteella biosuodatus siis pidättää hyvin raskasmetalleja. Wangin *et al.* (2017) tutkimuksen ajankohta on kymmenen vuotta Sunin ja Davisin (2007) tutkimuksen jälkeen, mikä osoittaa, että biosuodatukselle on tieteellinen pohja sen toimivuudesta laboratorio-olosuhteista. Täytyy kuitenkin muistaa, että laboratorio-olosuhteet ovat karkeita yksinkertaistuksia, ja usean muuttujan vaikutuksia on vaikea tarkastella samanaikaisesti.

4.2 Biosuodatusalueiden raskasmetallien pidätyskyky koekentällä

Davisin (2007) tutkimuksen kohteena olivat kaksi biosuodatusaluetta, jotka oli sijoitettu USA:n Marylandin kampuksen parkkipaikan läheisyyteen. Tutkimuksen aikana kerättiin 12 näytettä kesäkuusta 2003 syyskuulle 2004. Analysoinnin kohteena olivat raskasmetalleista sinkki, lyijy ja kupari. Parhaimmat poistotehokkuudet mitattiin lyijylle, 80 %. Myös sinkille mitattiin hyviä poistotehokkuuksia. Kuparille puolestaan poistotehokkuudet olivat matalat, noin 55 %, sillä huleveden kuparipitoisuudet olivat alhaiset.

Trowsdalen ja Simcockin (2011) tutkimuksessa mitattiin lyijyn, kuparin ja sinkin pitoisuuksia. Biosuodatusalue sijaitsi Uudessa-Seelannissa, Aucklandissa, raskaasti liikennöidyn tien varrella. Tutkimuksessa analysoitiin kesästä 2006 lähtien 12 sadetapahtumaa, jotka ajoittuivat parin vuoden ajanjaksolle. Tutkimuksessa kuparin pitoisuus kasvoi. Tämän

arvellaan johtuvan kasvillisuudessa käytettävästä torjunta-aineesta. Sinkille mitattiin parhaimmat poistotehokkuudet, 95,6 %. Myös lyijylle poistotehokkuus oli hyvä, 90,9 %. Tutkimuksessa mitattiin myös liukoisessa muodossa olevia raskasmetalleja. Liuenneelle sinkille mitattiin poistotehokkuus 93,2 %.

Lehikoinen (2015) tutki Vantaan Tikkurilantien biosuodatusaluetta. Näytteitä kerättiin syksyn 2013 ja kesän 2014 aikana. Lisäksi jatkuvatoimista mittausta suoritettiin syksyllä 2014. Tutkimuksesta saatiin vaihtelevia tuloksia ja siksi niitä ei ole ilmoitettu taulukossa taulukkoon 4. Tuloksiin vaikuttanee satunnaismittaus ja mittauskertojen vähyys.

Kasvio *et al.* (2016) tutkimuksessa seurattiin Tampereen Lielahden lumenkaatopaikalle rakennettua biosuodatusaluetta. Tutkimus tehtiin vuosina 2012–2015. Näytteitä kerättiin yhteensä 22 jatkuvatoimisen seurannan lisäksi. Alueella vesi johdettiin laskeutusaltaan kautta biosuodatusalueelle. Biosuodatusalueen todettiin pidättävän hyvin sinkkiä, 42 %. Arvo on kuitenkin heikompi, mitä odotettiin. Tutkimuksessa ilmoitettiin tulo- ja lähtövirtaaman pitoisuudet pylväsdiagrammeina, joten taulukossa 3 ilmoitetut arvot ovat silmä-määräisiä. Biosuodatusalueiden raskasmetallien pidätyskyvyn tulokset on koottuna taulukkoon 4.

Taulukko 4. Biosuodatusalueiden poistotehokkuudet (perustuu lähteisiin ¹Davis 2007, ²Trowsdale ja Simcock 2011, ³Kasvio *et al.* 2016).

Raskasmetalli	Tulovirtaama [µg/L]	Lähtövirtaama [µg/L]	Poistotehokkuus [%]
Kupari ^{1b}	10	4,1 ja 4,5	55 ja 59
Lyijy ^{1b}	58	9,9	83
Lyijy ^{2b}	11	1	90,9
Sinkki ^{2b}	659	29	95,6
Sinkki ^{3a*}	38	22,1	42
Sinkki ^{1b}	107	32,1 ja 56,7	47 ja 70

**Keskiarvoiset poistotehokkuudet ovat lähes aina matalampia kuin mediaaniarvot, sillä keskiarvo painottaa enemmän heikompia poistotehokkuuksia (Davis 2007).*

a keskiarvo

b mediaani

Davis (2007) huomauttaa, että lyijyn ja kuparin poistotehokkuudet ovat erinomaisia, vaikka prosentuaalisesti ne eivät vakuuttaisikaan. Tämä johtuu siitä, että alkujaan pitoisuudet ovat hyvin matalia. Trowsdalen ja Simcockin (2011) tutkimuksessa havaittiin, että

lähtövirtaaman laatu oli tasainen, eikä se ollut yhteydessä tulovirtaaman pitoisuuksiin. Biosuodatuksen jälkeen veden haitta-ainepitoisuudet pienenevät, joten rakenne vähentää haitta-aineiden määrää.

Pausin *et al.* (2013) tutkimuksessa havaittiin raskasmetallien pitoisuuksien pienenevän syvemmillä biosuodatusrakenteessa. Puhdistusmekanismien, kuten suodattumisen ja sorption, arvioitiin olevan syynä tähän havaintoon. Mikrobiologiset prosessit lisäävät todennäköisesti funktionaalisia hapettuneita ryhmiä, jotka ovat yhteydessä metallien sorptiokykyyn.

Tampereen lumenkaatopaikalla Kasvion *et al.* (2016) tutkimuksissa olosuhteet ovat tavanomaiseen biosuodatusalueeseen verrattuna poikkeavat. Suuri lumimassa sulaa pitkään, jolloin kylmää vettä valuu biosuodatusalueelle tasaisesti koko ajan, eikä suuria valuntapiikkejä synny. Kylmän veden ja maaperän kylästyminen vedellä vaikuttanee biosuodatuksen toimintaa. (Kasvio *et al.* 2016)

Hulevesien raskasmetallipitoisuudet vaihtelivat melko paljon tutkimusten välillä. Tämä oli oletettavissa, sillä eri alueiden ominaisuudet vaikuttavat hulevesien raskasmetallipitoisuuksiin. Samalla myös poistotehokkuudet vaihtelivat. Sekä laboratorioskokeissa että koekentällä huomattiin, että lähtövirtaaman laatu oli tasainen, eikä se ollut yhteydessä tulovirtaaman pitoisuuksiin. Tämä osoittaa, että biosuodatuksen puhdistusteho on hyvä ja se toimii vaihtelevissakin olosuhteissa.

4.3 Biosuodatusalueiden sijoittaminen kaupunkiympäristöön

Biosuodatusalueiden sijoituksessa tulee ottaa huomioon paikalliset olosuhteet. Yleisesti voidaan kuitenkin todeta, että biosuodatusta kannattaa sijoittaa alueille, joissa hulevedet sisältävät raskasmetalleja. Kyseisiä alueita ovat vilkkaasti liikennöidyt alueet ja paikoitusalueet (Helmreich *et al.* 2010; Kuntaliitto 2012; Lundy *et al.* 2012). Biosuodatusalueiden tarpeellisuus tulee arvioida tarkemmin alueille, joissa hulevedet sisältävät paljon ravinteita ja niiden poistaminen on ensisijainen tarkoitus. Kuitenkin esimerkiksi fosforin pidättymistä voidaan tehostaa materiaalivalinnoilla (Shrestha *et al.* 2018) ja typen poistamista oikeanlaisella kasvillisuudella (Bratieres *et al.* 2008; Hunt 2015).

Biosuodatusalueet myös tasoittavat virtaamahuippuja ja veden virtauksesta aiheutuvaa eroosiota (Trowsdale ja Simcock 2011), joten osaltaan ne toimivat myös alueille, joilla tarvitaan hulevesien määrällistä hallintaa. Biosuodatusalueita ei kuitenkaan ole tarkoitettu ja suunniteltu kosteikkojen tapaan lammikoiksi, joten mitoituksen ja sijoittamisen suhteen tulee olla huolellinen.

Vaikka biosuodatusalueiden rakentamisen ensisijainen tarkoitus on hulevesien hallinta, niin ne voivat toimia esteettisinä viherelementteinä kaupunkiympäristöissä. Samalla ne tarjoavat uudenlaisia mahdollisuuksia kaupunkisuunnitteluun esimerkiksi niiden vähäisen tilantarpeen takia (Tahvonen 2018). Viheralueet tarjoavat myös muita mahdollisuuksia, kuten uusia elinympäristöjä alueen eliöstölle, mikä puolestaan edistää alueen monimuotoisuutta.

5. JOHTOPÄÄTÖKSET

Raskasmetallit ovat pääosin peräisin liikenteestä, mutta niitä kulkeutuu hulevesiin myös laskeuman ja maankäytön seurauksena. Raskasmetallien alkuperää on kuitenkin joskus vaikea määrittää tarkasti, sillä alueet ovat erilaisia. Raskasmetallit myös voivat muuntua tai pidäytyä kulkeutumisen aikana. Kulkeutumisessa on tärkeää huomioida ensihuuhtouman merkitys, sillä huleveden laatu on tällöin huonoimmillaan. Suomessa raskasmetallipitoisuudet eivät ylittäneet juurikaan laatuksiteereitä, mutta Saksassa vilkkaasti liikennöidyllä tiellä kuparin ja sinkin pitoisuudet ylittivät moninkertaisesti Tukholman läänin hulevesille asetetut raja-arvot. Suomessakin voi siis olla vilkkaasti liikennöityjen teiden varilla tarvetta hulevesien puhdistusmenetelmille.

Hulevesistä syntyneisiin ongelmiin on kehitetty monia menetelmiä ja yksi niistä on biosuodatus. Biosuodatus on rakennettu kasvipeitteinen painanne, jonka läpi hulevedet suodattuvat. Biosuodatuksen rakenteeseen on olemassa pääpiirteet, mutta yksityiskohdat määritellään tapauskohtaisesti. Muun muassa materiaalivalinnoilla voidaan vaikuttaa biosuodatuksen ominaisuuksiin.

Tutkimukset osoittavat, että menetelmästä olisi apua hulevesien raskasmetallien hallintaan. Biosuodatusta on tutkittu niin laboratoriossa kuin koekentälläkin. Laboratorioolosuhteissa saavutettiin keskimäärin reilun 90 %:n poistotehokkuuksia tutkituille raskasmetalleille. Vaikka laboratorio-olosuhteet poikkeavat koekentän olosuhteista, tulokset ovat olleet samansuuntaisia. Parhaimmillaan koekentän poistotehokkuudet ovat olleet 90 %:n luokkaa. Matalammat poistotehokkuudet eivät suoraan ole yhteydessä biosuodatuksen heikompaan toimivuuteen vaan lähinnä alhaisiin tulovirtaaman pitoisuuksiin. Biosuodatuksen potentiaalisesta kyvystä pidättää raskasmetalleja kertoo myös se, että lähtövirtaaman pitoisuudet pysyivät melko tasaisena, vaikka kuormitus ja olosuhteet vaihtelevat.

Huolenaiheena biosuodatusalueille on ollut rakenteen tukkeutuminen ja haitta-aineiden pidätyskyvyn lasku sekä kyky toimia kylmissä olosuhteissa. Pidemmän seurantajakson jälkeen rakenteessa ei kuitenkaan huomattu merkittävää tukkeutumista, eikä poistotehokkuuden laskua kumuloituvasta vaikutuksesta huolimatta. Huolenaiheeksi kuitenkin muodostui raskasmetallien kertyminen rakenteen pintakerrokseen, jolloin ne voivat huuhtoutua veden mukana.

Suomalaisissa olosuhteissa biosuodatuksen toimivuudesta on niukasti tietoa, ja tulokset ovat olleet vaihtelevia. Kylmissä olosuhteissa biosuodatusalueella kuitenkin huomattiin suodattumista, vaikka maa oli osittain jäässä. Maailmalla tehdyt tutkimukset osoittavat, että Suomessakin biosuodatus olisi toimiva ratkaisu raskasmetallien hallintaan. Tuleva EU:n elinympäristöjen ennallistamislakikin enteilee sitä, että maankäytön muutoksen myötä tarve uusille menetelmille oletettavasti kasvaa. Tämä tarjoaa mahdollisuuden biosuodatuksen yleistymiselle ja menetelmän kehittymiselle suomalaisissa olosuhteissa.

LÄHTEET

- Airola, Johanna, Paula Nurmi ja Katja Pellikka. 2014. Huleveden laatu Helsingissä. Helsingin kaupungin ympäristökeskuksen julkaisuja 12/2014, 81.
- Alam, Taufiqul, Juan César Bezares-Cruz, Ahmed Mahmoud ja Kim D. Jones. 2021. Nutrients and Solids Removal in Bioretention Columns Using Recycled Materials under Intermittent and Frequent Flow Operations. *Journal of Environmental Management* 297: 113321–113321. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113321>.
- Bratieres, K., T. D. Fletcher, A. Deletic ja Y. Zinger. 2008. Nutrient and Sediment Removal by Stormwater Biofilters: A Large-Scale Design Optimisation Study. *Water Research* 42 (14): 3930–40. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2008.06.009>.
- Davis, Allen P. 2007. Field Performance of Bioretention: Water Quality. *Environmental Engineering Science* 24 (8): 1048–64. <https://doi.org/10.1089/ees.2006.0190>.
- Davis, Allen P., William F. Hunt, Robert G. Traver ja Michael Clar. 2009. Bioretention Technology: Overview of Current Practice and Future Needs. *Journal of Environmental Engineering* 135 (3): 109–17. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9372\(2009\)135:3\(109\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9372(2009)135:3(109)).
- De-Ville, Simon, Daniel Green, Jill Edmondson, Ross Stirling, Richard Dawson ja Virginia Stovin. 2021. Evaluating the Potential Hydrological Performance of a Bioretention Media with 100% Recycled Waste Components. *Water* 13 (15): 2014. <https://doi.org/10.3390/w13152014>.
- Diaconu, Mariana, Lucian Vasile Pavel, Raluca-Maria Hlihor, Mihaela Rosca, Daniela Ionela Fertu, Markus Lenz, Philippe Xavier Corvini ja Maria Gavrilescu. 2020. Characterization of Heavy Metal Toxicity in Some Plants and Microorganisms—A Preliminary Approach for Environmental Bioremediation. *New Biotechnology* 56: 130–39. <https://doi.org/10.1016/j.nbt.2020.01.003>.
- Endreny, T. ja V. Collins. 2009. Implications of Bioretention Basin Spatial Arrangements on Stormwater Recharge and Groundwater Mounding. *Ecological Engineering* 35 (5): 670–77. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2008.10.017>.
- EUR-Lex. 2013. Communication from the commission to the European parliament, the council, the European economic and social committee, and the committee of the regions Green Infrastructure (GI) — Enhancing Europe’s Natural Capital. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/ALL/?uri=CELEX:52013DC0249>.
- European Commission. nd. Nature-Based Solutions. Text. European Commission - European Commission. https://ec.europa.eu/info/research-and-innovation/research-area/environment/nature-based-solutions_en.
- European Environment Agency. 2022. Total Organic Carbon (TOC) — European Environment Agency. Term. 2022. <https://www.eea.europa.eu/help/glossary/eper-chemicals-glossary/total-organic-carbon-toc>.
- Finto. 2018. Finto: AFO: evapotranspiraatio. 27. joulukuuta 2018. <https://finto.fi/afo/fi/page/p4311>.
- Fletcher, Tim D., William Shuster, William F. Hunt, Richard Ashley, David Butler, Scott Arthur, Sam Trowsdale, *et al.* 2015. SUDS, LID, BMPs, WSUD and More - The Evolution and Application of Terminology Surrounding Urban Drainage. *Urban Water Journal* 12 (7): 525–42. <https://doi.org/10.1080/1573062X.2014.916314>.
- Guo, Chao, Jiake Li, Huaien Li ja Yajiao Li. 2020. Influences of Stormwater Concentration Infiltration on the Heavy Metal Contents of Soil in Rain Gardens. *Water Science and Technology* 81 (5): 1039–51. <https://doi.org/10.2166/wst.2020.189>.
- Gurung, Sher Bahadur, Franz Kevin Geronimo, Jungsun Hong ja Lee-Hyung Kim. 2018. Application of Indices to Evaluate LID Facilities for Sediment and Heavy Metal Removal. *Chemosphere (Oxford)* 206: 693–700. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.05.077>.
- Gülbaz, Sezar, Cevza Melek Kazezyılmaz-Alhan ja Nadim K. Copty. 2015. Evaluation of Heavy Metal Removal Capacity of Bioretention Systems. *Water, Air, and Soil Pollution* 226 (11): 1–14. <https://doi.org/10.1007/s11270-015-2640-y>.
- Hankonen, Ilona, Turo Hjerpe, Suvi Vikström, Aino Rekola, Mikko Sane, Mika Marttunen, Ranja Hautamäki, Heikki Tuomenvirta ja Riikka Paloniemi. 2018. Imeytystä, suodatusta ja linnunlaulua: Luontopohjaisen vesienhallinnan moninaishyödyt Porissa. *Terra* 130 (3): 127–34.

- Helmreich, Brigitte, Rita Hilliges, Alexander Schriewer ja Harald Horn. 2010. Runoff Pollutants of a Highly Trafficked Urban Road – Correlation Analysis and Seasonal Influences. *Chemosphere (Oxford)* 80 (9): 991–97. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2010.05.037>.
- Hunt, William F. 2015. Plant Selection for Bioretention Systems and Stormwater Treatment Practices. SpringerBriefs in Water Science and Technology. Singapore: Springer Singapore. <https://doi.org/10.1007/978-981-287-245-6>.
- Jiang, Chunbo, Jiake Li, Huaian Li ja Yajiao Li. 2019. An Improved Approach to Design Bioretention System Media. *Ecological Engineering* 136: 125–33. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2019.06.014>.
- Kareksela, Santtu, Aleksi Räsänen, Sanna Kuningas, Pauliina Louhi ja Jukka Ruuhijärvi. 2022. Esiselvitys Euroopan Unionin ennallistamislakialoitteen vaikutuksista Suomessa. Luonnonvarakeskus. <https://jukuri.luke.fi/handle/10024/551708>.
- Kasvio, Pinja, Teemu Ulvi, Jari Koskiahho ja Jukka Jormola. 2016. Kosteikkojen ja biosuodatusalueiden toimivuus hulevesien käsittelyssä - HULE-hankkeen loppuraportti. Suomen ympäristökeskus. <https://helda.helsinki.fi/handle/10138/160201>.
- Khan, U. T., C. Valeo, A. Chu ja B. Van Duin. 2012. Bioretention Cell Efficacy in Cold Climates: Part 2 — Water Quality Performance. *Canadian Journal of Civil Engineering* 39 (11): 1222–33. <https://doi.org/10.1139/l2012-111>.
- Kuntaliitto. 2012. Hulevesiopas. Suomen Kuntaliitto. <https://julkaisut.kuntaliitto.fi/1481>.
- Kuoppamäki, Kirsi, Stephan Pflugmacher Lima, Costanza Scopetani ja Heikki Setälä. 2021. The Ability of Selected Filter Materials in Removing Nutrients, Metals, and Microplastics from Stormwater in Biofilter Structure”. *Journal of Environmental Quality* 50 (2): 465–75. <https://doi.org/10.1002/jeq2.20201>.
- Kuoppamäki, Kirsi, Heikki Setälä, Anna-Lea Rantalainen ja D. Johan Kotze. 2014. Urban Snow Indicates Pollution Originating from Road Traffic. *Environmental Pollution* 195 (joulukuuta): 56–63. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2014.08.019>.
- Lahden kaupunki. 2019. Uudet hulevesien hallinnan Smart & Clean ratkaisut (Hule S&C) Loppuraportti. <https://www.lahti.fi/tiedostot/hulevesi-smart-clean/>.
- Lehikoinen, Elina. 2015. Kadun vastavalmistuneiden huleveden biosuodatusalueiden toimivuus Vantaalla. 125.
- Leppäranta, Matti, Juhani Virta ja Timo Huttula. 2017. Hydrologian perusteet. Helsingin yliopisto, Suomen ympäristökeskus SYKE. <http://hdl.handle.net/10138/241220>.
- Li, Houg ja Allen P. Davis. 2008. Heavy Metal Capture and Accumulation in Bioretention Media. *Environmental Science & Technology* 42 (14): 5247–53. <https://doi.org/10.1021/es702681j>.
- Li, Liqing ja Allen P. Davis. 2014. Urban Stormwater Runoff Nitrogen Composition and Fate in Bioretention Systems. *Environmental Science & Technology* 48 (6): 3403–10. <https://doi.org/10.1021/es4055302>.
- Lundy, L., J. B. Ellis ja D. M. Revitt. 2012. Risk Prioritisation of Stormwater Pollutant Sources. *Water Research (Oxford)* 46 (20): 6589–6600. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2011.10.039>.
- Paloniemi, Riikka. 2019. Kestävää kaupunkisuunnittelua luontopohjaiset ratkaisut maakunnissa ja kunnissa. Valtioneuvoston kanslia. <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-287-774-1>.
- Paus, Kim H., Joel Morgan, John S. Gulliver, TorOve Leiknes ja Raymond M. Hozalski. 2013. Assessment of the Hydraulic and Toxic Metal Removal Capacities of Bioretention Cells After 2 to 8 Years of Service. *Water, Air, and Soil Pollution* 225 (1): 1–12. <https://doi.org/10.1007/s11270-013-1803-y>.
- Petrucci, Guido, Marie-Christine Gromaire, Masoud Fallah Shorshani ja Ghassan Chebbo. 2014. Nonpoint Source Pollution of Urban Stormwater Runoff: A Methodology for Source Analysis. *Environmental Science and Pollution Research International* 21 (17): 10225–42. <https://doi.org/10.1007/s11356-014-2845-4>.
- Riktvärdesgruppen. 2009. Förslag till riktvärden för dagvattenutsläpp. Regionplane- och trafikkontoret, Stockholms läns landsting. http://stormtac.com/admin/Uploads/Riktvarden_dagvatten_feb_2009.pdf.
- Sanakirja.fi. 2022. Sanakirja.fi – Adsorption.. https://www.sanakirja.fi/oxford_new_american/english-english.
- Shrestha, Paliza, Stephanie E. Hurley ja Beverley C. Wemple. 2018. Effects of Different Soil Media, Vegetation, and Hydrologic Treatments on Nutrient and Sediment Removal in Roadside Bioretention Systems. *Ecological Engineering* 112: 116–31. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2017.12.004>.

- Sun, Xueli ja Allen P. Davis. 2007. Heavy Metal Fates in Laboratory Bioretention Systems. *Chemosphere (Oxford)* 66 (9): 1601–9. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2006.08.013>.
- Tahvonen, Outi. 2018. Adapting Bioretention Construction Details to Local Practices in Finland. *Sustainability (Basel, Switzerland)* 10 (2): 276-. <https://doi.org/10.3390/su10020276>.
- the European Parliament. 2008. Directive 2008/105/EC of the European Parliament and of the Council of 16 December 2008 on Environmental Quality Standards in the Field of Water Policy, Amending and Subsequently Repealing Council Directives 82/176/EEC, 83/513/EEC, 84/156/EEC, 84/491/EEC, 86/280/EEC and Amending Directive 2000/60/EC of the European Parliament and of the Council. OJ L. Vsk. 348. <http://data.europa.eu/eli/dir/2008/105/oj/eng>.
- Tieteen termipankki. 2014a. Ympäristötieteet: sorptio – Tieteen termipankki. 16. huhtikuuta 2014. <https://tieteentermipankki.fi/wiki/Ymp%C3%A4rist%C3%B6tieteet:sorptio>.
- . 2014b. Absorption – Tieteen termipankki. 9. joulukuuta 2014. <https://tieteentermipankki.fi/wiki/Nimitys:Absorption>.
- Trowsdale, Sam A. ja Robyn Simcock. 2011. Urban Stormwater Treatment Using Bioretention. *Journal of Hydrology* 397 (3–4): 167–74. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.11.023>.
- Turunen, Jarno, Hannu Marttila, Maria Kämäri, Markus Saari, Kaisa Heikkinen, Heini Postila ja Saija Koljonen. 2019. Kiintoaineen eroosio ja sedimentaatio virtavesissä - luonnollisesta prosessista virtavesien ongelmaksi, 76.
- UNEP, United Nations Environment Programme. 2014. Sand, Rarer than One Thinks: UNEP Global Environmental Alert Service (GEAS) - March 2014. <https://wedocs.unep.org/xmlui/handle/20.500.11822/8665>.
- Vakkilainen, Pertti, Jyrki Kotola ja Jyrki Nurminen. 2005. Rakennetun ympäristön valumavedet ja niiden hallinta. Helsinki: Ympäristöministeriö: Edita Publishing, jakaja.
- Vesihuoltolaki 119/2001. 2001. FINLEX - Ajantasainen lainsäädäntö: Vesihuoltolaki 119/2001. Oikeusministeriö, Edita Publishing Oy. 9. helmikuuta 2001. <https://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/2001/20010119#L1>.
- VnA 868/2010. 2010. FINLEX - Säädökset alkuperäisinä: Valtioneuvoston asetus vesiympäristölle... 868/2010. Oikeusministeriö. 7. lokakuuta 2010. <https://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2010/20100868>.
- VnA 1022/2006. 2006. FINLEX ® - Säädökset alkuperäisinä: Valtioneuvoston asetus vesiympäristölle... 1022/2006. Oikeusministeriö. 23. marraskuuta 2006. <https://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2006/20061022>.
- Väylävirasto. 2021. Tieliikenteen liikennemäärät 2012–2021. <https://paikkatieto.vayla-pilvi.fi/arcgis/apps/webappviewer/index.html?id=9303658f44134d5bb82d7e7d55e11644>.
- Wang, Jianlong, Yuanling Zhao, Liqiong Yang, Nannan Tu, Guangpeng Xi ja Xing Fang. 2017. Removal of Heavy Metals from Urban Stormwater Runoff Using Bioretention Media Mix. *Water (Basel)* 9 (11): 854-. <https://doi.org/10.3390/w9110854>.
- Ympäristö.fi. 2020. Ympäristö > ViherKARA – tiedonvaihtoa vihreästä infrastruktuurista. 30. marraskuuta 2020. https://www.ymparisto.fi/fi-fi/elinymparisto_ja_kaavoitus/yhdyskuntarakenne/tietoa_yhdyskuntarakenteesta/ViherKARA.