

---

**BIOPIDÄTYSRAKENNE KOHDENNETUSSA  
HULEVEDEN LAADUNHALLINASSA**



Ammattikorkeakoulun opinnäytetyö

Maisemasuunnittelu

Lepaa, kevät 2014

Mervi Kokkila



LEPAA

Maisemasuunnittelun koulutusohjelma

---

<b>Tekijä</b>	Mervi Kokkila	<b>Vuosi</b> 2014
<b>Työn nimi</b>	Biopidätysrakenne kohdennetussa huleveden laadunhallinnassa	

---

## TIIVISTELMÄ

Biopidätysrakenne on yksi monipuolisimmista hajautetun huleveden hallinnan menetelmistä. Sen lisäksi että, rakenteella voidaan vaikuttaa huleveden määrään ja hulevettä voidaan hyödyntää kasvillisuuden hyväksi, rakenne tarjoaa mahdollisuuden huleveden laadulliseen käsittelyyn. Rakenteessa erilaiset biogeokemialliset prosessit vaikuttavat huleveden laatuun ja rakenne on mahdollista suunnitella kohdennetusti vähentämään hulevedessä olevien aineiden määrää. Tämä edellyttää kuitenkin tietämystä rakenteessa toimivista prosesseista sekä siitä, miten näihin prosesseihin voidaan rakennesuunnittelulla vaikuttaa.

Tämän työn tavoitteena oli koota hulevesien hallinnan suunnittelutyön tueksi työn tilaajalle, Ramboll Finland Oy:lle, ajantasainen tutkimustietoon pohjautuva katsaus biopidätysrakenteen käytöstä kohdennetussa huleveden laadunhallinnassa. Työ pohjautuu pääosin kansainvälisiin ja kotimaisiin vertaisarvioituihin (*peer review*) tutkimusartikkeleihin. Työssä on tarkasteltu kiintoaineen, metallien, typen, fosforin, öljyjen/PAH-yhdisteiden sekä taudinaiheuttajien pidättymisen ja vähenemisen prosesseja biopidätysrakenteessa. Tarkastelun pohjalta on laadittu konsulttityössä sovellettavissa olevaa ohjeistoa biopidätysrakenteen rakennesuunnittelua varten.

Biopidätysrakenteen käyttö huleveden laadunhallinnassa edellyttää huolellista suunnittelua. Erityisesti rakenteessa käytettävän orgaanisen aineksen määrä ja laatu, rakennekerrosten materiaalit ja kerrospaksuudet, kasvillisuus, rakenteen mitoitus ja rakenteen olosuhdevaihtelu vaikuttavat rakenteen kykyyn vähentää ja pidättää huleveden haitta-aineita ja ravinteita. Ylläpitotoimilla, kuten kasvibiomassan säännöllisellä korjuulla, katekerroksen n. 5 vuoden välein tapahtuvalla vaihdolla tai rakenteen pintamaan haraamisella tai vaihdolla voidaan pidentää rakenteen käyttöikä.

**Avainsanat** hulevesien käsittely, biopidätys, suunnittelu, haitta-aineet, ravinteet

Lepaa  
Degree Programme in Landscape Design

---

<b>Author</b>	Mervi Kokkila	<b>Year</b> 2014
<b>Subject of Bachelor's thesis</b>	Bioretention in Targeted Storm Water Quality Control	

---

## ABSTRACT

Bioretention is one of the most multifunctional methods for the decentralized storm water management. Apart from the fact that bioretention can be used for managing water quantity and it allows water utilization for vegetation, it gives an opportunity to manage storm water quality. In the bioretention cell, the biogeochemical processes of a different kind, affect water quality and it is possible to design the structure specifically to reduce the amount of target stormwater pollutant. The prerequisite for this is knowledge about the processes acting in the cell and how to affect those processes by the cell design.

The objective of this thesis was to gather the current scientific knowledge about using the bioretention cell for the targeted water quality goals. The thesis was done for Ramboll Finland Oy to be used as a guideline for designing the bioretention cells in the storm water management planning projects. The thesis is based mainly on the international and domestic peer reviewed scientific papers. The reviewed pollutants and nutrients include TSS (total dissolved solids), metals, nitrogen, phosphorus, oil/PAH compounds and pathogens. The processes which retain and reduce these elements in the bioretention cell were reviewed and the guidelines for designing the bioretention cell to be used in the Ramboll's consulting projects were compiled based on the literature.

A careful design of the bioretention cell is required when the cell is used for the storm water quality control. Especially the amount and the quality of organic matter, the materials used in the different layers, the layer depths, vegetation, the sizing of the cell and the variation in the cell conditions affect the ability of the cell to reduce and to retain the pollutants and nutrients from the runoff. The maintenance activities, like harvesting the plant biomass, the frequent placement of the mulch layer about every five years and the replacement or raking of the top soil layer, will prolong the lifespan of the system.

**Keywords** storm water management, water quality, bioretention, design, pollutants, nutrients

**Pages** 63 p.

# SISÄLLYS

1	JOHDANTO.....	1
2	BIOPIDÄTYSRAKENNE .....	4
3	KIINTOAINE.....	8
3.1	Kiintoaineen prosessit biopidätysrakenteessa .....	8
3.2	Tutkimustuloksia.....	9
3.3	Kirjallisuuteen perustuva rakenneohjeistus.....	11
4	METALLIT .....	14
4.1	Metallien prosessit biopidätysrakenteessa .....	14
4.2	Tutkimustuloksia.....	17
4.3	Kirjallisuuteen perustuva rakenneohjeistus.....	20
5	TYPPI.....	23
5.1	Typen prosessit biopidätysrakenteessa.....	23
5.2	Tutkimustuloksia.....	25
5.3	Kirjallisuuteen perustuva rakenneohjeistus.....	28
6	FOSFORI.....	30
6.1	Fosforin prosessit biopidätysrakenteessa .....	30
6.2	Tutkimustuloksia.....	32
6.3	Kirjallisuuteen perustuva rakenneohjeistus.....	34
7	ÖLJYT JA PAH .....	37
7.1	Öllyjen ja PAH –yhdisteiden prosessit biopidätysrakenteessa .....	37
7.2	Tutkimustuloksia.....	39
7.3	Kirjallisuuteen perustuva rakenneohjeistus.....	41
8	TAUDINAIHEUTTAJAT.....	42
8.1	Taudinaiheuttajien prosessit biopidätysrakenteessa.....	42
8.2	Tutkimustuloksia.....	45
8.3	Kirjallisuuteen perustuva rakenneohjeistus.....	47
9	AJANTASAISEN TIEDON ROOLI KONSULTTITYÖSSÄ .....	49
10	POHDINTA.....	49
10.1	Näkökulmia biopidätysrakenteeseen.....	49
10.2	Näkökulmia opinnäytetyöhön .....	51
	LÄHTEET .....	53



## 1 JOHDANTO

Huleveden hallinta sisältää kolme näkökulmaa. Aiemmin hallinta on keskittynyt huleveden määrään. 1970-luvulta lähtien esimerkiksi Yhdysvalloissa on kuitenkin pyritty kontrolloimaan myös huleveden laatua. Vasta viimeisten 15-20 vuoden aikana esiin on noussut kolmas huleveden näkökulma, jossa hulevesi on nähty arvona ja mahdollisuutena ympäristössä. Tämänäyttöisestä huleveden hallinnasta käytetään Yhdysvalloissa käsitettä *low impact development* (LID), Euroopassa käytössä on *sustainable urban drainage system* (SUDS) ja Australiassa *water sensitive urban design* (WSUD). (Novotny ym. 2010, 186) Suomessa käytössä on usein käsite *luonnonmukainen hulevesien hallinta*, jolla tarkoitetaan Kuntaliitto (2012, 11) mukaan luonnon omien veden kiertoon ja veden laatuun vaikuttavien tekijöiden hyödyntämistä ja tukemista taajamien hulevesien hallinnassa.

Luonnonmukaisen huleveden hallinnan menetelmiä on monenlaisia. Osa menetelmistä soveltuu sijoitettavaksi hajautetusti tiiviiseenkin kaupunkirakenteeseen kun osassa menetelmiä hallittavat vesimäärät ja siten rakenteiden tilantarve ovat suurempia. Menetelmät eivät ole toisistaan erillisiä vaan toisiaan täydentäviä. Yhteistä niille on veden luontaisen kiertokulun ja siihen liittyvän sini-vihreän hierarkkisen infrastruktuurin tukeminen kaupunkirakenteen sisällä.

Eräs tärkeimmistä huleveden luonnonmukaisen hallinnan periaatteista on pyrkimys käsitellä hulevesi mahdollisimman lähellä syntypaikkaansa (Novotny ym. 2010, 100). Hulevesi kerää valuessaan mukaansa pinnoilta runsaasti erilaisia epäpuhtauksia (ks. Tietoiikkuna 1) ja käsittelyllä tarkoitetaan huleveden epäpuhtauksien poistamista eli huleveden laadun parantamista (Kuntaliitto 2012, 10). Biopidätys on yksi hajautettuun huleveden laadunhallintaan soveltuvista menetelmistä.

### TIETOIKKUNA 1

Hulevedessä on mm. metalleja, ravinteita, kiintoainetta, öljyä ja rasvoja, PAH-yhdisteitä, torjunta-aineita sekä taudinaiheuttajia. Eri aineet päätyvät huleveteen mm. ajoneuvojen ja tiemateriaalien kulumisesta, pakokaasuista, rakennusmateriaalien kulumisesta, kuiva- ja märkälasseumasta, eläinten ulosteista, jätevesivuodoista sekä rakennustyömailta.

Liikenne – ja tiealueilta huleveteen kertyy mm. kiintoainetta, metalleja, öljyä ja rasvoja sekä PAH-yhdisteitä. Asuinalueilta tulevissa hulevesissä on puolestaan runsaasti bakteereja ja ravinteita. Viheralueilta kertyy lisäksi hulevesiin mm. torjunta-aineita sekä orgaanista materiaalia. Laskeumana tulee puolestaan mm. PAH-yhdisteitä sekä typen oksideja. Rakennustyömailta huuhtoutuu kiintoainetta ja siihen sitoutuneita aineita sekä rakennustoimintaan liittyviä haitta-aineita, kuten betoniautojen pesuvesiä ja rakennuskemikaaleja.

	ilma-kehä	liikenne	teoll.	katot	asutus	rak.työmaat	nurmi-alueet
kiintoaine	x	x	x		x	x	x
typpi	x	x	x		x	x	x
fosfori	x	x	x		x	x	
metallit	x	x	x	x	x		
PAH-yhdisteet	x	x	x		x		
öljyt ja rasvat		x	x		x	x	
taudinaiheuttajat					x		x

Taulukko: Valtanen (2012, 6) eri lähteistä (Massachusetts Department of Environmental Protection and Massachusetts Office of Coastal Zone Management 1997, House ym. 1993, D'arcy ym. 2000, Moy ym. 2003) koostama

Lähteet: Kuntaliitto 2012, 124-127; Valtanen ym. 2010, 6

Lisätietoa huleveden laadusta mm. Kotola ja Nurminen (2003) tutkimuksesta.

Esimerkki huleveden laatuksista Tukholmasta:  
<http://www.stockholmvatten.se/commdata/rapporter/avlopp/dagvatten/dagvattenklassificeringdel2.pdf> haettu 16.4.2014

Biopidätyksessä hulevesi ohjataan rakenteeseen, jossa erilaiset maaperään ja sen mikrobistoon sekä rakenteen kasvillisuuteen liittyvät prosessit viivyttävät, vähentävät ja puhdistavat hulevettä. Biopidätysrakenteen pohjaosasta maaveden voidaan joko antaa edelleen suotautua pohjavedeksi tai ohjata se osittain tai kokonaan salaojituksella eteenpäin hulevesijärjestelmässä. Huleveden laadun- ja määränhallinnan ohella biopidätykseen sisältyy myös huleveden hallinnan kolmas näkökulma, sillä vesi saadaan biopidätyksellä näkyväksi osaksi kaupunkirakennetta ja sitä voidaan hyödyntää mm. kasvillisuuden käyttöön.

Biopidätyksen etuna muihin rakenteisiin nähden on sen rakenteellinen joustavuus. Eri tavoin toteutettuna rakenne on sijoitettavissa yhtäläillä piha-alueelle, katujen varsille kuin torialueellekin. Rakenteen rakennekerroksia ja rakenneosia säätämällä on puolestaan mahdollista toteuttaa huleveden laatuun eri tavoin vaikuttavia biopidätysrakenteita.

Biopidätys -käsitteen (*bio retention*) ohella käytetään myös käsitettä biosuodatus (*biofiltration*) ja huleveden imeyttämistä painotettaessa voi käytössä olla myös imeytyspainanteen / bioimeytyksen käsite (*bioinfiltration*). Tässä työssä rakenteesta käytetään käsitettä biopidätys, koska käsite ”biosuodatus” jättää helposti huomiotta muut rakenteessa huleveden laatua parantavat biogeokemialliset prosessit kuin huleveden suodatuksen. Biopidätys tuo myös biosuodatus -käsitettä paremmin esille sen, että rakenteen tavoitteena on huleveden hallinnan näkökulmasta pidättää hulevedessä olevia haitta-aineita ja ravinteita rakenteeseen. Tällöin rakenteen kokonaistoiminnan arvioinnissa tärkeäksi tulee rakenteen alkuperäisen pidätyskyvyn lisäksi rakenteen toiminta pitkällä aikavälillä. Koska rakenteessa toimii erilaisia biogeokemiallisia prosesseja, joihin rakenteen olosuhteet vaikuttavat, tulee



patogeeniä. Harmaissa jätevesissä on puolestaan erilaisia puhdistusaineista peräisin olevia kemikaaleja. Rakenteellisesti maimeyttämöissä ja –suodattamoissa vesi johdetaan selkeytyksen jälkeen suoraan rakenteen sisään ilman biopidätyksessä tyypillistä veden imeyttämistä rakenteen pinnan lammikoitumistilasta (LUOKO 2007, 4-15.). Lisäksi biopidätyksessä kasvillisuuden rooli rakenteen toiminnassa on keskeinen toisin kuin maasuodattamoissa ja –imeyttämöissä.

Tässä opinnäytetyössä keskitytään biopidätykseen huleveden laadunhallinnassa. Näin ollen edellä kuvatut liittymäpinnat eivät suoraan sisälly työn aihepiiriin. Biopidätyksen osalta työ rajataan käsittelemään ainekohtaisia biopidätyksen prosesseja sekä rakenneominaisuuksia, joilla näihin prosesseihin voidaan vaikuttaa. Tällä työn rajauksella pystytään syventymään riittävästi melko monimutkaisiin ainekohtaisiin prosesseihin ja vahvistamaan biopidätyksen perusprosessien tietämystä. Ainekohtaisten prosessien tuntemuksen katsotaan parhaiten mahdollistavan aiheen jatkotyöstäminen ja huleveden laadun parantamiseen tähtäävien biopidätysrakenteiden kokonaissuunnittelun.

Tämän työn tavoitteena on koota ajantasainen tutkimustieto biopidätysrakenteen käytöstä kohdennetussa huleveden laadunhallinnassa. Työssä laaditaan tutkimustietoon pohjautuvaa rakenneohjeistusta biopidätysrakenteen suunnittelun tueksi Ramboll Finland Oy:lle.

Aiheen tarkastelu tehdään erikseen seuraaville huleveden laatua heikentäville aineille: kiintoaine, metallit, typpi, fosfori, öljyt/PAH-yhdisteet sekä taudinaiheuttajat. Tarkastelussa käytetään lähteenä aihepiirin käsittelyä tukevaa kansainvälistä ja kotimaista tutkimustietoa, joista pääosa on julkaistu vertaisarvioituissa (*peer review*) tieteellisissä sarjajulkaisuissa. Kaikkien aineiden tarkastelu sisältää kolme osaa. Aluksi käydään läpi kyseisen huleveden laatua heikentävän aineen prosesseja biopidätysrakenteessa. Tämän osan tarkoituksena on kuvata vaikutussuhteita ja prosesseja, joihin kyseinen aine rakenteessa osallistuu tai joita siihen rakenteessa kohdistuu. Tämän jälkeen käydään läpi tutkimuksia, joita kyseisen aineen käyttäytymisestä biopidätysrakenteessa on tehty. Lopuksi kootaan prosessien ja tutkimustiedon pohjalta rakenneohjeistusta, jolla biopidätysrakennetta voidaan kohdentaa kyseisen aineen vähentämiseen.

## 2 BIOPIDÄTYSRAKENNE

Ensimmäiset huleveden käsittelyyn tarkoitetut biopidätysrakenteet otettiin Roy-Poirier ym. (2010) mukaan käyttöön Yhdysvalloissa 1990-luvun alkupuolella. Ensisijaisena tavoitteena oli parantaa kaupunkiympäristön huleveden laatua lähellä huleveden syntypaikkaa. Tämän jälkeen menetelmää on tutkittu paljon sekä laboratorio- että kenttäkokeissa. Roy-Poirier ym. (2010) tarjoavat yleiskatsauksen aihepiirin tutkimuksista.

Suomessa biopidätystä on tutkittu viime vuosina mm. Stormwater – tutkimushankkeessa v. 2008-2011 sekä käynnissä olevassa HULEGREEN

-hankkeessa. Komulainen (2012) on puolestaan tarkastellut diplomityössään biosuodatuksen materiaaleja, kunnossapitoa ja kustannuksia Suomen ilmasto-oloissa. Työssä on keskitytty tarkastelemaan talviolosuhteiden vaikutusta biosuodatusrakenteen toimintaan sekä rakenteen kunnossapitotarpeita. Työn rajauksen ulkopuolelle on jätetty materiaalien ja kasvien haitta-aineiden pidättämismekanismit.

Suomen ympäristökeskuksen hallinnoimassa tutkimushankkeessa (HULEGREEN, v. 2012-2016) testataan mm. katualueen hulevesien biosuodatusta ajoväylän ja kevyen liikenteen väylän väliin sijoittuvassa biosuodatuspainanteessa Vantaan Tikkurilassa (Ilmasto-opas 2013; Syke 2013). Stormwater –hankkeen tavoitteena oli etsiä uusia huleveden määrän ja laadun hallinnan ratkaisuja perinteisen tulvasuojelun ja verkostoratkaisujen rinnalle. Hankkeessa tarkasteltiin huleveden laatua ja määrää maankäytöltään erilaisilla alueilla (Valtanen ym. 2012a; Hujanen ja Sänkiäho 2012; Hätinä ym. 2012). Tämän lisäksi tarkasteltiin imeytyskokeilla Hollolassa pohjaveden muodostumisalueella sijaitsevan teollisuusalueen maaperän soveltuvuutta biosuodatukseseen (Hätinä ym. 2012) sekä lysimetrikokeella hulevesien biosuodatusta kylmässä ilmastossa (Valtanen ym. 2012b).

Tutkimusten mukaan huleveden ohjaamisella biopidätysrakenteeseen voidaan vaikuttaa sekä huleveden määrään että laatuun. Biopidätyksellä voidaan pienentää hulevesivaluntaa ja valuntahuippuja (mm. Hunt ym. 2008; Hatt ym. 2009; Trowsdale & Simcock 2011). Huleveden laatuun biopidätys vaikuttaa esimerkiksi pidättämällä haitta-aineita maakerrokseen, muuntamalla aineita toiseen muotoon sekä vähentämällä aineita biopidätysrakenteen mikrobiston sekä kasvillisuuden avulla. Tutkimuksissa on todettu, että biopidätyksellä voidaan vähentää huleveden:

- kiintoaineen määrää (mm. Hsieh & Davis 2005; Bratieres ym. 2008; Hunt ym. 2008; Hatt ym. 2009; Blecken ym. 2010; Khan ym. 2012b)
- raskasmetallien määrää (mm. Hsieh & Davis 2005; Muthanna ym. 2007a ja 2007b; Hunt ym. 2008; Blecken ym. 2009a ja 2009b; Hatt ym. 2009; Trowsdale & Simcock 2011)
- ravinteiden määrää (mm. Bratieres ym. 2008; Hunt ym. 2008; Hatt ym. 2009; Blecken ym. 2010; Zhang ym. 2011a; Khan ym. 2012b)
- öljyjen määrää (Hsieh & Davis 2005; Hong ym. 2006)
- polysyklisen aromaattisten hiilivetyjen (PAH) määrää (DiBlasi ym. 2009)
- taudinaiheuttajien määrää (Rusciano & Obropta 2007; Hunt ym. 2008; Hathaway ym. 2011; Zhang ym. 2011b; Zhang ym. 2012)

Biopidätyksen osalta on kuitenkin erittäin tärkeää ottaa huomioon, että erilaisiin kemiallisiin, fysikaalisiin ja biologisiin prosesseihin perustuvan biopidätyksen tehokkuus määräytyy rakenteen rakenneominaisuuksien ja hetkellisten olosuhteiden perusteella. Joissain tapauksissa huleveden laatu voi jopa huonontua biopidätysrakenteessa. Tutkimuksissa on havaittu

esimerkiksi typpeä (Hatt ym. 2009; Yang ym. 2009; Blecken ym. 2010; Valtanen ym. 2012), fosforia (Khan ym. 2012b) rautaa (Hunt ym. 2008) ja kuparia (Trowsdale & Simcock 2011) huuhtoutuvan joissain oloissa biopidätysrakenteesta. Näin ollen yhtä kaikissa olosuhteissa toimivaa ja erilaatuisen huleveden käsittelyyn soveltuva biopidätysrakennetta ei ole olemassa, vaan biopidätysrakenteen suunniteltava tapauskohtaisten huleveden määrän- ja laadunhallinnan tavoitteiden pohjalta. Tämä edellyttää tietämystä huleveden mukana kulkevien aineiden ominaisuuksista erilaisissa olosuhteissa sekä siitä, miten aineiden ominaisuuksiin ja esiintymiseen voidaan biopidätysrakenteella vaikuttaa.

Biopidätysrakenteessa on kaikissa tapauksissa erotettavissa tiettyjä perusosia (Taulukko 1), mutta osien ominaisuudet ja siten rakenteen toiminnan painotukset tulisi suunnitella kohdekohtaisten tavoitteiden perusteella. Tällainen biopidätysrakenteen optimointi tiettyjen tavoitteiden suhteen on vielä vähän sovellettu toimintatapa. Osaltaan tähän on vaikuttanut se, että vasta vähitellen tietämyksen taso biopidätysrakenteen toiminnasta on kasvanut sille tasolle, että erilaisten vaikutussuhteiden ja – prosessien määrittely on ollut ylipäätään mahdollista.

Vaikka yksittäisissä tutkimuksissa on esitetty biopidätysrakenteen kehittämismahdollisuuksia jo aiemmin, vasta Davis ym. (2009) esittivät ensimmäisen koosteen, jossa pyrkimyksenä oli selvästi arvioida biopidätysrakenteeseen liittyvän tietämyksen tasoa käytännön rakennesuunnittelun näkökulmasta. Toisaalta yhtälailla vasta viime vuosina on ilmestynyt synteisiin pyrkiviä tarkasteluja siitä, miten eri aineet käyttäytyvät biopidätysrakenteessa. Collins ym. (2010) esittävät tällaisen tarkastelun hulevedessä olevan typen, Roy-Poirier ym. (2009) fosforin osalta ja tuoreimpana Kabir ym. (2014) metallien osalta. Hunt ym. (2012) kokoavat katsauksessaan yhteen prosessiperusteisia tarkasteluja ja luovat tutkimustietoon pohjautuvaa ohjeistoa biopidätysrakenteen suunnittelun tueksi. Clark ja Pitt (2012) puolestaan esittävät koosteen prosesseista ja mekanismeista, joilla voidaan vaikuttaa hulevedessä olevien erilaisten haitta-aineiden määrään.

Taulukko 1. Biopidätysrakenteen rakennosat (Valtanen ym. 2010; Viherympäristöliitto 2011, 31-33; Hunt ym. 2012)

Rakenneosa	kuvaus
<b>kasvillisuus</b>	vaihtelevissa kasvuolosuhteisissa menestyvä kasvillisuus; juuriston rakenne ja laajuus vaikuttaa rakenteen toimintaan
<b>lammikoitumistila</b>	rakenteessa käsiteltävän huleveden lyhytaikaiseen varastointiin; syvyys korkeintaan 300-500 mm (Viherympäristöliitto 2011)
<b>ylivuoto</b>	huleveden hallinnan varojärjestelmä, joka ohjaa tulvatilanteissa rakenteen kapasiteetin ylittävän hulevesimäärän käsittelemättömänä pois rakenteesta
<b>katekerros</b>	mahdollinen; yleensä 50-70 mm kerrospaksuus; katteen ominaisuuksista tärkeitä ovat

	mm. katekerroksen hyvä vedenläpäisevyys sekä katemateriaalin pysyminen paikallaan tulvatilanteessa; katteena voidaan käyttää sekä orgaanista että epäorgaanista ainesta; orgaanista katetta käytettäessä on tärkeää, että rakenne kykenee hallitsemaan aineksen hajotessa vapautuvat ravinteet
<b>kasvu-/käsittelykerros</b>	maakerros, jonka ominaisuuksista huleveden laatuun vaikuttavat mm. kerrospaksuus, lajitekoostumus ja maalajitteiden kemialliset ominaisuudet, orgaanisen aineksen määrä ja laatu, happamuus, lämpötila, kosteus, mikrobitoiminta ja kasvien juuristo; kerrospaksuutena on käytetty yleisesti 600-900 mm
<b>siirtymäkerros</b>	maakerros, jonka tarkoituksena on rakenteellisesti vaihtaa kasvu-/käsittelykerros imeytys-/salaojakerrokseksi; joissakin rakennesimerkeissä siirtymäkerros on korvattu suodatinkankaalla; suodatinkankailla tukkeutuminen mahdollista, jolloin rakenteen toiminta muuttuu alkuperäisestä
<b>imeytys-/salaojakerros</b>	maakerros, jonka tarkoituksena on kerätä rakenteen läpi suotautunut hulevesi ja imeyttää se mahdollisuuksien mukaan pohjamaahan tai mikäli imeyttäminen ei ole mahdollista, johtaa se eteenpäin hulevesijärjestelmässä; salaojaputki mahdollinen; salaojan korkeusasemalla voidaan säätää pohjavedeksi imeytettävän maaveden määrää
<b>pohjamaa</b>	rakenteen alapuolella (ja sivuilla) oleva maa-aines, jonka ominaisuuksista erityisesti vedenjohtavuus vaikuttaa biopidätysrakenteen suunnitteluun ja toimintaan; yleensä pohjamaan vedenjohtavuuden tulee olla vähintään $1 \cdot 10^{-6}$ m/s (karkea siltti tai hiekka)

Komulainen (2012) tarkasteli biopidätysrakennetta diplomityössään kirjallisuuden ja tapaustutkimuksen pohjalta sekä laati rakennesuunnitelman biopidätysalueesta Vantaan Vehkalaan. Työssä suositellaan, että biopidätysrakenteessa käytettäisiin Suomen oloissa hiekkaista maata (hiekkaa yli 90 %). Tällöin maa-aines kykenee johtamaan vettä tarpeeksi nopeasti ja riski rakenteen jäätymiselle umpeen talvella pienenee. Nopea vedenjohtaminen rakenteen läpi voi toisaalta heikentää rakenteen kykyä pidättää haitta-aineita. Biopidätysrakenteen suunnittelu on siten tältä osin tasapainoilua mm. rakenteen määrällisen käsittelykapasiteetin, laadullisen käsittelykyvyn sekä kasvillisuuden menestymisedellytysten välillä.

### 3 KIINTOAINENE

#### 3.1 Kiintoaineen prosessit biopidätysrakenteessa

Kiinteä aines voi olla vedessä liukenemattomana tai liuenneena. Kiintoaineella (TSS, *total suspended solids*) tarkoitetaan veden mukana kulkevaa orgaanista tai epäorgaanista ainesta, joka voidaan suodattaa vedestä käyttämällä suodatinta, jonka huokoskoko on 2 µm (tai pienempi). Suodattimen läpäissyt aines on liennuttua ainesta (TDS, *total dissolved solids*). (Bhargava 2009, 10) Biopidätyksessä hulevedessä olevan kiintoaineen poisto perustuu huleveden suodattamiseen maarakenteen läpi. Mekanismitaan poisto perustuu rakenteen huokoskoko suurempien hiukkasten kerrostumiseen sedimentoitumalla rakenteen päälle ja huokoskoko pienempien hiukkasten adsorptioon maa-aineshiukkasten pinnalle (Water treatment 2010, 106) (Kuva 2).



Kuva 2. Kiintoaineen suodatuksen mekanismit

Li ja Davis (2008a ja 2008b) ovat tarkastelleet kiintoaineen pidättymistä biopidätysrakenteeseen sekä teoreettisesti että laboratoriokokeiden avulla. Tulosten (Li & Davis 2008a) mukaan suurin osa huleveden sisältämästä kiintoaineesta pidättyy biopidätysrakenteen pintakerrokseen. Hiukkaset tunkeutuivat testissä käytetyssä hiekkaisessa maa-aineksessa enimmillään n. 20 cm:n syvyyteen. Rakenteen pintakerroksen vedenläpäisevyys heikkenee kertyvän kiintoaineen täyttäessä maa-aineksen huokosia ja ajan myötä rakenne tukkeutuu ilman ylläpitotoimia.

Rakenteen tukkeutumiseen vaikuttavat kiintoaineen hienoainespitoisuus ja hulevesikuormituksen ajallinen vaihtelu. Suuret kiintoaineshiukkaset jäävät rakenteen pintaosaan, mutta pienemmät hiukkaset tunkeutuvat rakenteen huokostoon ja ovat siten kriittisempiä rakenteen tukkeutumisen kannalta. Rakenteen kuivuminen sadetapahtumien välillä parantaa rakenteen kykyä ylläpitää huokoston vedenjohtavuutta ja sallii suuremman kiintoainekuormituksen ennen rakenteen tukkeutumista. Kuivan jakson aikana tapahtuu helpommin huokoston virtausreittien mukautumista kuin jos rakenne on koko ajan hydraulisesti kuormitettu. Osaltaan tähän

vaikuttaa myös biopidätysrakenteen maa-aines, joka on tavalliseen hiekkasuodattimeen verrattuna plastisempaa ja biologisesti sekä kemiallisesti aktiivisempaa. (Li & Davis 2008a) Tukkeutumisen ja vedenjohtavuuden osalta on kuitenkin syytä ottaa huomioon myös Li ja Davis (2008a) huomio siitä, että tutkimus perustui sylinterikokeisiin, jolloin esimerkiksi kasvillisuuden ja maaperän pieneliöstön toiminnan vaikutukset maaperän vedenjohtavuuden ylläpitoon jäivät huomiotta.

Tukkeutuminen ei välttämättä aiheudu pelkästään rakenteeseen kertyvästä kiintoaineesta, vaan siihen vaikuttaa myös rakenteen maa-aineksen tiivistyminen (Le Coustumer, 2012). Katekerros voi edistää rakenteen vedenjohtavuuden säilymistä vähentämällä kiintoaineen pääsyä maa-ainekseen (Hsieh ym. 2007) sekä suojaamalla maa-aineksen pintaa tiivistymiseltä ja liettymiseltä. Katemateriaali ei saisi nousta tulvatilanteessa kellumaan veteen jolloin sen tarjoama suojavaikutus häviää. (Simcock ja Dando 2013, 6) Veden mukana kulkeutuva katemateriaali voi myös tukkia ylivuotorakenteita tai alapuolisella valuma-alueella olevia huleveden hallintarakenteita. Mikäli hulevesi syötetään rakenteeseen pistemäisesti tulee kiinnittää erityistä huomiota huleveden syöttökohdan rakenteelliseen kestävyYTEEN. Orgaanista irtokatetta paremmin syöttökohdan vesikuormaa voi kestää jollakin tavalla sidottu orgaaninen kate tai karkeasta kiviaineksesta tehty kate.

Le Coustumer ym. (2012) ovat tutkineet kasvillisuuden vaikutusta maaperän vedenjohtavuuden ylläpidossa. Laboratoriokokeen perusteella kasvillisuuden juuristolla on merkittävä vaikutus maaperän vedenjohtavuuteen ja myös kasvilajien välillä on eroa vedenjohtokyvyn ylläpidossa. Kokeessa paksujuuriset kasvit kykenivät ylläpitämään maaperän vedenjohtavuutta, kun ohutjuurisilla lajeilla tätä kykyä ei ollut. Ohutjuuriset lajit (tutkimuksessa *Carex appressa*) muodostivat tiheen juuriverkon rakenteen pintaosaan, eivätkä kyenneet ylläpitämään maaperän vedenjohtavuutta. Myös Hatt ym. (2009) havaitsivat kasvillisuuden tärkeyden biopidätysrakenteen vedenjohtokyvyn ylläpidossa ja rakenteen tiivistymisen estämisessä.

### 3.2 Tutkimustuloksia

Kiintoaine pidättyy tutkimusten mukaan biopidätysrakenteeseen hyvin ja rakenne toimii kiintoaineen pidättäjänä myös kylmässä ilmastossa. Hsieh ja Davis (2005) tarkastelivat sylinterikokeen avulla biopidätysrakenteen maa-aineksen vaikutusta mm. kiintoaineen pidättymiseen. Hunt ym. (2008) puolestaan tutkivat kahden vuoden ajan biopidätysrakenteen toimintaa Pohjois-Carolinassa. Bratieres ym. (2008) selvittivät laboratoriokokeessa monipuolisesti erilaisten biopidätysrakenteiden toimintaa tarkoituksenaan tuottaa tietoa optimaalisen rakenteen suunnittelun tueksi. Hatt ym. (2009) tutkimuksessa tarkasteltiin kolmen biopidätysrakenteen toimintaa Australiassa. Blecken ym. (2010) tekemissä laboratoriokokeissa erityishuomio kohdistettiin biopidätyksen toimivuuteen viileissä olosuhteissa (2° C, 7° C ja 20° C). Khan ym. (2012) tutkimuksessa tarkastelun kohteena oli biopidätyksen toimivuus olosuhteissa, joissa talven kuluessa tapahtuu lukuisia sulamis-jäätymis -syklejä. Brown ja

Hunt (2011b) puolestaan kohdistivat tutkimuksessaan huomionsa hulevesimäärään nähden alimitoitettuun biopidätysrakenteeseen, johon lisäksi oli muodostunut hienoaineksesta vettä huonosti läpäisevä pintakerros.

Hsieh ja Davis (2005) sylinterikokeessa biopidätysrakenteen maa-aines pidätti 29 %:sta yli 96 %:in rakenteeseen johdetun keinotekoisien huleveden sisältämästä kiintoaineesta. Eniten kiintoainetta ulosvirtauksessa tuli sylinteristä, jossa maa-aines sisälsi runsaasti savea (19 %) ja silttiä (15%), ja tutkimuksessa esitetyn arvion mukaan osa ulosvirtauksen kiintoaineesta olikin peräisin rakenteesta käytetystä maa-aineksesta. Oletettavasti kiintoaineen määrä rakenteen purkuvedessä vähenee alun huuhtoumavaiheen jälkeen. Tämä vaihe voi kuitenkin kestää varsin pitkään kuten Hunt ym. (2008) tutkimuksessa, jossa aineshuuhtoma itse rakenteesta ei juurikaan pienentynyt rakentamista seuranneen kahden vuoden tarkastelujakson aikana.

Joissakin biopidätyksen rakenne-esimerkeissä kasvu- ja suodatuskerroksen ja imeytys- ja salaojakerroksen välille on esitetty asennettavaksi suodatinkangas, jonka tarkoituksena on estää kasvu- ja suodatuskerroksen maa-aineksen kulkeutuminen salaojakerrokseen. Kiintoaineen huuhtouman vuoksi biopidätysrakenteeseen ei kuitenkaan kannata asentaa helposti tukkeutuvia suodatinkankaita, vaan tarvittaessa rakennekerrosten välille asennetaan erillinen siirtymäkerros sopivasta maa-aineksesta.

Siirtymäkerroksen maa-aineksen lajitekoolle on kuvattu kriteereitä esimerkiksi Australiassa. Water by design (2012, 102) ohjeiston mukaan siirtymäkerroksen tulisi olla 100 mm paksu ja materiaalina tulisi käyttää suhteistunutta hiekkaa, jossa on alle 2 % hienoja lajitteita. Kasvu- ja suodatuskerroksen sekä siirtymäkerroksen maa-aineksen osalta kriteeriksi on asetettu:

$$d_{15} \text{ (siirtymäkerros)} \leq 5 \cdot d_{85} \text{ (kasvu- ja suodatuskerros)}, \quad (1)$$

jossa  $d_{15}$  ja  $d_{85}$  ovat eri kerrosten maa-aineksen rakeisuuskäyrien läpäisyprosentteja 15 ja 85 vastaavia raeläpimittoja. Samantyyppinen kriteeri on asetettu myös siirtymäkerroksen ja salaojakerroksen materiaalin välille, jotta siirtymäkerroksen hiekka ei kulkeudu tukkimaan salaojakerrosta.

Biopidätysrakenne tukkeutuu herkästi kiintoaineesta jo rakentamisaikana, mikäli rakenne toteutetaan etupainotteisesti suhteessa muuhun alueen rakentamiseen ja työmaanaikaista hulevesien hallintaa ei hoideta asianmukaisesti. Tämä käy hyvin konkreettisesti ilmi Brown ja Hunt (2011b) ja (2012) tutkimuksista, joissa tarkasteltiin rakennus- ja suunnitteluvirheiden vuoksi suorituskyvyltään vajaaksi jäänyttä biopidätysrakennetta. Alueen rakennusvaiheessa biopidätysrakenne oli tehty valmiiksi ennen viereisen paikoitusalueen päällystetöitä ja rakenne oli suojattu geotekstiilillä paikoitusalueen työmaalta valuneiden hulevesien kiintoaineelta. Geotekstiilin aukotus oli kuitenkin liian suuri, jolloin hienoaines suotautui tekstiilin läpi ja muodosti rakenteen pinnalle

mattomaisen huonosti vettä läpäisevän kerroksen. Rakenne saatiin toimimaan suunnitellusti vasta pintakerroksen poiskuurimisen jälkeen.

Biopidätysrakenne voi toimia tehokkaana kiintoaineen pidättäjänä myös talvikaudella. Tähän tulokseen ovat tulleet Blecken ym. (2010) ja Khan ym. (2012b). Tämä ei ole yllättävää, sillä kiintoaineen pidättyminen biopidätysrakenteeseen perustuu suotautumiseen ja sedimentoitumiseen. Nämä mekanismit voivat toimia rakenteessa myös talvella, mikäli rakenne säilyy vettäläpäisevänä.

### 3.3 Kirjallisuuteen perustuva rakenneohjeistus

Kiintoaineen pidättäminen biopidätysrakenteeseen onnistuu tehokkaasti hyvin monenlaisilla rakennevaihtoehdoilla, kuten Bratieres ym. (2008) ovat laboratoriokokeessa ja Hatt ym. (2009) kenttäkokeessa osoittaneet. Näin ollen rakenteen suunnittelun kannalta kiintoaineen vähentämistavoite ei aseta rakenteelle erityisvaatimuksia. Toisaalta kiintoaineen kertyminen vaikuttaa huomattavasti rakenteen muuhun toimintakykyyn, joten kiintoaineen osalta huomio kannattaakin suunnata ratkaisuihin, jotka vähentävät kiintoaineen päätymistä rakenteeseen ja helpottavat rakenteeseen päätyneen kiintoaineen poistoa. Ongelmaksi ei tässä niinkään muodostu rakenteen pinnalle tai esiselkeytykseen jäävän karkean kiintoainejakeen poisto, vaan syvemmälle rakenteen maa-ainekseen huleveden mukana tunkeutuva hienoainesjake.

Biopidätysrakenne on suojattava huolellisesti kiintoaineelta tapauksissa, joissa rakenne toteutetaan etupainotteisesti muuhun alueen rakentamiseen nähden. Rakenteen suojana voidaan käyttää esimerkiksi rakennusaikaista kiintoainesuojaa (*silt fence*) (Kuva 3), jolla estetään kiintoaineen pääsy rakenteeseen.



Kuva 3. Rakentamisaikaisen kiintoainekuormituksen vähentämistä varten asennettu suojaus (*silt fence*)  
[http://www.nilex.com/products/sediment\\_control/silt\\_fence](http://www.nilex.com/products/sediment_control/silt_fence)

Rakenteen suunnittelun näkökulmasta avain rakenteen pitkäaikaiseen toimivuuteen on oikea mitoitus. Valuma-alueeseensa nähden liian pienikokoiset rakenteet altistuvat suorituskykyynsä nähden liian suurelle hydrauliselle ja kiintoainekuormitukselle ja tukkeutuvat sekä menettävät

vedenjohtavuuttaan oikein mitoitettuja rakenteita nopeammin. Le Coustumer ym. (2012) tutkivat valuma-alueen pinta-alaan nähden erikokoisia rakenteita. Kaikissa rakenteissa vedenjohtavuus pieneni 39:n koeviikona aikana, mutta pienikokoisilla rakenteilla (0,7 ja 1 % valuma-alueen koosta) vedenjohtavuus kokeen lopussa oli vain 3 mm/h, kun 4 %:n mitoituksella vedenjohtavuus oli 125 mm/h. Hydrauliseen kuormitukseen ja mitoitukseen liittyy myös Li ja Davis (2008a) huomio rakenteen ajoittaisen kuivahtamisen vedenjohtokykyä palauttavasta vaikutuksesta.

Oikean mitoituksen ohella säännöllinen ylläpito pidentää rakenteen käyttöikää. Li ja Davis (2008a) suosittelevat ylläpitotoimina silmämääräistä rakenteen toiminnan tarkkailua kerran tai kaksi kertaa vuodessa sekä rakenteen pintakerroksen (5-20) cm vaihtoa n. viiden vuoden välein. Pintakerroksen vaihtotarpeeseen ja mahdollisuuteen vaikuttavat luonnollisesti myös muut rakenteen ominaisuudet (kuten kasvillisuus) sekä rakenteelle asetetut muut hydrologiset ja/tai laadulliset tavoitteet.

Kiintoaineen pääsyä rakenteeseen voidaan tarvittaessa rajoittaa erilaisilla esikäsittelymenetelmillä. Niiden tarkoituksena on estää rakenteen toimintaa heikentävän kiintoainekerroksen kasautuminen rakenteeseen sekä helpottaa kertyneen kiintoaineen poistoa. Esikäsittelymenetelmän valinnassa tulee ottaa huomioon mm. valuma-alueen koko, odotettavissa olevaa kiintoainekuorma sekä ylläpitomenetelmä ja -väli. Tarvittavan esikäsittelyrakenteen tilavuutta (V) voi arvioida kaavalla (2)

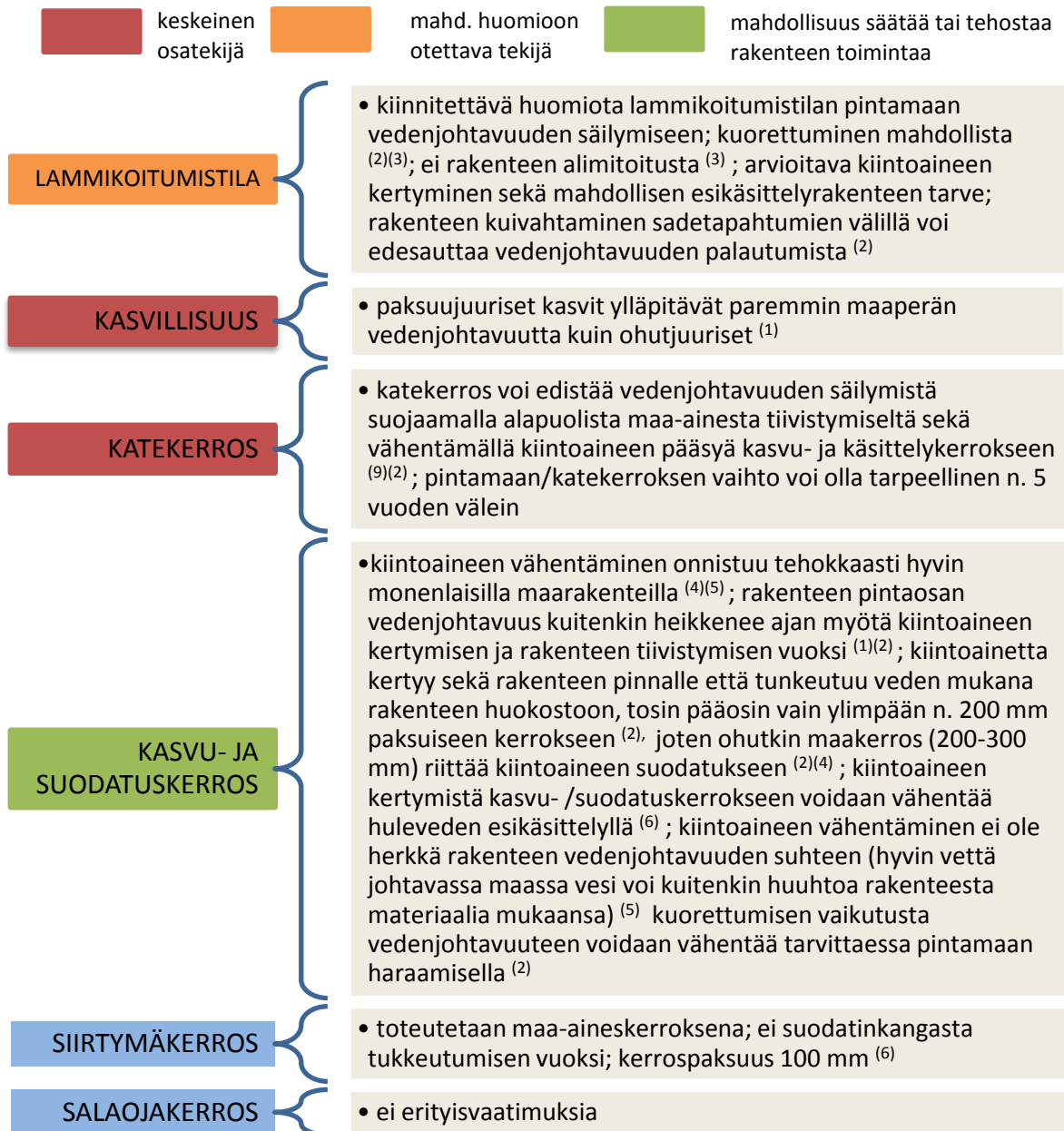
$$V = A \cdot R \cdot L \cdot F \quad (2)$$

jossa A on rakenteen valuma-alueen pinta-ala (ha), R kiintoaineen vähennystehokkuus (esim. 0,8), L kiintoaineen vuosikuormitus (m<sup>3</sup>/ha/v) ja F on käsittelyrakenteen tyhjennysväli (v). Pienillä valuma-alueilla ei välttämättä tarvita erillistä esikäsittelyä. Esimerkiksi Australiassa esikäsittelyä suositellaan, kun biopidätysrakenteen valuma-alue on yli 2 ha ellei rakenne sijaitse poikkeuksellisella alueella. (Water by design 2012, 69-70)

Biopidätysrakennetta voi tarkastella myös erilaisten osarakenteiden ketjuna, jossa osarakenteilla on erilainen puhdistustehtävä. Rakenneketjun alkuosassa puhdistus painottuu kiintoaineen vähentämiseen ja tällöin esimerkiksi huleveden syöttökohtaan asennettu helposti vaihdettava ja kiintoainetta suodattava erillinen osarakenne voisi olla toimiva ratkaisu. Karjatiloiilla on kokeiltu jaloittelutarhasta kertyvän valumaveden suodattamisessa esimerkiksi olkiturve- ja olkihakesuodattimia (Puumala 2003). Tällöin pääpaino on kuitenkin ollut ravinteiden vähentämisessä. Biopidätysrakenteessa orgaanista suodatinta voitaisiin kokeilla erityisesti kiintoaineen pidättämiseen ja suodattamiseen rakenteen alkuosassa.

## Biopidätysrakenteen kohdennetussa huleveden laadunhallinnassa

Taulukko 2. Kooste kiintoainetta pidättävän biopidätysrakenteen rakenneosista (Le Coustumer ym. 2012 (1); Li ja Davis 2008 a (2); Brown ja Hunt 2012 (3) Bratieres ym. 2008 (4); Hatt ym. 2009 (5); Water by design 2012 (6); Blecken ym. 2010 (7); Khan ym. 2012 b (8); Simcock ja Dando 2013 (9) )



### Lisäksi:

- kiintoainetta kannattaa poistaa hulevedestä esikäsittelyllä jo ennen veden johtamista varsinaiseen biopidätysrakenteeseen; esikäsittelyn osalta voidaan tarkastella myös mahdollisuuksia erillisen kiintoainetta suodattavan ja pidättävän osarakenteen käyttöön lähellä huleveden syöttökohtaa
- rakennusaikaisessa hulevesien hallinnassa estetään rakennesuojauksilla kiintoainekuormituksen pääsy biopidätysrakenteeseen
- erityisesti hienojakoisimman kiintoaineen mukana pidättyy myös mm. raskasmetalleja ja fosfaattia (ks. luku 4.1)
- ei rakenteen alimitoitusta; jos rakenteen pinta-ala valuma-alueeseensa nähden on alle 1 %, voi rakenteen vedenjohtavuus alentua lyhyessä ajassa rakenteen toimivuuden kannalta liian pieneksi <sup>(1)</sup>

- rakenteen kuivahtaminen sadetapahtumien välillä voi edesauttaa vedenjohtavuuden palautumista <sup>(2)</sup>;
- rakenne voi toimia kiintoaineen pidättäjänä myös talvella <sup>(7)(8)</sup>
- mikäli ylivuoto toteutetaan kaivorakenteella, tulee roskat ja kasvitähteet poistaa säännöllisesti kaivon kansiosasta ja kaivo tyhjentää kiintoaineesta

## 4 METALLIT

### 4.1 Metallien prosessit biopidätysrakenteessa

Eri lähteissä potentiaalisiksi myrkyllisiksi metalleiksi, epämetalleiksi tai puolimetalleiksi luetaan n. 25 alkuainetta (Khan 2010, 9-10; Johnson ym. 2011, 117-118). Osa näistä aineista on pieninä määrinä välttämättömiä hivenaineita (esim. kupari, sinkki, rauta ja seleeni) mutta suurempina määrinä ne ovat eliöille myrkyllisiä ja osa aineista on jo pieninä määrinä haitallisia eliöille (esim. elohopea, arseeni, kadmium ja lyijy) (Khan 2010, 59). Nisäkkäille suun kautta nautittuna myrkyllisiksi aineiksi luetaan mm. arseeni ja antimoni (*erittäin myrkyllisiä*), kadmium, kupari, elohopea, lyijy, vanadiini (*kohtalaisen myrkyllisiä*) sekä alumiini, molybdeenin ja sinkki (*vähän myrkyllisiä*) (Khan 2010, 59-60). Pohjavesien saastumisen näkökulmasta erityisen haitallisia ovat alumiini, arseeni, kadmium, kromi, kupari, rauta, lyijy, elohopea, nikkeli ja sinkki (Pitt ym. 1994, 6).

Kabir ym. (2014) ovat tarkastelleet metalliyhdisteiden biogeokemiallisia prosesseja maaperää, kasvillisuutta ja mikro-organismeja hyödyntävissä hulevesirakenteissa (green water infrastructures), joihin biopidätysrakennekin lukeutuu. Metalliyhdisteet esiintyvät maa-vesi –systeemissä monessa erilaisessa muodossa ja yhdisteiden muuntumiseen vaikuttavat fysikaaliset ja biogeokemialliset reaktiot ovat monimutkaisia ja vaihtelevat olosuhteiden mukaan. Metalliyhdisteet voivat Kabir ym. (2014) laatimaa konseptuaalista mallia mukailien esiintyä maa-aineksessa ja maavedessä epäorgaanisessa tai orgaanisessa muodossa joko liukoisessa tai eri tavoin epäorgaaniseen tai orgaaniseen aineeseen sitoutuneessa muodossa. Hapettuminen ja pelkistyminen, adsorptio ja desorptio, saostuminen ja liukeneminen, kompleksien muodostuminen ja hajoaminen sekä orgaanisten yhdisteiden hajoaminen ja kasvien aineiden otto vaikuttavat erilaisten metalliyhdisteiden määräsuhteisiin.

Huleveden laadunhallinnan näkökulmasta on olennaista, että pääosin metallit ovat sitoutuneena huleveden kiintoaineeseen (Sansalone ym. 2010; Gunawardana ym. 2012). Liukoisessa muodossa olevia metalleja ei voi kuitenkaan jättää huomiotta, koska ne ovat biosaatavuuden kannalta merkittäviä (Herngren ym. 2005). Eri metallien välillä on eroja esiintymismuodossa eli spesiaatiossa ja yksittäisen metallin osalta myös olosuhteet vaikuttavat esiintymismuotoon.

Kiintoaineeseen pidättyneitä metalleja voidaan poistaa hulevedestä laskeuttamalla ja suodattamalla. Huomattava osa metalleista esiintyy kuitenkin liittyneenä pieniin hiukkasiin (alle 150 µm) ja osa liittyneenä

hyvin pieniin hiukkasiin (alle 1  $\mu\text{m}$ ), joiden poistaminen hulevedestä edellyttää kemiallisesti aktiivisen suodatusrakenteen käyttöä. Esimerkiksi Gunawardana ym. (2012) tutkimuksessa 70 % hiukkasista oli pienempiä kuin 150  $\mu\text{m}$  ja näissä hiukkasissa oli 60 % metallikuormasta. Liukoisessa muodossa olevan metallifraktion poistaminen ei onnistu pelkän fysikaalisen suodatuksen avulla, vaan siihen tarvitaan elektrokemiallisia reaktioita kuten adsorptiota tai saostamista. (Clark & Pitt, 2012)

Huleveden kiintoaineessa olevat metallit ovat sitoutuneet eri tavoin hiukkasiin. Gunawardana ym. (2012) tutkimuksessa liikennealueelta tulevan huleveden kiintoaineessa kadmium ja kromi olivat pidättyneet hiukkasten pintaan kationinvaihdossa. Rauta, alumiini ja mangaani, joiden alkuperä viittasi maaperälähteisiin, olivat puolestaan sitoutuneet hiukkasiin kemiallisesti ja sinkki oli sitoutunut raudan, alumiinin ja mangaanin oksideihin.

Metallien alkuperä sekä olosuhteet vaikuttavat metallien esiintymistapaan hulevedessä ja maa-vesi -systeemissä. Esimerkiksi kuparin on Herngren ym. (2005) mukaan havaittu esiintyvän erilaisilla alueilla (asuinalue, liikekiinteistöjen alue ja teollisuusalue) eri muodossa ja tämän on arvioitu johtuvan mm. eri alueiden erilaisista kuparin lähteistä. Maan ominaisuudet ja vesi- ja happipitoisuus sekä orgaanisen aineksen määrä, maan lämpötila ja pH vaikuttavat maaperässä olevien metallien esiintymismuotoon.

Maaperän ominaisuuksista raekokojakauma ja maan rakenne vaikuttavat mm. maaperän suodatuskykyyn, vedenjohtavuuteen, vesipitoisuuteen ja maan reagoivaan pinta-alaan. Maan lämpötila vaikuttaa kemiallisten reaktioiden nopeuteen ja happamuus ja hapen määrä metallien liukenemiseen. Happamissa olosuhteissa metallien liukeneminen yleensä lisääntyy. Orgaaninen aines puolestaan vaikuttaa veden pidättymiseen ja osallistuu metalleja sitoviin reaktioihin. (Kuusela-Lahtinen ym. 2012; Heikkinen 2000) Metallien pidättämiseen tarkoitetun biopidätysrakenteen osalta tulee siten huolehtia myös siitä, että rakenteeseen pidättyneet metallit eivät olosuhdemuutoksissa liukene ja huuhtoudu hallitsemattomasti pois rakenteesta.

Heikkinen (2000) on tehnyt koosteen metallisten haitta-aineiden kulkeutumisesta ja pidättymisestä maaperässä sekä kuvannut näihin mekanismeihin vaikuttavia tekijöitä. Haitta-aineet voivat kulkeutua maaperässä eri muodoissa, kuten liukoisina vapaina ioneina, orgaanisina/epäorgaanisina metallikomplekseina, maa-ainekseen kiinnittyneinä tai kaasuna. Koska vesi on haitta-aineiden pääasiallinen kuljettaja, tehostaa haitta-aineiden pysyminen liukoisessa muodossa niiden kulkeutumista. Haitta-aineiden sitoutuminen maaperän erilaisiin ainesosiin kuten savimineraaleihin, orgaaniseen ainekseen tai raudan, alumiinin ja mangaanin (oksi)hydrokseihin, puolestaan vähentää kulkeutumista. Orgaanisista aineksista tehokkaimpia haitta-aineiden sitoja ovat erityisesti humuksen ainesosat eli fulvohapot ja humiini.

Maaperän sisältämän veden määrä ja maaperän vedenjohtavuus vaikuttavat merkittävästi haitta-aineiden kulkeutumiseen. Hyvin vettä johtavassa maaperässä maaperän ainesosien ja valumaveden välisille reaktioille jää vain vähän aikaa ja lisäksi maaperän suuret huokokset eivät kykene suodattamaan haitta-aineita vedestä. Kulkeutumiseen vaikuttavat näiden maaperän ominaisuuksien lisäksi myös muutokset haitta-aineiden kemiallisissa ominaisuuksissa. Haitta-aineet voivat muodostaa vesiliukoisten maaperän yhdisteiden kanssa epäorgaanisia tai orgaanisia komplekseja tai kelaatteja, jolloin haitta-aineiden adsorptio kiinteisiin partikkeleihin vähenee ja näin ollen kulkeutuminen helpottuu. Toisaalta haitta-aineiden kulkeutuminen voi myös vähentyä jos esimerkiksi kompleksinmuodostaja adsorpoituu tai saostuu kulkeutumisen kannalta liian suuriksi kasautumiksi. (Heikkinen 2000, 11-15)

Haitta-aineet voivat pidäytyä maaperään sitoutumalla kiinteiden, liukenemattomien epäorgaanisten tai orgaanisten aineiden pinnoille tai niiden rakenteisiin sekä muodostamalla saostumia em. aineiden kanssa. Pidättymiseen vaikuttavat siten maaperän ominaisuudet ja kemialliset olosuhteet mutta myös haitta-aineiden esiintymismuodot ja kemialliset ominaisuudet. Lisäksi pidättymisen tehokkuuteen vaikuttavat reaktioissa muodostuvien sidosten lujuus sekä vallitsevien olosuhteiden pysyvyys. Pysyvimpiä sidoksia muodostuu saostumisreaktioissa ja heikoimmin haitta-aineet ovat pidäytyneet elektrostaattisilla voimilla adsorpoituneina, jolloin ne ovat vielä ionivaihdon kautta kasvien käytettävissä. Olosuhdemuutokset esimerkiksi maan pH:n, hapetus-pelkistysolosuhteiden ja maaperän rakenteen osalta voivat pienentää maaperän kykyä pidättää haitta-aineita ja aineet voivat vapautua takaisin liukoisempaan ja kasveille käyttökelpoiseen muotoon. (Heikkinen 2000, 15-16)

Sorptio on yleisnimitys kaikille niille mekanismeille, joilla aineet pidätyvät nesteestä kiinteisiin aineisiin. Adsorptiossa, kationinvaihtoreaktioissa ja kompleksinmuodostuksessa hiukkaset tai molekyylit pidätyvät toisen aineen pintaan joko fysikaalisesti tai kemiallisesti. Absorptiossa kiinnittyminen on pinnan sijaan rakenteellista ja keraasaostumisessa joko rakenteellista tai pintaan tapahtuvaa kiinnittymistä. Maaperän olosuhteista happamuus, hapetus-pelkistysolosuhteet sekä maaperän koostumus sekä haitta-aineiden ominaisuudet vaikuttavat sorptioon. (Heikkinen 2000, 16-19).

Maaperän happamuus on voimakkaasti sorptiota säätelevä tekijä. Useimmat raskasmetallit muuttuvat liukoiseen muotoon pH:n laskiessa ja pidätyvät maaperään parhaiten neutraaleissa tai emäksisissä oloissa. Tämä johtuu mm. siitä, että orgaanisilla yhdisteillä ja osalla epäorgaanisia raskasmetalleja pidättävistä aineista pintavaraukset ovat riippuvaisia pH:sta. Neutraaleissa ja emäksisissä oloissa pintavaraukset ovat negatiivisia, jolloin ne kykenevät sitomaan positiivisesti varautuneita raskasmetalleja kuten lyijyä  $Pb^{2+}$ , kadmiumia  $Cd^{2+}$  ja kuparia  $Cu^{2+}$ . (Heikkinen 2000, 16-17)

Hapetus-pelkistys –olot vaikuttavat sekä haitta-aineiden että niitä sitovien yhdisteiden kemiallisiin ominaisuuksiin. Haitta-aineiden osalta hapetus-pelkistys –olot vaikuttavat monien raskasmetallien hapetusasteeseen ja siten niiden varaukseen. Pelkistävässä oloissa ionien varaukset ovat alhaisemmat kuin hapettavissa oloissa. Tämä lisää niiden liukoisuutta ja vähentää sitoutumista, sillä pienemmän varauksen omaavat ionit eivät sitoudu yhtä herkästi ja tehokkaasti kuin suuremmalla varauksella olevat ionit. Lisäksi pelkistävässä oloissa mm. alumiinin, raudan ja mangaanin oksihydroksisaostumat liukenevat, jolloin raskasmetallit vapautuvat maaveteen. (Heikkinen 2000, 17)

Maaperän koostumuksen osalta erityisesti haitta-aineita sitovien yhdisteiden eli sorbenttien määrät ovat keskeisiä haitta-aineiden sorptiota sääteleviä tekijöitä. Orgaaninen aines, oksidit ja savimineraalit ovat tärkeimpiä sorbentteja ja yleisesti sorptiokapasiteetti on sitä suurempi, mitä enemmän näitä aineksia on maaperässä. Toisaalta eri aineilla on erilainen sidontakapasiteetti ja erilainen affiniteetti eri haitta-aineisiin. Näin ollen sorbenttien määrän ohella niiden määräsuhteet vaikuttavat haitta-aineiden pidättymiseen. (Heikkinen 2000, 18)

Aineet, joilla on suuri ominaispinta-ala pidättävät hyvin haitta-aineita. Tällaisia aineita ovat esimerkiksi amorfiset oksidit ja oksidihydroksidit sekä humus ja savimineraalit. Humuksella humiinin määrä ja savimineraaleilla paisuvahilaisten mineraalien osuus ovat suoraan verrannollisia ominaispinta-alaan. Karkearakeisilla maalajiella haitta-aineiden sidontakyky on pienen ominaispinta-alan vuoksi pieni, mutta rauta-, alumiini- ja mangaanihydroksidien sekä humuskolloidien peitot voivat lisätä mineraalien kykyä sitoa haitta-aineita. (Heikkinen 2000, 18) Tällä tavoin esimerkiksi hiekkasuodattimen kyky pidättää raskasmetalleja voi parantua rakenteen ikääntyessä ja rakeiden peitteisyyden lisääntyessä.

Sorbenteista orgaaninen aines sitoo tiukasti rautaa  $\text{Fe}^{3+}$ , kromia  $\text{Cr}^{3+}$ , lyijyä  $\text{Pb}^{2+}$  ja elohopeaa  $\text{Hg}^{2+}$  ja kohtalaisesti kadmiumia  $\text{Cd}^{2+}$ , nikkeliä  $\text{Ni}^{2+}$  ja kobolttia  $\text{Co}^{2+}$ . Orgaaninen aines kykenee sen sijaan sitomaan vain heikosti mangaania  $\text{Mn}^{2+}$  ja sinkkiä  $\text{Zn}^{2+}$ . Savimineraalit sitovat tiukasti rautaa, mutta vain varsin kevyesti kobolttia, kadmiumia ja nikkeliä. Sen sijaan oksidit pystyvät sitomaan kaikkia metalleja varsin tiukasti ja erityisen tiukasti kromia, lyijyä ja elohopeaa. (Heikkinen 2000, 18)

#### 4.2 Tutkimustuloksia

Kabir ym. (2014) ovat tehneet tutkimuskatsauksen maaperää ja kasvillisuutta hyödyntävien hulevesirakenteiden kyvystä pidättää hulevedessä olevia metalleja. Aihetta on tutkittu viimeisen viidentoista vuoden aikana varsin paljon sekä laboratorio- että kenttäolosuhteissa. Esitettyjen tulosten mukaan biopidätysrakenteen metallien pidätyskyky on hyvä sillä useissa tutkimuksissa huleveden sisältämästä lyijystä, sinkistä, kuparista ja kadmiumista on pidättynyt rakenteeseen yli 90 % (mm. Chapman ja Horner 2010; Blecken ym. 2009a ja Blecken ym. 2009b; Hatt ym. 2009). Valtanen ym. (2012) tutkimuksessa biopidätysrakenteen

toimintaa tarkasteltiin Lahdessa lysimetrikentällä ja sinkin ja kuparin todettiin pidättyvän hyvin rakenteeseen käytännössä heti rakenteiden perustamisen jälkeen. Alumiinin pidättyminen rakenteeseen oli sen sijaan heikompaa ja alumiinia huuhtoutui myös rakenteessa käytetystä maa-aineksesta.

Biopidätysrakenne kykenee Hatt ym. (2009) tekemien kenttäkokeiden perusteella pidättämään tehokkaasti metalleja hyvin erilaisilla rakenneratkaisuilla. Tutkimuksessa rakenteista huleveden mukana tulleiden metallien arvioitiin olleen huuhtoutuneita itse rakenteen maa-aineksesta kun huleveden sisältämät metallit olivat puolestaan pidättyneet rakenteeseen. Metallihuuhtoumien voidaan siten olettaa vähitellen lähenevän rakenteen maa-ainesten luontaista metallien taustapitoisuutta, elleivät rakenteeseen pidättyneet metallit muutu olosuhdemuutoksissa liukoiseen muotoon ja huuhtoudu rakenteesta.

Blecken ym. (2009a) tarkastelivat laboratoriokokeessa biopidätysrakenteen rakenneominaisuuksien vaikutusta metallien pidättymiseen. Koerakenne oli 900 mm paksu ja rakenteen keskiosan hiekkakerroksessa oli selluloosapohjainen lisähiililähde ja pohjalla vedellä kyllästynyt varastokerros typen poiston tehostamiseksi. Tutkimuksen tavoitteena oli selvittää vaikuttavatko nämä rakennemuutokset metallien pidättymiseen, koska vedellä kyllästynyt kerros muuttaa rakenteen hapetus-pelkistys olosuhteita ja lisähiililähde voi vaikuttaa erityisesti kuparin pidättymistä rakenteeseen. Yhtenä vaikuttavana tekijänä on esimerkiksi se, että maa-aineksen olosuhdevaihtelu hapettomista hapellisiin oloihin voi kiihdyttää aemmin pidättyneiden metallien vapautumista (Bioavailability of contaminants 2002, 158). Tulosten mukaan vedellä kyllästyneen maakerroksen ja lisähiililähteen lisäys paransi merkittävästi kuparin pidättymistä ja hiukan lyijyn ja sinkin pidättymistä.

Blecken ym. (2009b) tarkastelivat myös metallien kertymistä rakenteeseen sekä kosteusolosuhteiden vaikutusta metallien pidättymiseen välimerellisiä ilmasto-oloja vastaavissa oloissa. Useimmat metallit ovat sitoutuneet kiintoainekseen ja pidättyvät siten mekaanisen suodatuksen avulla rakenteen yläpintaan n. 20 cm:n paksuiseen pintakerrokseen. Pitkittänyt kuiva kausi heikensi merkittävästi biopidätyksen tehoa metallien pidättäjänä. Kuivaa jaksoa seuranneessa sadetapahtumassa veden virtausnopeus rakenteessa oli nopea, koska rakenteeseen oli muodostunut kuivumisen johdosta vettä johtavia halkeamia. Sadetapahtumaa seurannut voimakas vedenvirtaus rakenteen läpi huuhtoi mukaansa hienoainesta ja rakenteeseen kertyneitä metalleja ja toisaalta huleveden ja rakenteen välisiä metalleja sitovia reaktioita ei ennättänyt tapahtua. Tutkituissa ilmasto-oloissa rakenteessa ollut vedellä kyllästynyt varastokerros ylläpiti rakenteessa tavallista rakennetta tasaisempia kosteusoloja ja loi siten paremmat edellytykset metallien pidättymiselle.

Muthanna ym. (2007a) ja (2007b) ovat tarkastelleet metallien pidättymistä biopidätysrakenteeseen kylmissä ilmasto-oloissa Norjan Trondheimissa. Muthanna ym. (2007a) tutkimuksessa tarkasteltiin metallien pidättymistä rakenteeseen erilaisissa hydraulisisa kuormitustilanteissa sekä

lopputalvella että kesällä. Lopputalvella, jolloin rakenteen pinnalla oli n. 20 cm paksu routakerros, kupari pidättyi selvästi huonommin rakenteeseen kuin kesällä ja myös lyijyllä havaittiin pieni ero metallien pidättymisessä talvi- ja kesäkaudella. Sen sijaan sinkin pidättymisessä ei ollut eroa talviolojen ja kesän välillä. Suurin osa metalleista pidättyi rakenteen pintaosan puunkuoresta tehtyyn katekerrokseen ja maa-aineskerroksen yläosaan. Pidättymismekanismien arvioitiin perustuvan pääosin sorptioon, koska suurin osa sinkistä, lyijystä ja kuparista oli sitoutuneena niin pieniin hiukkasiin, ettei niitä ollut mahdollista erottaa hulevedestä tavallisella suodatuksella. Rakenteen maa-aineskerrosten metallien pidätyskyvyn arvioitiin säilyvän käytetyllä kuormituksella 10-20 vuotta, mutta katekerroksen osalta uusimisväli arvioitiin huomattavasti lyhyemmäksi eli 4-5 vuodeksi.

Kasvillisuutena Muthanna ym. (2007a) tutkimuksessa käytettiin pikkutalviota (*Vinca minor*), tyrniä (*Hippophaë rhamnoides*), keltakurjenmiekkää (*Iris pseudacorus*) sekä rantakukkaa (*Lythrum salicaria*). Kasveista erityisesti pikkutalvio kykeni ottamaan maasta melko paljon sinkkiä ja kuparia. Kasvillisuuden sitomaksi metallimääräksi arvioitiin kuparin osalta 3 %, sinkin osalta 7 % ja lyijyn osalta 2 %. Kasvibiomassan säännöllisellä korjuulla voidaan siten myös poistaa jonkin verran metalleja rakenteesta ja pidentää rakenteen toimintakykyä. Pikkutalvio ei siedä kovin hyvin seisovaa vettä, joten sen käyttö biopidätysrakenteessa ei välttämättä onnistu. Biopidätysrakenteen vaihtelevat kosteusolosuhteet eivät kuitenkaan suosi myöskään vesikasveja, jotka muuten voisivat olla hyvä valinta metalleja pidättävään rakenteeseen, koska ne kykenevät ottamaan metalleja myös suoraan vedestä kuten Fritioff ja Greger (2003) ovat osoittaneet. Parhaiten biopidätysrakenteessa voisivat menestyä tuoreiden/kosteiden kasvupaikkojen maakasvit, joista esim. mesiangervo (*Filipendula ulmaria*) voi kerätä maasta varsin hyvin cadmiumia ja lyijyä (Fritioff ja Greger, 2003).

Kasvien osalta on myös mahdollista käyttää ns. hyperakkumulaatioon kykeneviä kasveja, jotka pystyvät ottamaan maasta huomattavasti tavallisia kasveja enemmän metalleja. Tällaisia kasveja ovat Bini (2010, 29-30) mukaan esimerkiksi laukkaneilikka *Armeria maritima* (Cu), kehäkukka *Calendula officinalis* (Cr), lampaannata *Festuca ovina* (Se, Cu, Zn, Cr, Ni, Pb), mustapoppeli *Populus nigra* (Pb, Zn, Cu, Cr, Cd), koripaju *Salix viminalis* (Cd, Zn) ja puna-apila *Trifolium pratense* (Cd, Zn). Osa näistä kasveista ei kasvupaikkavaatimustensa vuoksi sovellu käytettäväksi biopidätysrakenteessa, joten lisätutkimuksia biopidätysrakenteen vaihtelevissa kosteusoloissa menestyvistä ja metalleja sitovista boreaalisista lajeista tarvitaan.

Muthanna ym. (2007b) arvioivat lumensulamisvesissä olevien metallien pidättymistä biopidätysrakenteeseen kolmella liikennemäärältään erilaisella katualueella. Tutkimuksessa tarkasteltiin biopidätysrakenteen vaikutusta metallien ja haitta-aineiden kulkeutumiseen ja rikastumiskertoimiin. Biopidätysrakenteen kyky sulamisvesien laadulliseen käsittelyyn oli tutkimuksen mukaan hyvä. Käsittelyllä saavutettiin ulosvirtaavan sulamisveden osalta kelvolliset haitta-ainepitoisuudet ja

pystyttiin vähentämään haitta-ainekuormitusta. Rakenteesta ulosvirtaavassa vedessä liukoisen sinkin ja kuparin pitoisuudet kuitenkin kasvoivat. Liukoisen sinkin osalta tutkimuksessa arvioitiin sinkkiä huuhtoutuvan itse rakenteesta ja kuparin osalta kyse oli siitä, ettei liukoinen kupari pidäntynyt rakenteeseen. Pääosin metallit pidäntynyt puunkuoresta tehtyyn katekerrokseen.

Biopidätysrakenteen toimintakyvyn muutoksista ajan suhteen on vielä varsin vähän tutkimustuloksia. Paus ym. (2014) tutkimuksessa määritettiin kuuden kaupunkialueella (Minneapolis) olevan biopidätysrakenteen vedenjohtavuutta ja metallien pidätyskykyä 2-8 vuoden kuluttua rakentamisesta. Rakenteisiin johdettiin hulevettä katualueilta ja katoilta. Rakenteiden pintakerroksen vedenjohtavuuden todettiin paranevan rakenteen ikääntyessä. Tarkastelluissa rakenteissa mm. maaperän makrohuokoston muodostumisen sekä maaperän jäätymis-sulamis – syklien aikaansaaman maaperän löyhtymisen arvioitiin ylittävän vedenjohtavuutta pienentävien prosessien, kuten kiintoaineksen kertymisestä aiheutuvan maaperän huokoston tukkeutumisvaikutuksen. Rakenteiden metallien pidätyskapasiteetista arvioitiin olevan jäljellä yli 80 % ja kadmiumin osalta yli 90 %, joten rakenteen toimintakyvyn arvioitiin metallien osalta säilyvän yli 25 v.

Orgaanisen aineksen osuus oli Paus ym. (2014) tutkimien rakenteiden pintakerroksessa huomattavan suuri (keskimäärin n. 13 paino-%). Tämä on voinut vaikuttaa maaperän biologiseen aktiivisuuteen ja juuriston kehittymiseen ja siten makrohuokoston muodostumiseen. Kuten aiemmin on todettu, maaperän orgaaninen aines on tärkeä haitta-aineiden pidättäjä. Toisaalta haitta-aineet ja ravinteet voivat huuhtoutua rakenteesta orgaanisen aineksen hajotessa. Näin ollen orgaanisen aineksen määrään ja laatuun sekä orgaanisen aineksen muutosprosesseihin on syytä kiinnittää erityistä huomiota metallien pidättämiseen tähtäävässä biopidätysrakenteessa.

### 4.3 Kirjallisuuteen perustuva rakenneohjeistus

Metallit ovat pääosin sitoutuneet huleveden kiintoaineeseen (Sansalone ym. 2010; Gunawardana ym. 2012), joten suodatukseseen perustuvalla biopidätyksellä pystytään tehokkaasti vähentämään hulevedessä olevien metallien määrää. Kuten kiintoaineen osalta on todettu, kiintoaineen suodatus onnistuu monenlaisilla rakenneratkaisuilla Hatt ym. (2009). Pelkällä huleveden suodatuksella metalleista saadaan kuitenkin poistettua vain murto-osa, sillä huomattava osa metalleista on sitoutunut erittäin pieniin hiukkasiin (Gunawardana ym. 2012). Niiden poistaminen hulevedestä edellyttää kemiallisesti aktiivista maarakennetta, jossa on paljon pidäntymisreaktiot mahdollistavaa erilaista ainespintaa, kuten savimineraaleja, erilaisia oksideja ja orgaanista ainesta (Heikkinen 2000, 18). Tällainen kerros kannattaa sijoittaa rakenteen ylimpään 20 cm:n paksuiseen kerrokseen (Muthanna ym. 2007a; Blecken ym. 2009b) ja erityisesti lähelle kohtaa, jossa hulevesi syötetään rakenteeseen.

Kuten edellä kiintoaineen pidättämisessä niin myös metallien pidättämisessä erillisen helposti vaihdettavan ja hulevettä suodattavan rakenneosan sijoittaminen biopidätysrakenteen alkuosaan voi siten olla perusteltua. Rakenneosassa käytettävän aineksen osalta tulisi metallien osalta ottaa huomioon, että orgaaninen aines pidättää tiukasti rautaa, kromia, lyijyä ja elohopeaa sekä kohtalaisesti kadmiumia, nikkeliä ja kobolttia. Savimieneraalit sitovat tiukasti rautaa, mutta vain varsin kevyesti kobolttia, kadmiumia ja nikkeliä. Sen sijaan oksidit pystyvät sitomaan kaikkia metalleja varsin tiukasti ja erityisen tiukasti kromia, lyijyä ja elohopeaa. (Heikkinen 2000, 18)

Metallien pidättymisen osalta on olennaista, että olosuhdemuutokset esimerkiksi maan pH:n lasku, hapetus-pelkistys -olojen muutokset ja orgaanisen aineksen hajoaminen voivat pienentää maaperän kykyä pidättää haitta-aineita ja aineet voivat vapautua takaisin liukoisempaan ja ympäristölle haitallisempaan muotoon. Maan happamuus vaikuttaa voimakkaasti metallien pidättymiseen, sillä useimmat metallit muuttuvat liukoiseen muotoon pH:n laskiessa ja pidättyvät parhaiten neutraaleissa tai emäksisissä oloissa. (Heikkinen 2000, 16-17)

Metallien pidättämiseen tarkoitettujen rakenteiden pH:tä on syytä seurata, koska mm. orgaanisen aineksen epätäydellinen hajoaminen happamoittaa maata (Mälkönen 2003, 72). Tämä liittyy mm. ligniinin hajoamiseen. Puunkuoreissa ligniiniä on n. 10-25 % ja puu-aineksessa n. 20-30 % (Vanninen 2009, 6). Ligniiniä hajottavien valkolahottajien toimesta syntyvän valkolahohumuksen happamuus on alhainen (Mälkönen 2003, 108). Tällä voi olla vaikutusta mm. kätteeseen pidättyneiden metallien liukoisuuteen.

Biopidätysrakenteen maa-aineksen vedenläpäisevyys kannattaa säätää maa-aineksen raekoon avulla vain kohtalaiseksi, jotta suodatukselle jää enemmän aikaa ja mahdollisuuksia. Liian karkearakeinen maarakenne ei pysty suodattamaan haitta-aineita ja toisaalta veden virtausnopeuden kasvaessa veden mukaan huuhtoutuu helpommin rakenteeseen jo aiemmin jäänyttä hienoainesta, johon valtaosa metalleista on sitoutunut. Myös rakenteen kuivuminen ja siitä seuraava kuivumishalkeilu sadetapahtumien välillä voi heikentää maan kykyä pidättää metalleja. (Blecken ym. 2009b) Tutkimuksissa onkin saatu hyviä tuloksia metallien pidättymisestä rakenteissa, joissa rakenteen pohjalle on sijoitettu kosteusoloja kuivina kausina tasaava veden varastokerros.

Kasvit sitovat maaperästä metalleja biomassansa ja säännöllisellä biomassan korjuulla voidaan jonkin verran vähentää metallien kertymistä rakenteeseen (Muthanna ym. 2007a). Rakenteessa voidaan käyttää kasvilajeina myös metalleja erityisen hyvin pidättäviä ns. hyperakkumulaatiokasveja. Kasvien käyttöön saastuneiden maiden puhdistuksessa eli ns. fytoimediaatiota on Suomessakin tutkittu metallien osalta viime vuosina mm. Itä-Suomen yliopistossa (UEF, 2014) sekä kenttä- että laboratoriokokeissa. Tällöin kyseessä ovat kuitenkin olleet kohteet, joissa ei ole ollut biopidätykseen liittyvää kosteusolojen vaihtelua,

joten kasvien kasvupaikkavaatimuksia ei ole tarvinnut ottaa huomioon yhtä tarkasti kuin hulevesirakenteiden kasvivalinnoissa.

Ylläpitotoimena rakenteeseen kertyneitä metalleja kannattaa poistaa samantyyppisellä pintakerroksen vaihdolla kuin kiintoainettakin (Muthanna ym. 2007a). Rakenteen toimintakyvyn voidaan metallien pidätyskyvyn osalta arvioida säilyvän jopa yli 25 vuotta (Muthanna ym. 2007a; Paus ym. 2014).

Taulukko 3. Kooste metalleja pidättävän biopidätysrakenteen rakennosista (Muthanna ym. 2007a (1); Bini 2010 (2); Blecken ym. 2009b (3); Heikkinen 2000 (4))

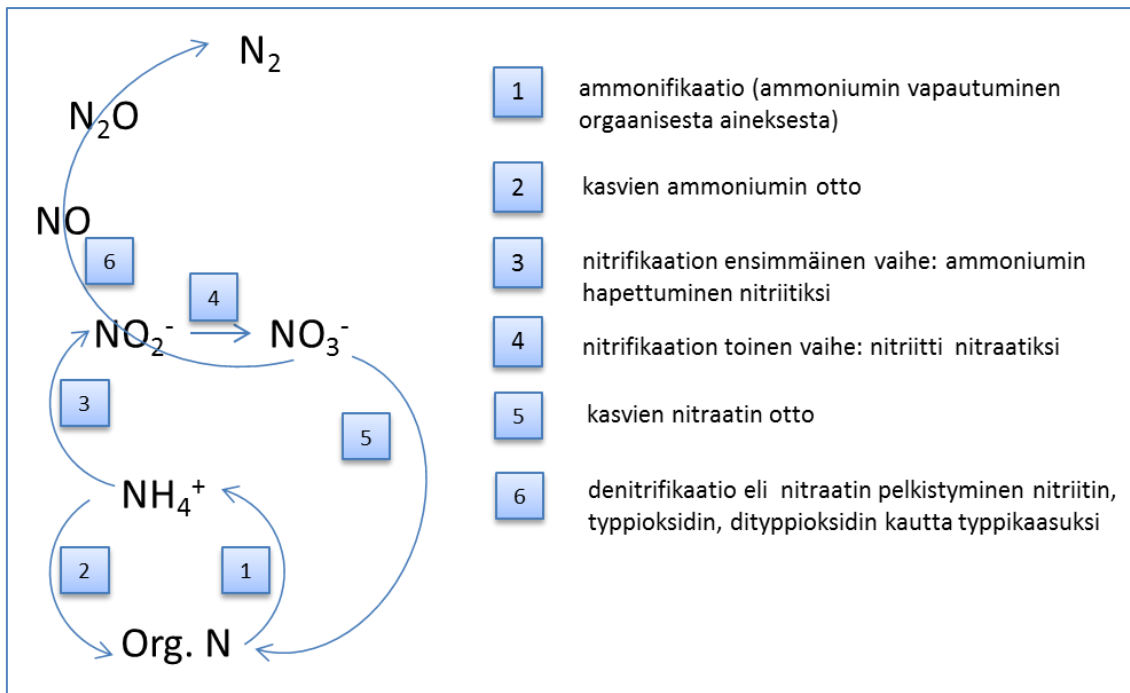
	keskeinen osatekijä	mahd. huomioon otettava tekijä	mahdollisuus säätää tai tehostaa rakenteen toimintaa
LAMMIKOITUMISTILA			<ul style="list-style-type: none"> <li>ei erityisvaatimuksia</li> </ul>
KASVILLISUUS kerää metalleja			<ul style="list-style-type: none"> <li>kasvillisuus pidättää jonkin verran metalleja <sup>(1)</sup>; voidaan käyttää myös ns. hyperakkumulaatioon kykeneviä kasveja <sup>(2)</sup>; tutkimustuloksia rakenteen vaihtelevissa kosteusolosuhteissa ja Suomen ilmasto-oloissa menestyvistä hyperakkumulaatio –lajeista ei kuitenkaan vielä ole</li> </ul>
KATEKERROS suodattaa ja pidättää			<ul style="list-style-type: none"> <li>suuri osa metalleista on sitoutunut kiintoaineeseen ja ne pidättyvät suodatuksen avulla biopidätysrakenteen pintakerrokseen <sup>(3)</sup>; orgaanisesta aineksesta tehty katekerros voi toimia tehokkaana metallien pidättymiskerrosena, sillä mekaanisen suodatuksen ohella kerrokseen voi sorption kautta pidättyä monia metallisia haitta-aineita <sup>(1)</sup>; orgaaninen aines pidättää tiukasti rautaa, kromia, lyijyä, elohopeaa sekä kohtalaisesti kadmiumia, nikkeliä ja kobolttia <sup>(4)</sup></li> </ul>
KASVU- JA SUODATUSKERROS suodattaa ja pidättää			<ul style="list-style-type: none"> <li>metalleja pidättyy erityisesti pintakerrokseen (ylin 200 mm); maaperän vedenjohtavuus ei saa olla liian suuri, jotta hulevesi suodattuu ja metalleja pidättäville reaktioille jää aikaa <sup>(4)</sup>; rakenteen kuivuminen voi johtaa kuivumishalkeiluun ja oikovirtausreitteihin, jolloin huleveden suodattuminen vähenee <sup>(3)</sup>; metallit sitoutuvat erityisesti savimineraaleihin, orgaaniseen ainekseen sekä raudan, alumiinin sekä mangaanin (oksi)hydroksideihin <sup>(4)</sup>; rakenteeseen pidättyneet metallit voivat muuttua liukoiseen muotoon hapetus-pelkistys –olojen muuttuessa tai happamissa oloissa <sup>(4)</sup></li> </ul>
SIIRTYMÄKERROS			<ul style="list-style-type: none"> <li>ei erityisvaatimuksia</li> </ul>
SALAOJAKERROS			<ul style="list-style-type: none"> <li>mikäli riski metallien huuhtoutumiseen pohjaveteen on olemassa, tulee biopidätysrakenteen toteuttaa pohjaltaan läpäisemättömänä ja rakenteen läpi suodautunut vesi johtaa salaojaputkella pois rakenteesta; metalleja pidättävän kerroksen on oltava riittävän etäällä rakenteen pohjaosaan typen denitrifikaation tehostamiseksi mahdollisesti toteutetusta vedellä kyllästetystä anaerobisesta varstokerroksesta</li> </ul>

## 5 TYPPI

### 5.1 Typen prosessit biopidätysrakenteessa

Keinolannoitetyppi, joka lähes kokonaan tuotetaan Haber-Bosch – prosessilla, on mullistanut maapallon biosfäärin typpikierron. Nykyään luonnon oma typpikierto on jo pienempi kuin ihmistoiminnan aiheuttama typpikierto. Teollisten typpilannoitteiden käyttö on mahdollistanut sadan vuoden aikana massiivisen ruoantuotannon lisäyksen ja maapallon väkiluvun kasvun, mutta on myös tuonut mukanaan typpikierron näkyvästä muutoksena erityisesti vesien rehevöitymisen. (Klemola 2007) Rakennettu ympäristö on kuudenneksi suurin typen kuormituslähde vesistöissä koko maan tasolla. Vaikka typen hulevesikuormitus on määrällisesti selvästi pienempi kuin maa- ja metsätalouden hajakuormitus, keskittyä hulevesikuormitus taajamien yhteyteen, jolloin hulevesikuormituksen merkitys korostuu hulevesien purkuvesistöissä. (Peltola-Thies 2005)

Hulevedessä typpi voi esiintyä monessa eri muodossa kuten epäorgaanisena ammonium-typpinä ( $\text{NH}_4^+$ ), nitriitti- ja nitraattityppinä ( $\text{NO}_2^-$  ja  $\text{NO}_3^-$ ) sekä liuenneena tai partikulaarisena orgaanisena typpinä. Typpi voi olosuhteiden mukaan muuntua erilaisissa prosesseissa toiseen muotoon, mutta säilyä silti maa-vesisysteemissä. Aerobisissa oloissa ammonium-tyypestä voi nitrifikaatiossa hapettua nitriittiä ja edelleen nitraattia. Nitrifikaatiossa voi syntyä myös dityppioksidia ( $\text{N}_2\text{O}$ ) (Hillel 1998, 303). Orgaanisesta tyypestä voi puolestaan ammonifikaatiossa mikrobien toimesta mineralisoitua ammonium-tyypeä ja edelleen nitraattia. (Kuva 4) Hulevedestä tyypeä vähentäviä prosesseja ovat kasvien typenotto, ammonium-tyypin pidäytyminen kationinvaihdossa maahiukkasten pinnalle sekä denitrifikaatio, jossa nitraatti pelkistyy nitriitiksi, typpioksidiksi, dityppioksidiksi ja edelleen typpikaasuksi. Näistä prosesseista kasvien typenotto ja kationinvaihto säilyttävät typen systeemissä, mutta denitrifikaation tuloksena typen määrä systeemissä vähenee. (Collins ym. 2010)



Kuva 4. Typen kiertoon liittyviä prosesseja (Collins ym. 2010; Mälkönen 2003, 75,111-113)

Dityppioksidi ( $N_2O$ ) on voimakas ja ilmakehässä pitkäikäinen kasvihuonekaasu (Hillel 1998, 303). Näin ollen denitrifikaation osalta olisi suotavaa, että nitraatin pelkistyminen etenisi tehokkaasti typpikaasuksi saakka. Dityppioksidin osuus denitrifikaation lopputuotteista kasvaa happamissa ja kylmissä oloissa, joten esimerkiksi hapan metsämaa on potentiaalinen dityppioksidin lähde (Mälkönen 2003, 112). Denitrifikaation perusedellytyksenä on maan alhainen happipitoisuus. Lisäksi denitrifikaatiota säätelevät edellä mainittujen maan happamuuden ja lämpötilan ohella systeemin orgaanisen hiilen ja nitraatin suhde sekä muutamat denitrifikaatiota inhiboivat aineet kuten asetyleeni ja rikkiyhdisteet. C:N –suhdeluvun on oltava 1, jotta denitrifikaatio on 80-90 %:n. Happamuuden osalta denitrifikaation optimi pH on välillä 7,0-8,0. (Harper ym. 2006, 36-37).

Biopidätysrakenteessa voi tapahtua kaikkia edellä mainittuja typen reaktioita, mutta reaktioiden määräsuhteet vaihtelevat rakenteen ominaisuuksien ja olosuhteiden perusteella. Rakenteeseen typpeä hulevedestä pidättäviä prosesseja ovat kasvien typenotto ja ammonium-ionien pidättyminen kationinvaihdossa maahiukkasten pinnalle. Rakenteessa hulevedestä poistuu typpeä denitrifikaation tuloksena, jos olosuhteet denitrifikaatiolle ovat suotuisat. Biopidätysrakenteesta voi kuitenkin myös huuhtoutua typpeä huleveteen. (Collins ym. 2010) Nitrifikaatiossa syntyvä nitraatti ei pidäty maahiukkasten pinnalle ja vesiliukoisena liikkuu helposti veden mukana. Nitraattia voi siten huuhtoutua huleveden mukana vastaanottavaan vesistöön tai suotautua imeytettävän huleveden mukana pohjaveteen. Nitraatin kertyminen pohjaveteen voi tehdä vedestä juomakelvotonta ja vesistöjä nitraatti rehevöittää. (Hillel 1998, 498-500) Biopidä-

tysrakenteen ominaisuuksilla on mahdollista vaikuttaa huleveden typen määrään. Koska myös typen huuhtoutuminen rakenteesta on mahdollista, on biopidätysrakenteen suunnittelussa syytä kiinnittää huomiota siihen, miten rakenne vaikuttaa typen reaktioihin.

Denitrifikaation tehostamiseksi rakenteen pohjalle voidaan esimerkiksi toteuttaa vedellä kyllästynyt kerros. Edellytyksenä tehokkaalle denitrifikaatiolle on kuitenkin se, että denitrifikaatiolle saadaan luotua suotuisat olosuhteet (mm. pH, riittävä orgaanisen hiilen määrä). Lisäksi on syytä ottaa huomioon, että lämpötila pohjakerroksessa voi olla alhainen, jolloin dityppioksidin määrä denitrifikaation lopputuotteista kasvaa. Varastokerros voi olla myös hankala toteuttaa kylmissä oloissa siten, että rakenteen vedenjohtokyky säilyy myös talvioloissa.

### 5.2 Tutkimustuloksia

Tutkimustulokset biopidätyksen vaikutuksesta huleveden typen määrään ovat vaihtelevia. Tämä käy ilmi Collins ym. (2010) tutkimuskoosteesta, jonka mukaan typen poisto biopidätyksessä (pitoisuuden perusteella, %) oli eri tutkimuksissa ammonium-typen osalta välillä -600 ja 92,6 ja nitraatti-typen osalta välillä -650 ja 84,6. Tätä ei voida pitää yllättävänä, kun otetaan huomioon typenkierron prosessien monimutkaisuus ja reaktioiden riippuvuus olosuhteista. Myös suomalaisissa tutkimuksissa (Valtanen ym. 2012) nitraattia on todettu huuhtoutuvan biopidätysrakenteesta.

Viime vuosina tutkimuksissa on tarkasteltu nitrifikaation ja denitrifikaation edellytyksiä biopidätysrakenteessa (Chen ym. 2013) sekä kasvillisuuden (Zhang ym. 2011), vedellä kyllästyneen kerroksen (Zhang ym. 2011; Brown ja Hunt 2011a; Randall 2011; Yang ym. 2013) ja alhaisten lämpötilojen (Blecken ym. 2010) vaikutuksia typen pidättymiseen ja poistoon.

Chen ym. (2013) tarkastelivat ammonium- ja nitraatti-typen poistoon liittyviä biologisia prosesseja biopidätysrakenteessa, jossa veden viipymä oli pitkä. Tutkimuksessa selvitettiin myös nitrifikaatio- ja denitrifikaatiomikrobiston perintöainesta eri maakerroksissa, tarkoituksena selvittää reaktioiden ilmenemistä rakenteen eri osissa. Sekä nitrifikaatio- että denitrifikaatiomikrobiston perintöaineksen määrä väheni biopidätysrakenteessa pinnalta syvemmälle rakenteeseen mentäessä. Tutkimuskohdissa, joissa vesi oli usein lammikoitunut havaittiin muihin kohtiin verrattuna suuremmat denitrifikaatio- ja nitrifikaatiomikrobiston perintöaineksen määrät. Denitrifikaation osalta tulosta voidaan pitää odotettuna, sillä tulvatilanne suosii denitrifikaatiolle otollisten olosuhteiden muodostumista. Nitrifikaation osalta tutkimuksessa todetaan, että nitrifikaatiobakteerit voivat säilyttää hapettomissa oloissa jonkinlaisen toimintakyvyn jopa 3-6 viikkoa.

Zhang ym. (2011) puolestaan tarkastelivat Australiassa kasvillisuuden sekä vedellä kyllästyneen ja lisähiililähteen sisältävän maakerroksen vaikutuksia biopidätysrakenteen kykyyn poistaa hulevedessä olevia ravinteita. Koetulosten mukaan kasvien kasvu ja ravinteiden pidättyminen (ei kuitenkaan  $\text{NH}_4$ ) tehostui koesylintereissä, joissa oli pohjalla vedellä kyllästynyt maakerros. Tutkimuksessa esitetyn arvion mukaan vedellä kyllästyneen ja lisähiililähteen sisältävän maakerroksen hyöty ravinteiden pidättämisessä saattoi olla seurausta lisääntyneestä denitrifikaatiosta ja kasvien paremmasta kasvusta. Tutkituissa välimerellisissä ilmasto-oloissa vedellä kyllästynyt maakerros tarjosi kasveille puskurivaraston kuivia jaksoja vastaan.

Brown ja Hunt (2011a) tutkimuksessa biopidätysrakenteen pohjalla olevan varastokerroksen tarkoituksena oli edesauttaa veden imeyttämistä hiekkaiseen pohjamaahan. Rakenteen ja pohjamaan vedenjohtavuudet olivat niin suuria, että 700 mm paksu varastokerros tyhjjeni vedestä alle kolmessa tunnissa. Rakenteessa ei veden lyhyen viipymän vuoksi ennättänyt tapahtua vedenlaatua parantavia prosesseja ja rakenteen vaikutus vedenlaatuun jäi kiintoaineen poistamista lukuunottamatta vähäiseksi. Tutkimuksessa tarkasteltiin myös biopidätysrakentta, jossa pohjamaa oli silttisempää. Veden viipymä varastokerroksessa oli 7 päivää, ja pidempi vaikutusaika paransi selvästi huleveden laatua myös sellaisilla aineilla, joilla käsittely perustuu muuhun kuin pelkkään suotautumiseen ja kerrostumiseen. Biopidätysrakenteen sijoittamisessa hiekkaiselle tai muutoin hyvin vettä johtavalle pohjamaalle täytyy siten Brown ja Hunt (2011a) tulosten pohjalta kiinnittää erityistä huomiota. Jos veden viipymä biopidätysrakenteessa jää lyhyeksi, on mahdollista, että huleveden haitta-aineista vain kiintoaine ja partikkeleihin sitoutuneet haitta-aineet saadaan pidättymään rakenteeseen, ja muilta osin ravinteet ja haitta-aineet voivat kulkeutua pilaamaan pohjavettä.

Randall (2011) tarkasteli biopidätystä typen ja fosforin poistossa kaupunkiympäristön hulevedestä ja laati GIS-pohjaisen työkalun biopidätysalueiden sovittamiseen olemassaolevaan kaupunkirakenteeseen. Tutkimustulosten mukaan tavanomainen kasvipeitteinen biopidätysrakente, jossa käytetään hiekkaista maa-ainesta (85-88 % hiekkaa, 8-12 % hienoaineksia ja 3-5 % orgaanista ainesta) kykeni vähentämään kaupunkiympäristön huleveden kokonaistyyppipitoisuutta n. 54 %. Rakenteessa, jossa oli vedellä kyllästynyt anaerobinen pohjakerros, denitrifikaatio lisääntyi, mutta ammonifikaatio ja nitrifikaatio vähenivät. Tämä näkyi nitraatin määrän vähenemisenä rakenteesta ulos tulevassa hulevedessä, mutta toisaalta kokonaistypen määrä valumassa lisääntyi. Kokonaistypen määrän vähentämisessä paras rakenne olikin tutkimuksen mukaan tavanomainen biopidätysrakente ilman vedellä kyllästynyttä maakerrosta. Anaerobisen kerroksen luominen rakenteeseen voi myös luoda otolliset olosuhteet joidenkin metallien pelkistymiselle (esim. Fe ja Mn) ja huuhtoutumiselle.

Yang ym. (2013) esittelevät tutkimustuloksia uudentyyppisen kaksivaiheisen biopidätysrakenteen toimivuudesta huleveden laadun parantamisessa. Tässä rakenteessa hulevesi ohjataan ensin vedellä kyllästettyyn

anaerobiseen rakenneosaan, jonka jälkeen tulee rakenteen aerobinen osa. Tätä rakennetyyppiä on aiemmin käytetty mm. ravinteiden ja PAH-yhdisteiden poistoon jätevedestä. Rakenne osoittautui tutkimuksessa hyvin tehokkaaksi nitraatin ja fosfaatin sekä herbisidien poistamiseen hulevedestä.

Biopidätysrakenteisiin liittyvistä tutkimuksista suuri osa on tehty lämpimissä/lauhkeissa ilmasto-oloissa. Viime aikoina Blecken ym. (2010) sekä aiemmin Muthanna ym. (2007a,2007b ja 2007c) sekä Roseen ym. (2009) ovat kuitenkin tarkastelleet biopidätyksen toimivuutta viileissä olosuhteissa. Muthanna ym. (2007a ja 2007b) keskittyivät tarkastelemaan biopidätyksen toimivuutta raskasmetallien poistossa tielaueilta tulevista sulamisvesistä ja Muthanna ym. (2007c) tarkastelivat biopidätysalueiden mitoitusta lumen sulamisvesien näkökulmasta.

Roseen ym. (2009) tutkimuksessa verrattiin kuuden erilaisen hulevesien hallintamenetelmän toimintakykyä kahden vuoden ajan Yhdysvaltain New Hampshiressa, Köppenin ilmastoluokituksen (Peel ym. 2007) mukaan Suomen eteläosaa vastaavissa ilmasto-oloissa. Rakenteen suorituskyky oli typen osalta selvästi pienempi kuin kesäkaudella, jolloin kasvillisuuden typenotto vähentää typen määrää. Huolimatta roudan tunkeutumisesta biopidätysrakenteeseen, rakenne säilyi tutkimuksessa kuitenkin vettä läpäisevänä myös talvikaudella. Hulevesirakenteiden tarkastelussa on roudan osalta syytä ottaa huomioon, että roudan tyyppiin ja muodostumiseen vaikuttavat mm. maalaji sekä maaperän kosteus (Soveri & Varjo 1977, 15-18). Routa ei aina muodosta läpäisemätöntä kerrosta maaperään, vaan olosuhteiden mukaan maaperä voi routaantuneenakin olla huokoinen.

Blecken ym. (2010) keskittyivät tutkimuksessaan tarkastelemaan laboratorioskokeiden avulla biopidätyksen toimivuutta viileissä olosuhteissa ( 2 °C, 7 °C ja 20 °C). Typen pidättyminen rakenteeseen oli heikkoa ja typpeä huuhtoutui rakenteesta. Huuhtoutuminen lisääntyi lämpötilan kohotessa. Tämä oli luultavasti seurausta nitrifikaation voimistumisesta korkeammissa lämpötiloissa. Koesyintereihin oli istutettu pullosaraa (*Carex rostrata*), mutta kokeessa kasvillisuus ei kyennyt poistamaan rakenteesta ravinteita tehokkaasti.

Kasvillisuuden rooli huleveden typen määrän vähentämisessä on keskeinen. Sekä Lucas ja Greenway (2008) että Bratieres ym. (2008) ovat todenneet, että typpeä pidättyi hulevedestä enemmän kasvipeitteisissä kuin kasvittomissa biopidätysrakenteissa. Bratieres ym. (2008) mukaan myös kasvillisuuden juuriston rakenteella on merkitystä. Tutkimuksessa kasvit, joilla oli tiheä ja paljon hienojuuria sisältävä juuristo eli suuri juurten pinta-ala olivat tehokkaampia ravinteidenottoa. Tällainen kasvi oli tutkimuksessa *Carex appressa*.

Bratieres ym. (2010) tutkimuksessa käytetty paikallinen kasvilaji, jolla oli symbioosi arbuskelimykorrhizassientien kanssa, oli myös hyvä typen määrän vähentäjänä. Mykorrhizat edistävät kasvien ravinteidenottoa, koska ne lisäävät juurten pinta-alaa ja sienijuuret pystyvät kasvamaan maaperässä pienemmissä huokosissa kuin hienijuuret. Arbuskelimykorrhizat kuuluvat

ns. endomykorritsoihin ja niitä esiintyy mm. pajuilla ja vaahteroilla sekä suurimmalla osalla heinä- ja ruoholajeja. (Mälkönen 2003, 117-119) Nämä mykorritsat ottavat maasta pääasiassa fosforia, mutta myös jonkin verran ammonium-ioneja, kaliumia, kuparia ja sinkkiä (Marschner & Dell 1994). Ektomykorritsat, joita esiintyy mm. koivulla, männyllä ja kuusella (Mälkönen 2003, 117), pystyvät ammonium-ionien ohella ottamaan maasta myös nitraattia (Marschner & Dell 1994).

### 5.3 Kirjallisuuteen perustuva rakenneohjeistus

Biopidätysrakenteen kyky pidättää ja poistaa typpeä hulevedestä vaihtelee rakenteen ominaisuuksien ja olosuhteiden mukaan. Biopidätysrakenteen kykyyn vähentää hulevedessä olevan typen määrää vaikuttavat mm. kasvillisuus, maa-aineksen kationinvaihtokapasiteetti, rakenteen aerobisuus/anaerobisuus, orgaanisen typen määrä, rakenteen lämpötila ja pH sekä maaaineksen ja pohjamaan vedenjohtavuus. (Collins ym. 2010) Hunt ym. (2012) kuvaavat säädettävänä biopidätysrakenteen ominaisuuksina kasvillisuuden, lammikoitumistilan syvyyden ja tilavuuden, rakennekerrosten kerrospaksuudet, maa-ainesten koostumuksen ja vedenläpäisevyyden, salaojan syvyyden sekä mahdollisen varastokerroksen varastotilavuuden.

Lammikoitumistilan syvyys ja tilavuus eivät suoraan vaikuta typen pidättymiseen, mutta yhdistettynä rakenteen ja pohjamaan vedenjohtavuuteen sekä pintakerroksen vedenläpäisevyyteen niillä on merkitystä rakenteen kosteusolojen säätelyssä. Chen ym. (2013) totesivat usein toistuvan lammikoitumisen lisäävän nitrifikaatio- ja denitrifikaatiobakteerien määrää, joten typen poiston kannalta lammikoituminen voi olla eduksi.

Huleveden hallinnan näkökulmasta pitkä viipymäaika vähentää joissain tilanteissa rakenteen kykyä viivyttää valumaa, mutta toisaalta lyhyen viipymäajan puitteissa rakenteessa ei ehdi tapahtua huleveden laatua parantavia reaktioita. Hunt ja Lord (2006) suosittelevat Yhdysvaltain Pohjois-Carolinassa tehtyjen tutkimusten perusteella, että huleveden typen pidätyksen ja poiston kannalta sopiva biopidätysrakenteen vedenjohtavuus olisi suuruusluokaltaan  $1 \cdot 10^{-6}$  m/s mikä vastaa maalajin osalta hienon hiekan vedenjohtavuutta.

Rakennekerrosten vedenjohtavuuden lisäksi myös pohjamaan vedenjohtavuus vaikuttaa veden viipymään rakenteessa. Yleensä huleveden imeyttämisen osalta suositellaan, että pohjamaan vedenjohtavuus on vähintään  $1 \cdot 10^{-6}$  m/s (Hulevesiopas 2012) eli tässä tapauksessa pohjamaan vedenjohtavuus vastaa biopidätysrakenteen maaaineksen vedenjohtavuutta. Mikäli pohjamaan vedenjohtavuus on tätä alhaisempi, voidaan rakenteeseen lisätä salaoja, joka kompensoi pohjamaan huonoa vedenjohtavuutta. Rakenteen pohjalla voi olla myös tarkoituksellisesti vedellä kyllästynyt anaerobinen kerros edistämässä denitrifikaatiota. Varastokerroksen osalta on syytä ottaa huomioon se, että kylmissä ja happamissa oloissa dityppioksidin osuus denitrifikaation

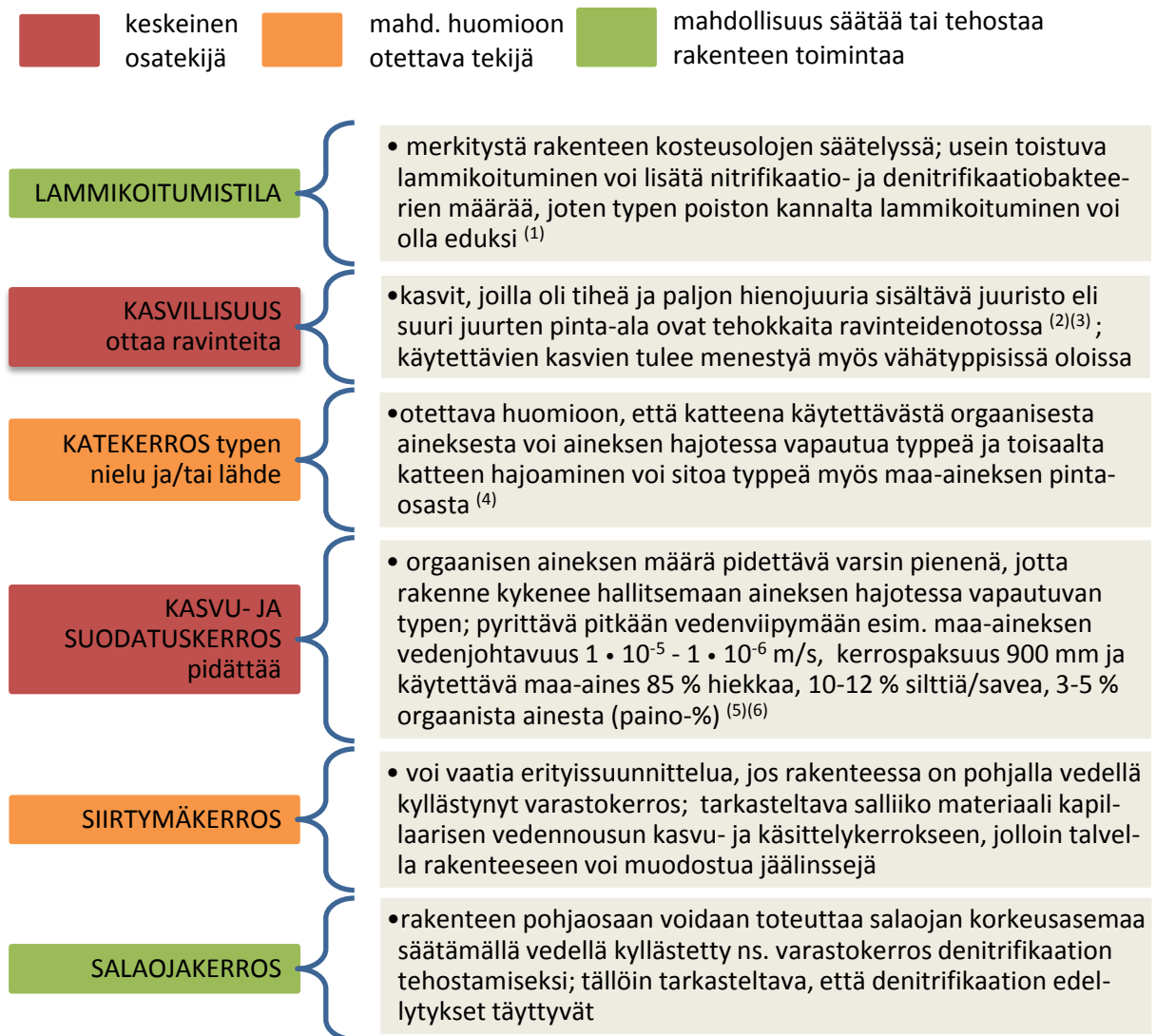
lopputuotteista kasvaa. Varastokerroksen sijoittamisella rakenteen pohjalle ei siten välttämättä saavuteta toivottua typen reaktiota ainakaan siinä tapauksessa, että maan pH on alhainen.

Rakennekerrosten kokonaispaksuus yhdessä rakennekerrosten ja pohjamaan vedenjohtavuuden kanssa vaikuttaa välillisesti, huleveden viipymääjan kautta, rakenteen kykyyn vähentää hulevedessä olevan typen määrää. Tutkimuksissa biopidätysrakenteen maa-aineksen kerrospaksuus on ollut n. 700 mm (Chen ym. 2013) ja 1100 mm (Brown & Hunt, 2011a) välillä. Hunt ym. (2012) suosittelevat n. 900 mm kerrospaksuutta typen määrän vähentämiseen tähtäävissä biopidätysrakenteissa.

Maa-aineksen osalta Hunt ja Lord (2006) suosittelevat, että typen vähentämiseen tähtäävässä biopidätysrakenteessa olisi 85 % hiekkaa, 12 % savea/silttiä sekä 3-5 % orgaanista ainesta (paino-%), jolloin rakenteen vedenjohtavuus olisi n. 1 tuuma/h eli n 0,007 mm/s. Ainessuhteiden osalta on syytä ottaa huomioon, että orgaanisesta aineksesta vapautuu typpeä, joten orgaanisen aineksen osuuden on oltava suhteellisen pieni. Toisaalta orgaanista ainesta tarvitaan denitrifikaatioon hiilenlähteeksi ja humuksen määrä vaikuttaa kationinvaihtokapasiteettiin (Mälkönen 2003, 63).

Maa-aineksen ominaisuudet vaikuttavat myös maaperän routaantumiseen ja sitä kautta rakenteen toimintakykyyn talvikaudella. Hienoaineen määrä rakenteessa tulee pitää vain kohtalaisena, jotta rakenne säilyy mahdollisimman toimivana myös talvikaudella. Savimineraalit toimivat kuitenkin myös kationien vaihtopaikkoina, joten ne ovat tärkeitä ammonium-ionien pidättymisen kannalta. Typen vähentämiseen tähtäävän biopidätysrakenteen maa-aineksen osalta on siten pyrittävä lajitekoostumukseen, joka tarjoaa kasvuedellytyksiä rakenteen kasvillisuudelle, takaa pitkän veden viipymän, kuitenkin kohtuuttomasti heikentämättä rakenteen kykyä johtaa hulevettä sadetapahtumissa, sekä mahdollistaa ammonium-typen pidättymisen maa-ainekseen.

Taulukko 4. Kooste tyypeä pidättävän biopidätysrakenteen rakenneosista (Chen ym. 2013 (1) ; Lucas ja Greenway 2008 (2) ; että Bratieres ym. 2008 (3) ; Simcock ja Dando 2013 (4); Hunt ja Lord 2006 (5); Randall 2011 (6) )



## 6 FOSFORI

### 6.1 Fosforin prosessit biopidätysrakenteessa

Fosfori ei herkästi reagoivana esiinny luonnossa alkuaineena (Harper ym. 2006) vaan erilaisissa kemiallisissa ja fysikaalisissa muodoissa, joita Roy-Poirier (2009, 77-82) on luokitellut huleveden hallinnan näkökulmasta kolmella eri tavalla:

- liukoinen vs. hiukkaspinnoilla oleva fosfori
- orgaaninen vs epäorgaaninen fosfori
- käytettävissä vs. ei käytettävissä oleva fosfori.

Hartikainen ja Peltovuori (2002) ovat puolestaan jakaneet maaperän fosforivarannot viiteen luokkaan:

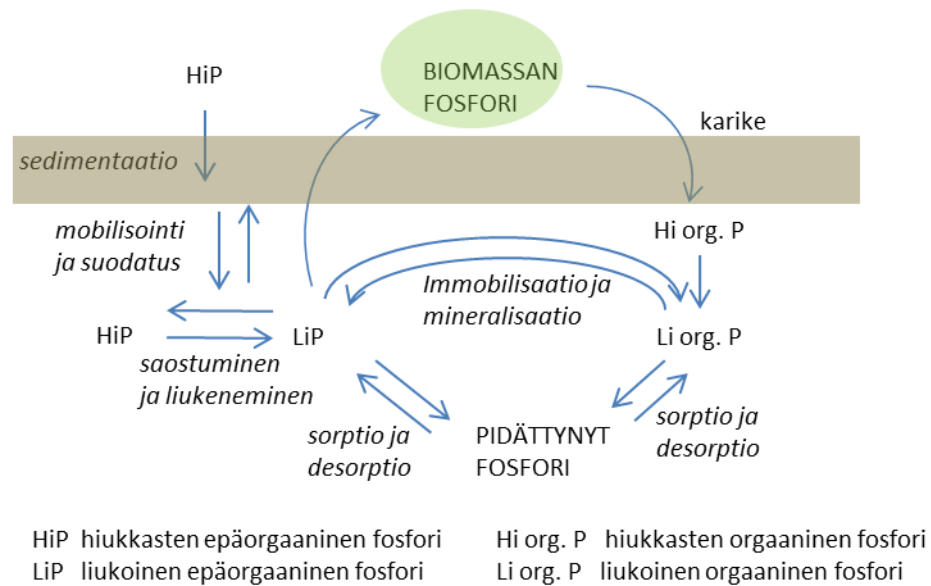
- maaliuoksessa oleva epäorgaaninen ja orgaaninen fosfori
- hiukkasten pinnoille pidättynyt fosfori
- maan orgaanisessa aineksessa oleva fosfori
- kemiallisesti saostunut fosfori ja
- rapautumattomassa kiviaineksessa oleva fosfori.

Huleveden laadunhallinnan näkökulmasta ensisijainen jako voidaan tehdä liukoisen ja hiukkaspinnoille pidättyneen fosforin perusteella. Hulevedessä oleva fosfori on pääosin kiinnittyneinä erilaisiin hulevedessä oleviin partikkeleihin ja vain pieni osa fosforista on liukoisessa muodossa. Partikkeleihin pidättyneen fosforin etuna on se, että sitä voidaan poistaa vedestä suodattamalla. Fosfori on kuitenkin suurelta osin pidättynyt pieniin hiukkasiin ( $< 150 \mu\text{m}$ ) (Miguntanna ym. 2013) ja suodatusmenetelmät voivat olla tämän hienojakoisen aineksen osalta tehottomia. (Cahill 2012, 48)

Biopidätysrakenteen hydraulinen kuormitus voi saada rakenteeseen pidättyneen hienoaineksen ja sen myötä hienoainekseen pidättyneen fosforin huuhtoutumaan rakenteesta. Erityisesti kolloidiset partikkelit (1 nm – 1  $\mu\text{m}$ ), jotka ovat tehokkaita fosforin pidättäjiä, mutta toisaalta eivät asetu vakaasti maaprofiiliin, ovat merkittäviä fosforin huuhtoutumisen kannalta. Myös orgaanisen aineksen fosfori voi huuhtoutua maasta helposti, koska se ei ole yhtä tiukasti sitoutunut maahan kuin epäorgaaninen fosfori. (Haygarth & Jarvis 2002, 43-45)

Vaikka liukoisen fosforin osuus hulevedessä on pieni, sitä ei voi jättää tarkastelussa huomiotta. Liukoisessa muodossa olevasta fosforista suurin osa on ortofosfaattia (Miguntanna ym. 2013), joka on kasveille käyttökelpoinen fosforin muoto (Wilkinson 2000, 69). Fosfori rajoittaa yleensä kasvua järviekosysteemeissä (Correll 1999), ja liukoisen fosforin päätyminen järviekosysteemiin edesauttaa järven rehevöitymiskehitystä. Näin ollen biopidätysrakenteen maa-aineksen kykyyn pidättää liukoista fosforia on syytä kiinnittää huomiota.

Roy Poirier (2009, 82) on kuvannut biopidätysrakenteessa tapahtuvaa fosforinkiertoa kuvan (5) mukaisesti. Kaikkia kuvattuja prosesseja ei välttämättä tapahdu rakenteessa, ja toisaalta eri prosessien merkitys fosforikierrossa vaihtelee olosuhteiden mukaan, joskus hyvinkin nopeasti. Biopidätyksen osalta tärkeimmät prosessit liittyvät maaliuoksessa olevien fosfaatti-ionien pidättymiseen maahiukkasten pinnoille ja niiden vapautumiseen takaisin maaliuokseen. Tämän lisäksi kasvien fosforinotto ja orgaanisen fosforin prosessit ovat tärkeä osa fosforin kiertoa, mutta tätä dynamiikkaa ei vielä kaikilta osin tunneta kovin hyvin (Harper 2006).



Kuva 5. Fosforin kiertoon liittyviä prosesseja Roy-Poirier (2009, 82) mukaan

Toisin kuin nitraatti-ionit, fosfaatti-ionit voivat pidäytyä spesifillä mekanismilla negatiivisesti varatuille hiukkaspinnoille. Pidäytymiseen vaikuttavia maa-ainestekijöitä ovat saven, orgaanisen aineksen sekä raudan ja alumiinin määrä. Lisäksi maaperän happamuus ja suolapitoisuus vaikuttavat fosforin pidäytymiseen. Saven pinnalle adsorboituneet alumiini- ja rautaoksidit pidättävät fosfaatteja maaliuoksesta ja maaperässä olevat alumiini- ja rautaoksidit osallistuvat myös muihin fosfaatin sitomisreaktioihin. Orgaaniset fosforiyhdisteet ja humusaineet voivat myös pidäytyä oksidipinnoille ja ne toimivat näin fosfaatin kilpailijoina. Happamuuden osalta, oksidipintojen negatiivinen varaus kasvaa pH:n noustessa, mikä heikentää fosforin sitoutumistaipumusta ja fosforia vapautuu maaliuokseen. Maaliuoksen suolapitoisuuden kasvaessa fosforin siirtyminen maaliuoksesta hiukkaspinnoille puolestaan tehostuu. Suolapitoisuuden osalta on lisäksi syytä ottaa huomioon se, että tulvatilanteessa maaveden määrä lisääntyy ja suolapitoisuus alenee. Tämän seurauksena maahiukkasista alkaa irrota fosfaattia maaveteen ja vapautunut fosfaatti voi huuhtoutua pois rakenteesta veden mukana. (Harper ym. 2006, 33-34; Hartikainen & Peltovuori 2002)

## 6.2 Tutkimustuloksia

Davis ym. (2009) ja Roy-Poirier ym. (2010) ovat koostaneet katsaukset biopidätystutkimuksista. Fosforin pidäytymisen osalta tulokset ovat olleet vaihtelevia. Davis ym. (2009) tarkastelemissa tutkimuksissa kokonaisfosforin määrän muutos (%) vaihteli välillä -240 ja 99. Selittävänä tekijänä voimakkaalle fosforin huuhtoutumiselle oli suuri alkuperäinen fosforimäärä biopidätysrakenteen maa-aineksessa. Eniten fosforia pidättävät rakenteet olivat puolestaan olleet pilotti- ja laboratoriokokeita eivätkä täysimittaisia pidätysrakenteita. Tutkimuksissa, joissa oli tarkasteltu

biopidätysrakenteiden toimivuutta kenttäoloissa, kokonaisfosforin vähennys oli ollut enimmillään 79 %. Suomessa biopidätystä on tutkittu Lahdessa lysimetrikentällä ja tuossa tutkimuksessa (Valtanen ym. 2012) fosfaatin on todettu pidättyvän rakenteeseen hyvin (pidättyminen yli 90 %).

Rakenteen maa-aineksen fosforipitoisuuden ohella Roy-Poirier ym. (2009) nostavat tutkimustuloksista esiin kasvillisuuden vaikutuksen fosforin pidättymiseen. Esimerkiksi Bratieres ym (2008) tutkimuksessa kasvit, joilla on tiheä juuristo sekä runsaasti hienojuuria tai symbioosi ravinteidenottoa edistävän mykorritsan kanssa, vähensivät tehokkaasti fosforia hulevedestä. Pääosa fosforista oli kuitenkin tässäkin tapauksessa kiinnittynyt huleveden kiintoaineeseen, joten huleveden suodattuminen rakennekerrosten läpi oli pääasiallinen fosforia pidättävä prosessi.

Katsausten jälkeen ilmestyneissä tutkimuksissa on tarkasteltu kaksivaiheisen biopidätysrakenteen vaikutusta fosforin pidättymiseen (Yang ym. 2013), viileiden (Blecken ym. 2010) ja kylmien (Khan ym. 2012b) olosuhteiden vaikutusta pidätyksen tehokkuuteen sekä alumiinipitoisten lisäaineiden vaikutusta fosforin pidättymiseen biopidätysrakenteessa (O'Neill & Davis, 2012 a ja 2012 b). Komlos ja Traver (2012) esittävät lisäksi pitkän aikajänteen tutkimustuloksia biopidätysrakenteen toimivuudesta ortofosfaatin pidättäjänä.

Yang ym. (2013) esittelevät tuloksiaan kaksivaiheisen biopidätysrakenteen toimivuudesta ravinteiden ja haitta-aineiden pidättymisessä. Kaksivaiheinen rakenne sisältää sekä vedellä kyllästyneen että kyllästymättömän osan, mutta ei tavanomaisena pohjaosan varastokerrokseen perustuvana ratkaisuna. Rakenne kykeni pidättämään lähes kaiken huleveden mukana tulleen fosfaatin huolimatta siitä, että fosfaattikuormitus tutkimuksessa oli suuri (10 mg/l). Tutkimuksessa arvioitiin malliperusteisesti, että rakenteen toiminnallinen elinikä tutkimuksessa käytetyissä ilmasto-oloissa on liukoisen fosfaatin osalta 3,4 vuotta kuormituksen ollessa 10 mg/l ja 11 vuotta, kun kuormitus on 3 mg/l.

Blecken ym. (2010) ja Khan ym. (2012b) ovat tarkastelleet viileiden ja kylmien olosuhteiden vaikutusta fosforin pidättymiseen biopidätysrakenteessa. Viileissä olosuhteissa fosfori pidättyi hyvin (90 %) rakenteeseen, kun kuormituksesta suurin osa oli partikkelimuotoista eli kiinnittynyt hulevedessä olevaan kiintoaineeseen (Blecken ym. 2010). Sen sijaan Khan ym. (2012b) tutkimuksessa fosforia huuhtoutui rakenteesta kylmissä olosuhteissa. Fosforin huuhtoutuminen liittyi orgaanisen aineksen hajoamiseen ja fosforin vapautumiseen. Rakenteessa käytetyssä maa-aineksessa oli 9 % orgaanista ainesta (Khan ym. 2012a), kun mm. Hunt ja Lord (2006) suosittelevat orgaanisen aineksen määräksi enimmillään vain 5 %:a, silloin kun tavoitteena on huleveden sisältämän fosforin määrän vähentäminen.

Alumiini ja raudan määrä maaperässä vaikuttaa fosforin pidättymiseen. O'Neill ja Davis (2012 a ja 2012 b) ovat tutkineet juomaveden puhdistuksessa käytettävien alumiiniyhdisteiden uudelleekäyttöä

biopidätysrakenteessa fosforin pidätyksen tehostajana. Maa-aines, jossa oli 5 % alumiiniyhdistettä, 3 % hienojakoista lehtipuukuorikatetta sekä 92 % savensekaista hiekkaa (paino-%) pidatti koerakenteessa 88,5 % fosforista. Lucas ja Greenwayn (2011) tutkimuksessa kokeiltiin myös luonnostaan runsaasti alumiinia ja rautaa sisältävän *krasnozem* –maan käyttöä fosforia pidättävässä biopidätysrakenteessa ja tutkimuksen mukaan *krasnozem* –maan fosforin pidätyskyky oli hyvä. Toisaalta Randall (2011) mukaan alumiiniyhdisteiden käyttö maa-aineksen lisäaineena ei välttämättä paranna merkittävästi biopidätyksen tehokkuutta fosforin osalta. Rakenteessa olevaan organisen aineen määrään ja laatuun tulisi sen sijaan kiinnittää huomiota niin, että orgaanista ainesta on riittävästi kasvien kannalta mutta se on hitaastihajoavassa muodossa.

Komlos ja Traver (2012) ovat tarkastelleet biopidätysrakenteen toimivuutta fosforin pidättäjänä yhdeksän vuoden mittaustulosten perusteella. Ortofosfaatti pidättyi rakenteeseen hyvin koko tarkastelujakson ajan. Maan pintaosassa oli tarkastelujakson lopussa fosfaatilla kyllästynyt 10 cm:n paksuinen kerros, mutta fosfaatin määrä alemmissa maakerroksissa oli pienempi ja odotettavissa oleva rakenteen toimintaikä fosfaatin osalta oli yli 20 vuotta. Mahdollinen pintamaakerroksen vaihto voi siten olla yksi keino pidentää biopidätysrakenteen toimintaikää fosfaatin osalta.

### 6.3 Kirjallisuuteen perustuva rakenneohjeistus

Biopidätysrakenteessa toimii erilaisia prosesseja, joista osa vähentää ja osa lisää huleveden fosforin määrää. Biopidätysrakenteessa huleveden sisältämää fosforia vähentäviä prosesseja ovat huleveden suodatus maakerrosten läpi ja liukoisen fosforin pidättyminen maahiukkasten pinnalle. Fosforin huuhtoutuminen voi puolestaan liittyä mm. fosforin vapautumiseen orgaanisesta aineksesta, rakenteen hydrauliseen kuormitukseen ja rakenteen fosforisaturaatioon. Rakenteen suunnittelussa on siten kiinnitettävä huomiota rakenteen fosforinpidätyskykyyn mutta myös siihen, että rakenteeseen pidättynyt tai siinä alkujaan oleva fosfori ei huuhtoudu huleveden mukana pois rakenteesta.

Valtaosa huleveden mukana tulevasta fosforista on partikkelimuotoista. Fosforin vähentämiseen tähtävässä biopidätysrakenteessa olennaista on siten kiintoaineen suodatus. Erityisesti suodatuksessa pitäisi pystyä erottamaan hulevedestä hienoainesta, koska hienoaineksessa oleva fosfori on pääosin ortofosfaattia. Biopidätysrakenteen pidättää tavallisesti hyvin kiintoainetta, kuten aiemmin luvussa (2.1.2) on todettu. Kiintoainetta voi kuitenkin huuhtoutua rakenteesta erityisesti hydraulisessa kuormitus-tilanteessa, joten rakenteen mitoitus ja rakennekerrosten vedenjoh- tavuuteen on kiinnitettävä huomiota. Huleveden nopea virtaus rakenteen läpi sekä valuma-alueeseensa verrattuna liian pienikokoinen, ja siten usein hydraulisesti kuormitettu, biopidätysrakenteen suurentavat kiintoaineen huuhtoutumisriskiä. Fosforia huuhtoutuu maaliuokseen tulvatilanteissa myös maahiukkasten pinnalta, koska maaliuoksen suolapitoisuus on alhainen. Samanlaista huuhtoutumista voi tapahtua myös silloin, kun

rakenteen pohjalla on vedellä kyllästynyt varastokerros. Tämän vuoksi fosforia pidättävä maakerros on sijoitettava riittävän etäälle (vähintään 600 mm) varastokerroksesta.

Liukoisen fosforin vähentämisessä olennaista on maa-aineksen fosforinpidätyskyky, johon vaikuttaa ennen kaikkea maa-aineksessa olevan saven määrä. Savea tulisi olla riittävästi liukoisen fosforin pidättymistä ajatellen mutta toisaalta liian suuri saven määrä pienentää rakenteen vedenjohtavuutta ja siten vähentää huleveden käsittelykapasiteettia. Hunt ym. (2012) mukaan liukoisen fosforin vähentämisessä huleveden viipymääjän rakenteessa tulisi olla melko pitkä. Vedenjohtavuuden ohella viipymäaikaa voidaan säätää rakenteen kokonaispaksuudella, jonka olisi hyvä olla 600-900 mm.

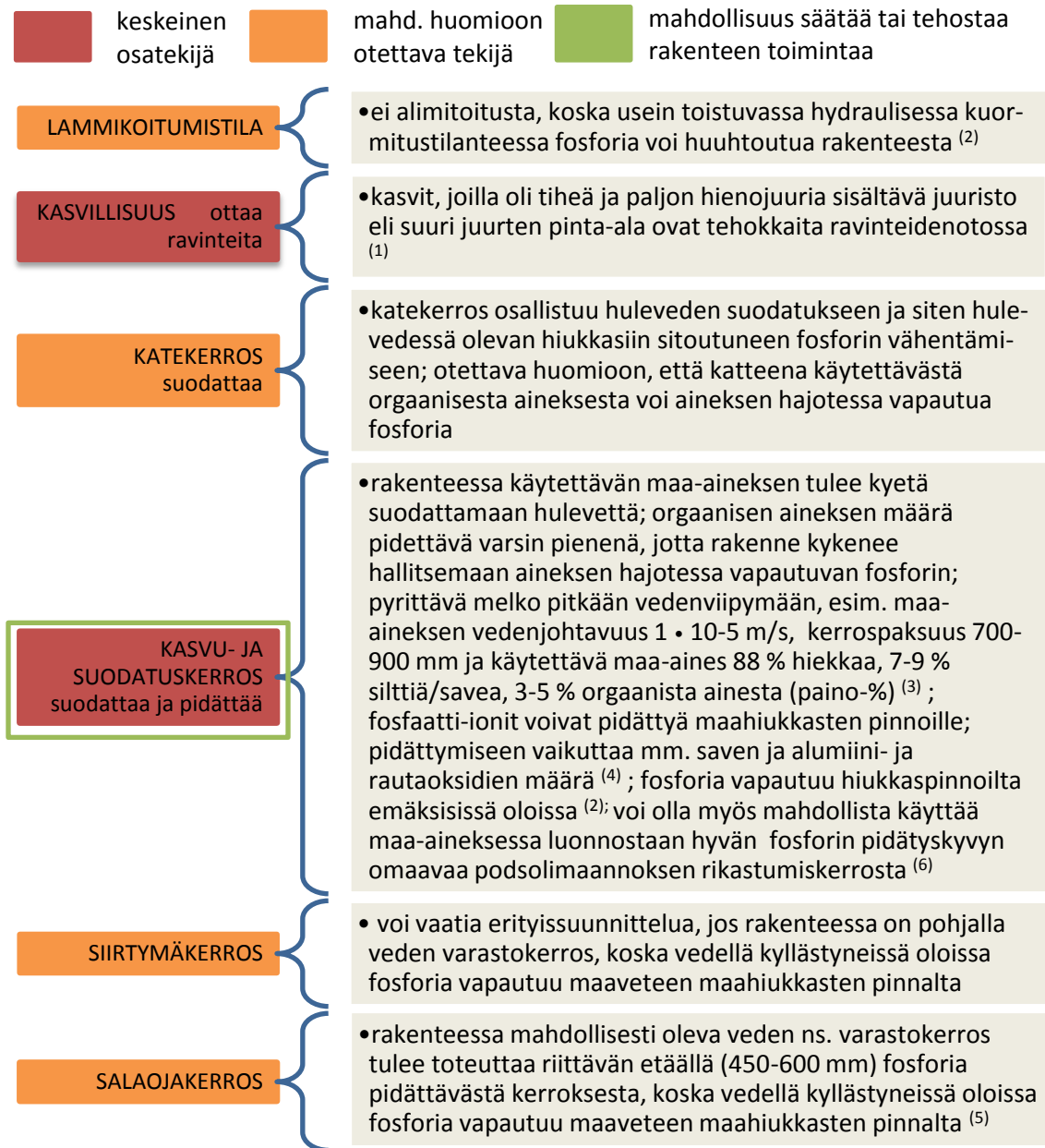
Hunt ja Lord (2006) mukaan sopiva maa-aines huleveden fosforin vähentämiseen tähtäävässä biopidätysrakenteessa on pääosin hiekkaa (88 %). Hienoaineksen määrä on 7-9 % ja orgaanista ainesta on 3-5 % , jolloin rakenteen vedenjohtavuus on n. 2 tuumaa/h (0,014 mm/s). Orgaanisen aineksen määrä biopidätysrakenteessa on syytä pitää varsin pienenä, jotta rakenne kykenee hallitsemaan orgaanisen aineksen hajotessa vapautuvan fosforin. Maa-aineksen vedenjohtavuus voi olla hieman suurempi kuin typen pidättämiseen tähtäävässä biopidätysrakenteessa.

Kasvillisuuden on todettu parantavan biopidätysrakenteen kykyä vähentää hulevedessä olevan fosforin määrää. Kasvit, joilla on tiheä juuristo ja paljon hienojuuria tai symbioosi ravinteidenottoa tehostavan mykorrisan kanssa ovat tutkimuksissa osoittautuneet hyviksi kasvivalinnoiksi fosforin vähentämisessä hulevedestä. Toisaalta tämä ei välttämättä johda parhaaseen tulokseen rakenteen kokonaistoiminnan kannalta, sillä tällaiset kasvit voivat pienentää rakenteen vedenjohtavuutta kuten Le Coustumer ym. (2012) on todennut.

Alumiiniyhdisteiden lisääminen biopidätysrakenteen maa-ainekseen voi olla yksi mahdollisuus parantaa rakenteen kykyä vähentää hulevedessä olevan fosforin määrää. Tutkimustuloksia on kuitenkin tältä osin vielä varsin niukasti. Toinen ja erityisesti Suomen oloissa hyvin mahdollinen keino edistää fosforin pidättymistä on lisätä biopidätysrakenteessa käytettävään maa-ainekseen luonnostaan amorfista alumiinia ja rautaa sisältävän podsolimaannoksen rikastumiskerrosta. Suomen metsämaiden maannoksista n. 50 % on podsolimaannoksia (Tamminen 2009) ja Väänänen ym. (2008) mukaan podsolimaannoksen fosforin pidätyskyky on hyvä.

## Biopidätysrakenteen kohdennetussa huleveden laadunhallinnassa

Taulukko 5. Kooste fosforia pidättävän biopidätysrakenteen rakenneosista (Bratieres ym.2008 (1); Hartikainen & Peltovuori 2002 (2); Hunt ja Lord 2006 (3) ; Harper ym. 2006 (4) ; Hunt ym. 2012 (5); Väänänen ym. (2008) (6) )



## 7 ÖLJYT JA PAH

### 7.1 Öljyjen ja PAH –yhdisteiden prosessit biopidätysrakenteessa

Ympäristön saastuminen liittyy usein joko välittömästi tai välillisesti öljyyn ja öljyperäisiin yhdisteisiin. Ympäristöön näitä aineita vapautuu esimerkiksi liikenteen päästöissä ja erilaisissa onnettomuuksissa, ja vuodon sattuessa kohteena ovat usein maa- ja vesiekosysteemit. Erilaisilla menetelmillä voidaan poistaa, vähentää tai lieventää vuodosta aiheutuvia haittavaikutuksia, mutta moniin menetelmistä liittyy lieveilmiöitä aiheuttavaa kemikaalien käyttöä ja menetelmät voivat olla kalliita. (Speight & Arjoon 2012, 1-5)

Biopuhdistuksessa tietyt bakteerit, sienet ja levät hajottavat öljyjä ja PAH-yhdisteitä aerobisissa tai anaerobisissa oloissa yksinkertaisempaan muotoon ja edelleen, mikäli hajoaminen on täydellistä, epäorgaaniseksi aineiksi, vedeksi ja hiilidioksidiksi (aerobiset olot) tai metaaniksi (anaerobiset olot). Toisin kuin useimmat muista menetelmistä, biopuhdistus on edullinen ja toimiva erityisesti pienillä haitta-ainemäärillä sekä perustuu maaperän ja sen mikrobien luontaisiin prosesseihin. (Haritash & Kaushik 2009; Speight & Arjoon 2012, 1-5) Biopuhdistusta onkin tutkittu viime vuosina myös hulevedessä olevien öljyjen ja PAH-yhdisteiden määrän vähentämisessä (mm. Hong ym. 2006; DiBlasi ym. 2009, LeFevre ym. 2011 ja LeFevre ym. 2012). Tietoikkunaan 2 on koottu lisätietoa öljy-yhdisteistä ja niiden biohajoavuudesta.

#### TIETOIKKUNA 2.

Raakaöljy on kompleksinen seos, joka koostuu pääosin eripituisista hiilivedyistä. Öljyhiilivedyt ovat hyvin monimuotoisia ja rakenteellisesti ne voivat olla on mm. suorina, haaroittuneita, syklisiä, aromaattisia ja polyaromaattisia yhdisteistä ja hiiliatomien välisiltä sidoksiltaan yksinkertaisia (alkaaneja), kaksoisidoksellisia (alkeeneja) ja kolmoissidoksellisia (alkyyneja).

Jalostuksessa öljy jaetaan hiilivetykoostumukseltaan erilaisiin jakeisiin. Alimmissa lämpötiloissa tislautuvat kevyet jakeet, kuten moottoribensiini, koostuvat pääosin alkaaneista, mutta myös alkeeneista, sykloalkaaneista ja aromaattisista yhdisteistä. Keskitisleet, kuten dieselöljy ja kevyt polttoöljy, sisältävät pääosin suoraketjuisia ja rengasrakenteisia alkaaneja ja aromaattisia yhdisteitä. Raskaimmissa jakeissa mm. raskaassa polttoöljyssä, voiteluöljyssä ja bitumissa olevat yhdisteet muodostuvat alifaattisista, syklisistä ja aromaattisista molekyyleistä. Jakeet ovat ominaisuuksiltaan erilaisia ja eroavat siten toisistaan mm. biohajoavuudeltaan, reagointitavaltaan ja –nopeudeltaan.

Maaperässä yhdisteet altistuvat fysikaalisille, kemiallisille ja biologisille prosesseille, jotka alentavat yhdisteiden pitoisuutta. Osa yhdisteistä poistuu maasta haihtumalla. Tyypillistä näille yhdisteille on korkea höyrönpaine. Tällaisia ovat esimerkiksi moottoribensiini. Hiilivetyjen imeytymiseen ja kulkeutumiseen maaperässä puolestaan vaikuttaa aineen vesiliukoisuus. Liukoisimpia ja siten helpoimmin kulkeutuvia ovat moottoribensiini ja yhden tai kaksi bentseenirengasta sisältävät aromaattiset yhdisteet. Monirenkaiset

polyaromaattiset rakenteet ja pitkäketjuiset asfalteenit ovat puolestaan rasvaliukoisia ja pidättyvät tiukasti maapartikkeleihin tai kasvien juuriin.

Yhdisteiden biohajoavuus vaihtelee. Alkaaneja voivat hajottaa useat sienet ja bakteerit. Alkaaneista helpoimmin hajoavat keskipituiset hiiliketjut. Toksisimpia alkaaneista kasveille ja maaperäeliöstölle ovat kevyet jakeet, koska ne liuottavat solukalvoja. Suoraketjuisten alkaanien lisäksi myös haaroituneet hiilivedyt voivat hajota mikrobiologisesti, tosin hitaammin kuin suoraketjuiset. Sen sijaan sykloalkaanit ja alkeenit ovat vähemmän hajoavia kuin alkaanit. Esimerkiksi syklopentaani, sykloheksaani ja sykloheptaani ovat liuottavina myrkyllisiä monille hiilivetyjä hajottaville mikrobeille. Aromaattisista yhdisteistä ainakin tolueeni, ksyleeni ja bentseeni voivat aerobisissa oloissa hajota maassa mikrobiologisesti.

Polysykliset aromaattiset hiilivedyt (PAH) ovat muodostuneet kahdesta tai useammasta yhteen fuusioituneesta bentseenirenkaasta. PAH-yhdisteet ovat myrkyllisiä, mutageenisia ja karsinogeenisiä aineita, jotka ovat ympäristössä hyvin laajalle levinneitä. Tavallisimpia PAH-yhdisteitä voivat hajottaa lukuisat bakteeri-, sieni- ja levälajit. Yksittäisen yhdisteen hajoamisnopeuteen vaikuttaa mm. aromaattisten renkaiden määrä. Kaksi- ja kolmirenkaiset yhdisteet, esim. naftaleeni, fenantreeni, asenafteeni ja antraseeni, hajoavat nopeasti. Neljä- ja viisirenkaisilla yhdisteillä mikrobiologinen hajoaminen on mahdollista, mutta hidasta. Yli viisirenkaiset PAH-yhdisteet voivat hajota kometaabolisesti prosessissa, jossa mikrobi käyttää hiilenlähteenään jotakin toista yhdistettä.

Lähde: (Sillanpää 2007, 7-11)

Haitta-aineiden biohajoamisen määrään ja nopeuteen vaikuttavat mm. pH, lämpötila, hapen määrä, mikrobilajisto ja mikrobimäärä, ravinteiden määrä sekä hajotettavan yhdisteen ominaisuudet. Lisäksi biohajoamiseen vaikuttavat maaperän ominaisuudet, kuten raekokojakauma. (Haritash & Kaushik 2009; Speight & Arjoon 2012, 3-5) Taulukkoon 6 on koottu olosuhteita, jotka suosivat biohajoamista.

Taulukko 6. Biohajoamista suosivat olosuhteet

Tekijä	olosuhteet
<b>mikrobit</b>	kyseistä haitta-ainetta hajottavia mikrobeja (bakteerit, sienet, levät) joko luontaisesti tai lisättynä (Speight & Arjoon 2012, 3-5)
<b>happi</b>	haitta-aineiden hajoamista tapahtuu sekä aerobisissa että anaerobisissa oloissa; anaerobisissa oloissa hajoaminen on hidasta; aerobista biohajoamista varten riittävä happipitoisuus maassa 2 % tai 0,4 mg/l maavedessä (Speight & Arjoon 2012, 3-5)
<b>vesi</b>	biohajoamisessa sopiva veden määrä 20-80 % kyllästyskosteudesta; mikrobien aineenvaihdunta vähenee ja biohajoaminen hidastuu, jos veden määrä on liian alhainen ( 10 % kyllästyskosteudesta) (Saadoun & Al-Ghzawi 2005, 180)
<b>ravinteet</b>	typen ja fosforin lisäyksellä voidaan usein tehostaa

	biohajoamista (Saadoun & Al-Ghzawi 2005, 182; Speight & Arjoon 2012, 3-5); typen osalta voidaan hyödyntää myös symbioottista typensidontaa (Sillanpää 2007, 11)
<b>lämpötila</b>	vaikuttaa sekä haitta-aineen ominaisuuksiin että mikrobien toimintaan; yleensä biohajoaminen vähenee kun lämpötila alenee tai ylittää optimilämpötilan; maaperässä hajoaminen on nopeinta lämpötilassa 30-40 °C, suolattomassa vedessä 20-30 °C ja suolaisessa vedessä 15-20 °C (Speight & Arjoon 2012, 328); biohajoamista voi tapahtua myös kylmissä olosuhteissa, koska osa kylmyyttä sietävistä mikro-organismeista (ns. psykrotrofit) kykenee hajottamaan haitta-aineita myös alhaisissa lämpötiloissa (jopa 0 °C) (Rike ym. 2003; Sillanpää 2007, 12-13)
<b>pH</b>	neutraalit tai hiukan emäksiset olot (pH 7-7,5) ovat sopivimmat mikrobeille (Saadoun & Al-Ghzawi 2005, 181)

Edellisten tekijöiden lisäksi kasvillisuuden käytöllä voidaan tehostaa biohajoamista. Kasvien käyttö saastuneen maan tai veden puhdistamisessa perustuu haitta-aineiden hajottamiseen (fyto-degradaatio), poistamiseen (fytoekstraktio) tai sitouttamiseen (fytostabilointi). Tämän lisäksi fyto-remediaatioon voidaan laskea kuuluvaksi haitta-aineiden hajottaminen, jota tapahtuu kasvien juuristovyöhykkeessä elävien bakteerien ja sienten toimesta. Esimerkiksi dieselöljyn ja moottoribensiinin osalta tätä pidetään pääasiallisena hajottamistapana. Juuristovyöhykkeen mikrobiston olosuhteet ovat ympäröivää maata paremmat, koska juuristo parantaa vyöhykkeen happitilannetta, lisää orgaanisen aineksen määrää sekä tarjoaa paljon juuripintaa mikrobiston kasvualustaksi ja haitta-aineiden sitoutumispinnaksi. Lisäksi kasvien juurieritteet voivat mm. stimuloida öljyjä ja PAH-yhdisteitä hajottavien mikrobien toimintaa. (Speight & Arjoon 2012, 5-6; Sillanpää 2007, 5, 10)

## 7.2 Tutkimustuloksia

Biopuhdistus on menetelmänä tunnettu jo nelisenkymmentä vuotta, mutta vasta viimeisen kymmenen vuoden aikana on laajemmin ryhdytty tarkastelemaan sen mahdollisuuksia huleveden laadunhallinnassa. Biopidätysrakenteen osalta ensimmäisiä tutkimuksia olivat Hsieh ja Davis (2005) ja Hong ym. (2006) laboratorionkokeet ja DiBlasi ym. (2009) kenttäkoe. Tämän jälkeen tutkimusta ovat tehneet LeFevre ym. (2012) ja LeFevre (2012) väitöskirjassaan sekä LeFevre ym. (2013) tarkastellessaan kasvien juurieritteiden vaikutusta PAH-yhdisteiden biosaatavuuteen ja siihen liittyvään biohajoavuuteen.

Hsieh ja Davis (2005) saivat erinomaisia haitta-aineiden määrän vähentämistuloksia laboratorio- ja kenttäkokeessa monille huleveden haitta-aineille, mukaan lukien öljyt / voiteluöljyt. Huleveden öljyistä / voiteluöljyistä poistui yli 96 % kaikissa tutkituissa maarakenteissa (mm. hiekka, savinen hiekka, lehtikomposti) ja kenttäkokeessa tutkituissa

biopidätysrakenteissa. Tutkimuksessa ei kuitenkaan tarkasteltu haitta-aineiden hajoamista biopidätysrakenteessa.

Hong ym. (2006) tarkastelivat öljyperäisten haitta-aineiden pidättymistä ja hajoamista biopidätysrakenteessa laboratorio-olosuhteissa. Koerakenteen pinnassa oli haitta-aineiden pidättämistä varten ohut katekerros lehtikompostista. Katteen tarkoituksena oli tarjota tutkimuksessa haitta-aineina käytetyille aromaattisille hiilivedyille (naftaleeni, tolueni) ja moottoriöljylle hiilipitoinen suodatus- ja sorptiokerros sekä mikrobiologisesti aktiivinen biopuhdistuskerros. Rakenteeseen syötetyssä vedessä oli myös ravinteita (typpi ja fosfori), mutta ei raskasmetalleja. Katekerros pidatti tehokkaasti syötettyjä haitta-aineita ja mikrobiologisesti aktiivisena helpotti näiden aineiden biohajoamista. Liuenneesta naftaleenista rakenne poisti 90 % ja hiukkasmuotoisesta naftaleenista 97 %. Moottoriöljystä saatiin rakenteella pois 80 % ja liuenneesta toluenista 83 %. Biohajoaminen oli nopeaa, sillä rakenteeseen pidättyneet haitta-aineet hajosivat 3-10 päivässä eikä rakenteeseen kertynyt hiilivetyjä. Katekerroksesta oli myös muita hyötyjä, kuten rakenteen kosteuden säätely, joten tutkimuksessa päädyttiin suosittamaan ohuen (n. 3 cm) paksun lehtikompostista tehdyn katekerroksen sijoittamista biopidätysrakenteen pinnalle.

Kenttäkokeessa DiBlasi ym. (2009) havaitsivat PAH-yhdisteiden vähenemisen korreloivan positiivisesti kiintoaineen määrän vähentämisen kanssa. Rakenne vähensi PAH-yhdisteiden määrää vuositasolla 87 % (massaperusteisesti). Valuma-alueesta läpäisemätöntä pintaa oli n. 90 % ja rakenteeseen johdettiin vettä pääosin paikoitusalueelta ja kadulta sekä betonipintaiselta jalkakäytävältä. Rakenteeseen tullessa hulevedessä olevista PAH-yhdisteistä n. 70 % oli hitaasti hajoavia yli 4-renkaisia yhdisteitä ja näiden yhdisteiden havaittiin kertyvän maa-ainekseen toisin kuin 2-3 -renkaisten yhdisteiden, joiden kertymä rakenteeseen oli pienempi. Rakenteesta otettujen maanäytteiden perusteella PAH-yhdisteet pidättyivät maan pintakerrokseen lähelle huleveden syöttökohtaa. Tutkimuksessa ei kuitenkaan tehty pitkän aikavälin seuranta PAH-yhdisteiden kertymisestä rakenteeseen, joten ohjeistusta mahdollisesta rakenteen ylläpitotoimena tehtävästä maan pintakerroksen vaihdosta ei voitu antaa.

Öljihiilivetyjen kertymistä biopidätysrakenteeseen tarkastelleessa tutkimuksessaan LeFevre ym. 2012 ovat todenneet, että vaikka hiilivetyjen määrä biopidätysrakenteen maa-aineksessa oli suurempi kuin rakenteen viereisillä maa-alueilla, ei hiilivetyjen määrä kuitenkaan ylittänyt paikallisia (Minnesota) saastuneen pintamaan raja-arvoja. Hiilivetyjen määrä maa-aineksessa oli pienempi kuin laskennallisesti olisi voinut olettaa, joten rakenteella on kyky hiilivetyjen mikrobiologiseen hajottamiseen. Tutkimuksessa arvioitiin myös, että biopidätysrakenne on aerobisten olojen vuoksi tehokkaampi ympäristön hiilivetyjen hajottamisessa kuin hulevesilammikko, jonka pohjasedimenteissä vallitsevat hapettomat olot. Lisäksi tutkimuksen mukaan tiheän ja syväjuurisen kasvillisuuden käyttö biopidätysrakenteessa voi suosia haitta-aineita hajottavien mikrobien toimintaa ja siten edesauttaa haitta-aineiden

vähentämistä. Tutkimuksessa otettiin näytteet n. 60 biopidätysrakenteesta, jotka sijaitsivat maankäytöltään erilaisilla alueilla. Kaikista rakenteista ei ollut saatavilla kattavia taustatietoja, mutta rakenteet, joista tiedot saatiin olivat olleet toiminnassa 2-5 vuotta.

### 7.3 Kirjallisuuteen perustuva rakenneohjeistus

Öllyjen ja PAH –yhdisteiden vähentäminen biopidätysrakenteessa perustuu haitta-aineiden pidättämiseen rakenteeseen ja aineiden biohajoamiseen, fytoimediaatioon ja joillain haitta-aineista myös haihtumiseen. Aineiden ominaisuudet ja siten niiden käyttäytyminen maaperässä vaihtelevat esimerkiksi liukoisuuden, pidättymisvoimakkuuden ja biohajoavuuden osalta.

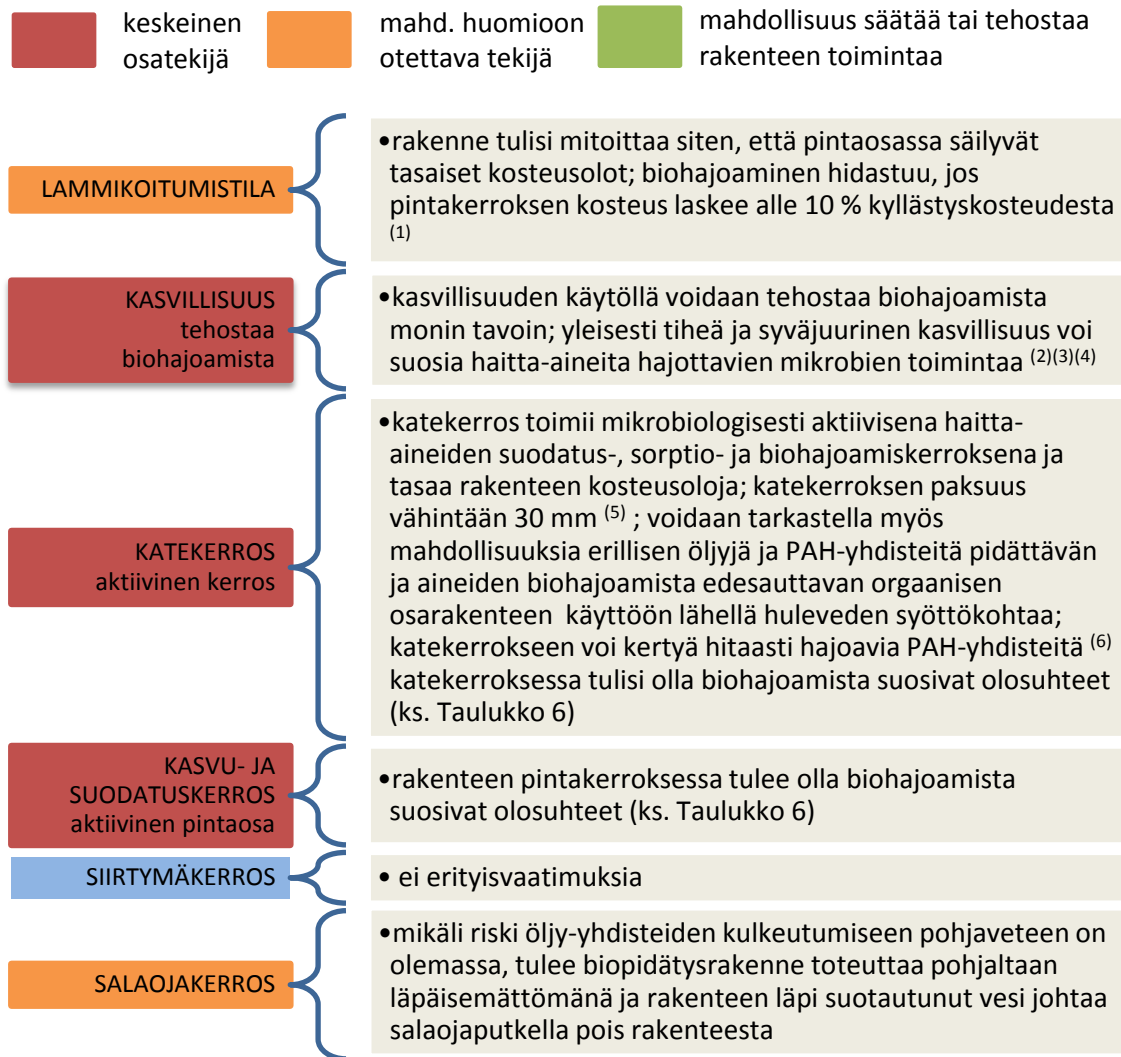
Haitta-aineiden pidättymistä rakenteeseen voi sekä öljyjen että PAH –yhdisteiden osalta tutkimusten mukaan tehostaa ohut katekerros rakenteen pinnalla. Katekerros toimii mikrobiologisesti aktiivisena haitta-aineiden suodatus-, sorptio- ja biohajoamiskerroksena sekä tasaa rakenteen kosteusoloja.

Haitta-aineiden biohajoamista suosivat olosuhteet, joissa haitta-aineita hajottavat mikrobit viihtyvät. Käytännössä rakenteen pintakerroksessa tulisi siten olla riittävästi happea, vettä ja ravinteita, sopiva lämpötila ja neutraalit olot. Tässä yhteydessä on syytä ottaa huomioon, että nämä samat tekijät vaikuttavat myös rakenteeseen huleveden mukana tulevien taudinaiheuttajien säilymiseen. Toisaalta yhtäläillä samat olosuhdetekijät vaikuttavat myös muuhun rakenteen luontaiseen mikrobistoon ja siten välillisesti mikrobikilpailun ja saalistuksen kautta myös patogeenien määrään. Biohajoamista voi tapahtua myös kylmissä olosuhteissa, sillä osa kylmyyttä sietävistä mikrobeista kykenee hajottamaan haitta-aineita jopa alle 0 °C lämpötiloissa (Rike ym. 2003).

Syväjuurisen ja tiheän kasvillisuuden käyttö tehostaa haitta-aineiden vähentämistä monin tavoin. Vaikutusmekanismit liittyvät haitta-aineiden hajottamiseen, poistamiseen ja sitouttamiseen. Lisäksi mikrobeille muodostuu juuriston lähelle ympäröivää maarakennetta paremmat olot.

## Biopidätysrakenteen kohdennetussa huleveden laadunhallinnassa

Taulukko 7. Kooste öljyä ja PAH-yhdisteitä pidättävän biopidätysrakenteen rakenneosista (Saadoun & Al-Ghzawi 2005 (1) Sillanpää 2007 (2); Speight ja Arjoon (3); Le Fevre ym. 2012 (4); Hong ym. 2006 (5); DiBlasi ym. 2009 (6))



## 8 TAUDINAIHEUTTAJAT

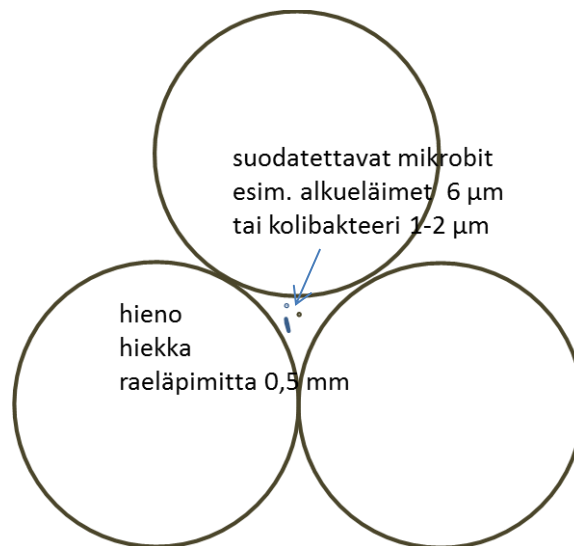
### 8.1 Taudinaiheuttajien prosessit biopidätysrakenteessa

Hulevedessä on tauteja aiheuttavia mikrobeja, kuten erilaisia bakteereja, alkueläimiä sekä viruksia. Yleensä näiden patogeenien esiintymistä vedessä arvioidaan ns. indikaattoriorganismien, kuten tiettyjen ulosteperäisten kolibakteerien, avulla. Indikaattoriorganismit eivät välttämättä ole haitallisia ihmiselle, mutta niiden esiintyminen vedessä kertoo kohonneesta mahdollisuudesta muiden haitallisempien mikrobien

esiintymiseen. (Jamieson ym. 2002; Stevik ym. 2004; Hathaway & Hunt, 2008)

Biopidätysrakenteessa hulevesi suotautuu huokoisen maa-aineksen läpi ja puhdistuu erilaisten biogeokemiallisten prosessien tuloksena. Mikrobeja rakenteeseen pidättävinä mekanismeina toimivat mikrobin mekaaninen suodatus ja mikrobin pidättyminen maahiukkasten pinnalle (Stevik ym. 2004). Rakenteeseen kertyneiden mikrobin hävittämisessä keskeisiä ovat puolestaan rakenteen biottiset ja abioottiset ympäristötekijät, joilla pyritään luomaan rakenteeseen kertyneille mikrobeille epäedulliset olosuhteet. Tällaisia tekijöitä ovat rakenteen kosteus, lämpötila, orgaanisen aineksen määrä, ravinteisuus, pH ja mikrobikilpailu (Jamieson ym. 2002).

Biopidätysrakenteen huokosto toimii mikrobin suodattimena. Stevik ym. (2004) koostaman katsauksen mukaan tärkeimmät suodatustehoon vaikuttavat tekijät ovat rakenteen maalaji, mikrobin koko ja muoto, rakenteen veden määrä ja hydraulinen kuormitus sekä rakenteen tukkeutuneisuus. Pedley ym. (2006) koosteen mukaan eri patogeeneistä virusten kokoluokka on n. 0,02-0,2  $\mu\text{m}$ , bakteerien esim. kolibakteerin *Escherichia coli* koko 0,5  $\mu\text{m}$  x 1,0  $\mu\text{m}$  x 2,0  $\mu\text{m}$  ja alkueläinten 4,0-25  $\mu\text{m}$  (kuva 5). Maalajeista savella, hiesulla ja hiedalla on huokosia, joiden koko mahdollistaa mm. bakteerien suodatuksen. Tosin, jos maalaji on täysin lajittunutta hienoa hietaa (0,02-0,06 mm), jossa ei ole lainkaan hienompia lajitteita, ei huokoskoko riitä mikrobin suodattamiseen.



Kuva 6. Hienon hiekan ja suodatettavien mikrobin kokoeron havainnollistaminen; mukailtu Edzwakl ym. 1998 piirroksesta (Logsdon 2008, 79)

Mikrobin koon ohella myös mikrobin muoto vaikuttaa suodatuksen. Pedley ym. (2006) katsauksen mukaan esimerkiksi bakteerien suodatus kohdistuu erityisesti pitkiin, sauvamaisiin bakteereihin. Katsauksessa on

myös todettu, että suodatuksen merkittävyys poistomekanismina kasvaa kun maa-aineksessa on vähintään 5 % bakteerien keskikokoa hienompia maalajitteita. Näin ollen alkuperäiseltä maa-ainekseltaan karkean rakenteen mikrobien suodatuskyky voi parantua ajan myötä, koska rakenteen huokoskokojakauma muuttuu erityisesti pintaosasta rakenteeseen kertyvän aineksen tukkiessa ja pienentäessä huokosia.

Huokoskoon ohella rakenteen kosteusolot ja hydraulinen kuormitus vaikuttavat mikrobien pidättymiseen. Kyllästyskosteutta kuivemmissä oloissa vesi liikkuu pienemmissä huokosissa ja veden mukana kulkevat mikrobit voivat suodattua tehokkaasti. Rakenteen ollessa kyllästyskosteudessa tai hydraulisesti kuormitettuna vesi liikkuu myös suurissa huokosissa, joiden huokoskoko on liian suuri mikrobien suodattamiseen. Rakenteeseen on myös voinut muodostua makrohuokostoa esim. kasvien juurten avulla tai kuivumisen tuloksena, jolloin vesi ohjautuu kuormitus-tilanteessa suurelta osin makrohuokosiin ja mikrobien suodatus vähenee. Hydraulisessa kuormituksessa rakenteeseen aiemmin pidättynyttä ainesta voi myös huuhtoutua veden mukana pois rakenteesta. (Stevik ym. 2004)

Mikrobien sorptio maahiukkasten pinnalle on suodatuksen ohella toinen biopidätysrakenteeseen mikrobeja pidättävä prosessi. Tähän vaikuttaa sekä fysikaalisia, kemiallisia että mikrobiologisia tekijöitä. Näitä on koostettu taulukossa 8 virusten ja taulukossa 9 bakteerien kulkeutumisen ja pidättymisen sekä maaperässä säilymisen osalta (Pedley ym. 2006; Stevik ym. 2004; Jamiesson ym. 2002).

Taulukko 8. Eri ympäristötekijöiden vaikutus virusten pidättymiseen ja säilymiseen maaperässä (Pedley ym. 2006)

Tekijä	Vaikutus kulkeutumiseen/ adsorptioon	Vaikutus säilymiseen maaperässä
<b>lämpötila</b>	ei tiedossa	alhainen lämpötila edesauttaa säilymistä
<b>mikrobitoiminta</b>	ei tiedossa	vaihtelee; eräät mikroorganismit vähentävät virusten säilymistä, mutta myös päinvastaisia tilanteita esiintyy
<b>kosteus</b>	yleensä kulkeutuminen lisääntyy kyllästyskosteudessa	useimmat virukset selviävät pidempään kosteissa olosuhteissa ja vieläkin pidempään kyllästyskosteudessa
<b>pH</b>	alhainen pH yleensä lisää virusten pidättymistä maahan; korkea pH voi puolestaan vapauttaa viruksia takaisin maaveiteen	useimmat patogeeniset virukset menestyvät parhaiten, kun pH on lähellä neutraalia;
<b>suolat ja niiden määrä</b>	yleisesti maan korkea ionikonsentraatio lisää virusten pidättymistä	tietty kationit voivat pitkittää virusten säilymistä

<b>orgaaninen aines</b>	vaihtelevia tuloksia; liukoinen orgaaninen aines voi kilpailla virusten kanssa pidättymisestä ja johtaa siten lisääntyneeseen kulkeutumiseen; toisaalta kun orgaanisen aineksen määrä on vähäinen pidättyminen voi lisääntyä	vaihtelevia tuloksia; orgaaninen aines voi joissain tilanteissa pitkittää virusten säilymistä
-------------------------	--	---

Taulukko 9. Eri ympäristötekijöiden vaikutus bakteerien pidättymiseen ja säilymiseen maaperässä (Pedley ym. 2006, 71-76; Stevik ym. 2004; Jamieson ym. 2002)

<b>Tekijä</b>	<b>Vaikutus kulkeutumiseen/ adsorptioon</b>	<b>Vaikutus säilymiseen maaperässä</b>
<b>lämpötila</b>	ei tiedossa	alhainen lämpötila edesauttaa säilymistä
<b>mikrobitoiminta</b>	ei tiedossa	maaperän alkuperäiset bakteerit ja alkueläimet voivat inaktivoida ja saalistaa veden mukana maaperään tulevia bakteereja
<b>kosteus</b>	yleensä kulkeutuminen lisääntyy kyllästyskosteudessa	useimmat bakteerit selviävät pidempään kosteissa olosuhteissa
<b>pH</b>	alhainen pH yleensä lisää bakteerien pidättymistä maahan;	bakteerit selviävät parhaiten lähellä neutraalia olevissa oloissa ja kuolevat hyvin happamissa tai emäksisissä oloissa
<b>suolat ja niiden määrä</b>	yleisesti maan korkea ionikonsentraatio lisää bakteerien pidättymistä	ei tiedossa
<b>orgaaninen aines</b>	orgaaninen aines voi edistää bakteerien pidättymistä hiukkaspinoille	orgaaninen aines voi toimia bakteerien ravinnelähteenä ja siten edistää bakteerien säilymistä; orgaaninen aines pidättää myös vettä ja edistää siten bakteerien menestymistä

## 8.2 Tutkimustuloksia

Rusciano ja Obropta (2007) ja Hunt ym. (2008) sekä Garbrecht ym. (2009) ovat eräitä ensimmäisistä tutkimuksista, joissa biopidätysrakennetta on tarkasteltu taudinaiheuttajien pidättämisen ja hävittämisen näkökulmasta. Rusciano ja Obropta (2007) tarkastelivat laboratorio-kokeessa ja Hunt ym. (2008) kenttäkokeessa biopidätysrakennetta

indikaattoriorganismi *Escherichia coli* –bakteerin suodatuksessa ja hävittämisessä. Garbrecht ym. (2009) puolestaan keskittyivät tutkimuksessaan selvittämään laboratorio-oloissa *E. coli* –bakteerin kulkeutumista erilaisten biopidätysrakennetta kuvaavien koemaakerrosten läpi. Tämän jälkeen Zhang ym. (2011) tutkimuksessa nostettiin esiin rakenteessa ajan myötä tapahtuvien muutosten vaikutus *E. coli* –bakteerin pidättymiseen ja häviämiseen. Hathaway ym. (2011) tarkastelivat kenttäkokeessa rakenteen paksuuden vaikutusta taudinaiheuttajien pidättymiseen ja Zhang ym. (2012) sekä kenttä- että laboratoriokokeessa lämpötilan vaikutusta bakteerien kulkeutumiseen ja häviämiseen. Tuoreessa tutkimuksessa Mohanty ym. (2013) ovat puolestaan etsineet rakenneteknisiä ratkaisuja ulosteperäisten bakteerien pidättämiseen biopidätysrakenteeseen.

Biopidätysrakenne voi olla tehokas menetelmä hulevedessä olevien taudinaiheuttajien määrän vähentämisessä. Rusciano ja Obropta (2007) tutkimuksessa ulosteperäisiä taudinaiheuttajia indikoivien *E. coli* –bakteerien määrä väheni laboratoriolojen koerakenteessa tehdyissä testeissä keskimäärin yli 90 %. Tulosten osalta on otettava huomioon, että olosuhteet kasvihuoneessa olivat hyvin lämpimät (lämpötila 25 °C - 37 °C) ja siten epäedulliset bakteerien menestymiselle. Lisäksi rakenteen maa-aineksessa oli huomattavasti orgaanista ainesta, sillä 90 cm paksusta kasvualuekerroksesta oli kolmannes sekä rahkaturvetta että lehtipuuhaketta. Erityisesti rahkaturpeen suuri osuus vaikutti tutkimuksessa rakenteen pH-arvoon ja rakenteesta ulostullut vesi oli huomattavan hapanta. Osan *E. coli* –bakteerien vähenemisestä arvioitiinkin johtuvan bakteereille liian happamista oloista. Toisaalta lehtipuuhake vaikutti veden kulkureitteihin luomalla rakenteeseen makrohuokosia, joita pitkin vesi pystyi suodautumaan nopeasti rakenteen läpi.

Hunt ym. (2008) tutkimuksessa kaupunkiympäristön biopidätysrakenteeseen pidättyi lämpimissä ja humideissa oloissa n. 70 % *E. coli* –bakteereista. Rakenteen maa-aines oli varsin hyvin vettä johtavaa, koska lammikoitumistilan tyhjenemisnopeus oli 25 mm/tunti. Rakenteen nopea kuivuminen on yksi tekijä, joka luo bakteereille epäedulliset olosuhteet. Toisaalta nopea suodautuminen ei jätä aikaa bakteerien adsorptiolle ja suodattumisen tehokkuus on myös sidoksissa rakenteen maa-aineksen karkeuteen.

Nopea vedenjohtaminen rakenteen läpi vaikuttaa heikentävästi rakenteen kykyyn pidättää taudinaiheuttajia. Tämä käy ilmi mm. Garbrecht ym. (2009) tutkimuksesta, jossa tarkasteltiin laboratorio-oloissa *E. coli* –bakteerin kulkeutumista erilaisten maarakenteiden läpi. Karkealla hiekalla täytetty koesylinteri ei kyennyt pidättämään juurikaan *E. coli* –bakteereja varsinkaan suurilla virtausnopeuksilla. Sen sijaan rakenne, jossa oli karkean hiekan ohella n. 15 % hienoja maalajitteita, kykeni pidättämään *E. coli* –bakteereja sekä suodatuksen että adsorption avulla. Myös Hathaway ym. (2011) tutkimuksessa veden nopean virtauksen ja lyhyen kontaktiajan arvioitiin vaikuttaneen heikentävästi kenttäkokeessa havaitun 25 cm paksuun biopidätysrakenteen kykyyn pidättää indikaattoribakteereja paksumpaan rakenteeseen verrattuna. Patogeenien vähentämiseen tähtäävä biopidätysrakenne tulisikin mitoittaa hydraulisen kuormituksen, rakenteen

paksuuden ja käytetyn maa-aineksen osalta siten, että veden virtausnopeus rakenteessa ei kasva liian suureksi.

Zhang ym. (2011) tarkastelivat laboratorio-oloissa biopidätysrakenteessa ajan myötä tapahtuvien biogeokemiallisten muutosten vaikutusta rakenteeseen tulevien *E. coli* -bakteerien pidätykseen ja häviämiseen. Pidättyminen tehostui 18 kuukautta kestäneen koejakson aikana ja oli jo kuuden kuukauden jälkeen 97 %. Rakenteeseen pidätyneet indikaattoribakteerit kuolivat nopeasti kerran kahdessa viikossa tapahtuneiden vedensyöttötapahtumien välisenä aikana. Tutkimuksen mukaan rakenteen huokoisuus pieneni testijaksolla, mikä lisäsi bakteerien suodatusta ja toisaalta loi myös paremmat olosuhteet bakteerien pidätykseen rakenteeseen. Bakteerien kuoleminen tehostui testijakson aikana, minkä arvioitiin olleen sidoksissa bakteereja saalistavien alkueläinten määrän kasvuun testijaksolla. Lisäksi alhainen ravinteiden saatavuus edesauttoi bakteerien vähenemistä.

Lämpötila vaikuttaa mikrobitoimintaan ja korkeissa lämpötiloissa bakteerien aineenvaihdunta ja hajoaminen on nopeaa. Zhang ym. (2012) tarkastelivat lämpötilan vaikutusta biopidätysrakenteen toimintaan *E. coli* -bakteerien pidättämisessä ja vähentämisessä. Kenttäkokeessa havaittiin lämpötilaan nousuun liittyvä bakteereja saalistavien alkueläinten ja rakenteen alkuperäisten bakteerien määrän kasvu, joka heijastui rakenteeseen pidätyneiden *E. coli* -bakteerien määrän vähenemiseen lisääntyneen saalistuksen ja ravinnepilailun kautta.

Tuoreessa tutkimuksessa Mohanty ym. (2013) tarkastelivat rautaoksidikäsitellyn kvartsihiekan kykyä pidättää ulosteperäisiä indikaattoribakteereja. Maahiukkasten pinnalla oleva rautaoksidi voi tehostaa bakteerien pidätyksiä vahvoilla sidoksilla ja tutkimuksessa todettiin, että bakteerien pidättyminen testattuun maa-ainekseen oli vahvempaa kuin ainekseen, jota ei oltu käsitelty rautaoksidilla tai johon oli lisätty orgaanista ainesta. Tutkimuksessa ei kuitenkaan tarkasteltu rakenteen toimintaa pitkällä aikavälillä eikä rakenteeseen pidätyneiden bakteerien häviämistä, johon mm. maaperän luontainen mikrobitoiminta vaikuttaa.

### 8.3 Kirjallisuuteen perustuva rakenneohjeistus

Biopidätysrakenteessa patogeenien vähentäminen perustuu hulevedessä olevien patogeenien suodattamiseen ja pidättämiseen rakenteeseen sekä kertyneiden mikrobien hävittämiseen. Rakenteen tulisi kyetä suodattamaan erityisesti muutamien mikrometrien kokoluokkaa olevia bakteereja ja niitä hieman suurempia alkueläimiä. Käytännössä tämä tarkoittaa rakenteessa käytettävän maa-aineksen osalta sitä, että hienoja lajitteita (savi, siltti, hieno hietä) on vähintään 5 %. Rakenteen maalaji vaikuttaa myös rakenteen vedenjohtavuuteen. Koska nopea vedenjohtaminen heikentää rakenteen kykyä pidättää taudinaiheuttajia, tulisi rakenteen maa-aineksessa tämänkin vuoksi olla hiekan ohella myös hienoainesta.

Patogeenien pidättymisen kannalta on tärkeää, että rakenne ei ole koko ajan hydraulisesti kuormitettu. Kyllästyskosteudessa tai hydraulisessa kuormitustilanteessa vesi ohjautuu rakenteen makrohuokostoon ja mahdollisille oikovirtausreiteille, jolloin patogeenien suodatus vähenee. Lisäksi kuormitustilanne voi huuhtoa rakenteesta sinne aiemmin pidättyneitä patogeenejä.

Rakenteen kuivahtaminen ja lämpeneminen sadetapahtumien välillä luo epäedulliset olosuhteet patogeeneille. Bakteerit ja virukset pidättyvät maa-ainekseen paremmin yleensä happamissa oloissa. Tämän lisäksi useimmat patogeenit ovat herkkiä pH:n suhteen ja kuolevat happamissa tai emäksisissä oloissa. Rakenteen ravinteisuus tulisi pitää korkeintaan kohtalaisena, koska runsasravinteinen rakenne suosii patogeenejä. Rakenteen olosuhteiden osalta on kuitenkin syytä ottaa huomioon myös rakenteen luontainen mikrobisto, joka kilpailee patogeenien kanssa esimerkiksi ravinteista. Rakenteen alkueläimet myös vähentävät patogeenejä saalistamalla. Rakenteen olosuhteita ei siten kannata muokata äärimmilleen, jotta rakenteen luontaisen mikrobiston olosuhteet säilyvät kohtuullisina.

Taulukko 10. Kooste taudinaiheuttajia pidättävän biopidätysrakenteen rakenneosista (Garbrecht ym. 2009 (1); Hathaway ym. 2011 (2); Stevik ym. 2004 (3); Pedley ym. 2006 (4))



## 9 AJANTASAISEN TIEDON ROOLI KONSULTTITYÖSSÄ

Tähän opinnäytetyöhön on koottu ajantasainen katsaus biopidätysrakenteesta kohdennetussa huleveden laadunhallinnassa. Työ on tehty Ramboll Finland Oy:n maisemayksikölle, jossa tehdään konsulttityönä mm. erilaisia huleveden hallintasuunnitelmia, kuten:

- huleveden hallintarakenteiden suunnitelmia
- hulevesien luonnonmukaisen käsittelyn suunnitelmia
- hulevesiselvityksiä kaavoitusta varten
- hulevesiverkoston suunnittelua
- kaupunkitulvien ehkäisemisen ja hallinnan suunnittelua (Ramboll 2014)

Työt ovat laaja-alaisia ja edellyttävät monipuolista osaamista ja osaamisen jakamista eri toimialojen asiantuntijoista muodostuvissa projektitiimeissä.

Elintärkeä osa asiantuntijatyötä on osaamisen jatkuva kehittäminen. Oman alan kehityksen aktiiviseen seuraamiseen kuuluu mm. ajantasaisen tiedon hankinta, tiedon laadun arviointi ja hankitun tiedon hyödyntäminen alan toimintatapojen kehittämisessä sekä alan kehitysnäkymien ja suunnittelu- tarpeiden muutosten seuraaminen. Tätä tarkoitusta palvelevat hyvin ajantasaiskatsaukset, joissa on tiiviissä muodossa ja jäsennetysti esitetty jonkin rajatun aihealueen ajantasainen tietopaketti. Tässä opinnäytetyössä tällainen kooste esitetään biopidätysrakenteen osalta. Työ tarjoaa tutkimustietoon pohjautuvia argumentteja suunnitteluratkaisujen perustaksi sekä valottaa aihealueen ymmärtämisen kannalta olennaisten tekijöiden vaikutussuhteita.

Käytännön suunnittelutyössä aikaa uusien asioiden omaksumiseen on käytettävissä rajallisesti. Vaikutussuhteet, prosessit ja suunnitteluun vaikuttavat tekijät onkin usein tarkoituksenmukaista esittää mahdollisimman tiiviisti esimerkiksi taulukoiden ja kuvien muodossa, sekä siten, että olennaiset asiat on mahdollisimman helppo omaksua. Tätä tarkoitusta varten tähän työhön on koottu jokaisesta tarkastellusta aineesta tiiviit taulukkomuotoiset koosteet (taulukot 2-5, 7 ja 10), jotka esitetään työn tilaajalle lisäksi erillisinä A4-kokoisina ohjekortteina. Ohjekortteihin on myös poimittu työstä lyhyet kuvaukset aineeseen liittyvistä tärkeimmistä prosesseista ja erityistekijöistä sekä aiheeseen liittyvät lähdeviitteet. Ohjekortit toimivat siten nopeana tiivistelmänä aiheeseen ja raportin rooli on olla tarvittaessa aihetta syventävän tiedon lähde.

## 10 POHDINTA

### 10.1 Näkökulmia biopidätysrakenteeseen

Biopidätys on monipuolisuutensa vuoksi eräs käyttökelpoisimmista hajautetun huleveden hallinnan menetelmistä. Biopidätysrakenteella voidaan tehdä hajautettua huleveden määrän hallintaa, rakenteella voidaan vaikuttaa huleveden laatuun lähellä huleveden syntypaikkaa ja hulevettä

saadaan ohjattua kasvillisuuden käyttöön. Huleveden määränhallinnan osalta rakenteen avulla voidaan vähentää huleveden määrää ja viivyttää hulevettä valuma-alueella, jolloin perinteisen hulevesiviemäriverkon ja huleveden purkuomina usein toimivien pienvesien kuormitus sadetapahtumissa kevenee. Biopidätysrakenne kannattaa kuitenkin ennen muuta nähdä huleveden laadunhallinnan keinona eli siinä tarkoituksessa, johon se on alunperin kehitetty.

Aiemmin pitkälti vallalla ollut ”one type fits all” –kaltainen ajattelu, jossa yhtä perusrakennetta on käytetty kaikissa kohteissa, on tässä työssä käännetty ympäri ja keskiöön on nostettu ajatus mahdollisuudesta hallita huleveden laatua kohdekohtaiseksi sovitetulla biopidätysrakenteella. Tässä ajattelussa erilaisilta pinnoilta ja alueilta tuleva hulevesi voidaan jakaa laadun perusteella erilaisiin hulevesijakeisiin ja käsitellä kullekin jakeelle sopivimmalla tavalla. Rakenteen suunnittelussa otetaan huomioon hulevesijakeen laatu ja se, miten rakenteen rakenneosissa tapahtuvilla prosesseilla voidaan vaikuttaa huleveden laatuun. Tässäkin kohtaa poiketaan siten mm. monissa aihealueen tutkimuksissa käytetystä ”black box” –ajattelusta, jossa rakenteeseen johdetaan hulevettä ja tämän jälkeen tarkastellaan pelkästään sitä, minkälaisuista hulevettä rakenteesta tulee ulos, pohtimatta sen tarkemmin mitä itse rakenteessa hulevedelle tapahtuu. Tässä opinnäytetyössä kuvatussa lähestymistavassa nimenomaan rakenteessa tapahtuvat prosessit ovat avain rakenteen suunnitteluun.

Biopidätysrakenteessa tapahtuvien prosessien ymmärtäminen on tärkeää siitäkkin syystä, että ulkoympäristön rakenteet ovat koko ajan alttiina olosuhdemuutoksille ja rakenteen ikääntyminen voi muuttaa rakenteen toimintaa. Haitta-aineita sekä ravinteita pidättävässä rakenteessa olosuhdemuutokset voivat merkitä rakenteeseen pidättyneiden aineiden ominaisuusmuutoksia ja esimerkiksi huuhtoutumista tai muuntumista ympäristön kannalta haitallisempaan muotoon. Näin ollen rakenne on dynaaminen systeemi, jonka toimivuutta ei voi ennakoida tuntematta rakenteessa vaikuttavia prosesseja.

Kohdekohtainen huleveden laadunhallinta on biopidätysrakenteella mahdollista mm. sen vuoksi, että rakenne on joustavasti sijoitettavissa kaupunkirakenteeseen ja sen tilantarve on suhteellisen pieni. Rakenne voidaan sijoittaa yhtäläillä katu- ja liikenneviheralueille kuin tonteillekin ja kooltaan sekä muodoltaan rakenne voi olla esimerkiksi liikennealueelle sovitettuna pitkä ja nauhamainen tai vastaavasti pientaloalueen yksityispihoilla pieni painanne, johon johdetaan sisääntuloväylän hulevedet. Joustavuudesta kertoo myös se, että rakenne voidaan toteuttaa ilmeeltään ja materiaaleiltaan luontoa mukailevana mutta myös sovitaa rakenteellisesti ja ulkoiselta ilmeeltään kaupunkiympäristöön. Rakenne on myös mahdollista tuotteistaa siten, että sen sijoittaminen muun infrarakenteen joukkoon on teknisesti yksinkertaista. Tällaisia tuotteistettuja biopidätysrakenteita on tarjolla mm. Yhdysvalloissa ja Australiassa.

Tämän työn perusteella keskeisimmiksi tekijöiksi rakenteen toimivuuden näkökulmasta voidaan nostaa rakenteen mitoitus sekä rakennekerrosten materiaalivalinnat. Monien haitta-aineiden ja ravinteiden pidättymiseen

rakenteeseen vaikuttaa rakenteen hydraulinen kuormitus eli käytännössä pitkälti rakenteen mitoitus yhdistettynä rakenteen vedenjohtavuuteen. Muthanna (2007) on väitöskirjatyössään tarkastellut mm. biopidätysrakenteen mitoitusmenetelmiä. Jatkossa olisikin hyödyllistä ottaa tarkasteluun erilaiset mitoitusmenetelmät ja pohtia mitä ne merkitsevät huleveden laadunhallinnan näkökulmasta. Toisten aineiden pidättymiselle ja häviämislle rakenteen ajoittainen kuivahtaminen on etu, kun taas toisten aineiden vähentämisessä rakenteen säilyminen kosteana sadetapahtumien välillä tuottaa paremman lopputuloksen. Tältä osin suunnittelussa joudutaan siten tekemään kompromisseja ja pohtimaan kohdekohtaisesti huleveden laadunhallinnan tarpeita ja tarpeiden prioriteettijärjestystä.

Rakennekerrosten materiaalivalinnoissa joudutaan samalla tavoin tarkastelemaan mm. rakenteen kasvillisuuden kasvupaikkatekijöitä, eri aineiden pidättymiseen vaikuttavia maaperätekijöitä, huleveden määrän- ja laadunhallintaan liittyvää rakennekerrosten vedenjohtavuutta ja rakennekerrosten paksuutta. Huleveden laadunhallintaan tähtäävässä biopidätyksessä etenkin kasvu- ja suodatuskerroksen materiaalivalinta on keskeinen. Suomessa ohjeistus on kuitenkin tältä osin vielä puutteellinen ja rakenteeseen soveltuvista kasvualustamateriaaleista tarvitaan lisätietoa.

Suunnittelutyössä yksi keskeinen rakenteen toteutettavuuteen vaikuttava asia on rakennekerrosten määrittely (rakennekerroksissa käytettävä materiaali, kerrospaksuudet, kerrosjärjestys). Suunnitteluohjeiden ohella biopidätysrakenteen toteutuksesta voisi olla tarpeen laatia erillinen työ- ja valvontaohje, jossa esitettäisiin rakenteen toteutuksen kriittiset vaiheet ja vaiheiden merkitys rakenteen toiminnan kannalta.

Kasvillisuuden rooli biopidätysrakenteessa on keskeinen. Kasvillisuus mm. haihduttaa, ottaa maasta ravinteita, edesauttaa haitta-aineiden biohajoamista, pidättää metalleja ja ylläpitää rakenteen vedenjohtavuutta. Tämän lisäksi biopidätysrakenteen kasvillisuus luo viihtyisyyttä kaupunkiympäristöön ja on osa kaupungin vihreää infraa. Biopidätysrakenteen olosuhteet ovat kuitenkin kasvillisuuden näkökulmasta haastavat. Rakenteen orgaanisen aineksen määrä tulisi laadunhallintaan painottuvassa rakenteessa pitää varsin pienenä ja tällä on vaikutusta mm. kasvien ravinteiden saatavuuteen. Kosteusolot rakenteessa ovat erittäin vaihtelevat ja rakenteen vedenpidätyskyky on usein varsin pieni. Näin ollen kasvit joutuvat sietämään sekä hyvin kuivia olosuhteita että tulvatilanteita. Talvi tuo myös oman lisänsä rakenteen olosuhdevaihteluun. Suomen oloissa biopidätysrakenteessa menestyviä ja käytännön viherrakentamistyössä käyttökelpoisia kasveja ei ole juurikaan tutkittu. Tämä olisikin lisäksi yksi selkeä biopidätysrakenteeseen liittyvän soveltavan tutkimuksen suunta.

### 10.2 Näkökulmia opinnäytetyöhön

Tärkeä osa opinnäytetyötä on aihealueen rajaaminen. Tämän opinnäytetyön rajaaminen oli työn alkuvaiheessa tässä raportissa esitettyä aihetta laajempi ja

sisälsi biopidätysrakenteen ohella myös muita hajautetun huleveden hallinnan rakenteita, kuten hulevettä läpäisevät päällysteet. Ajatuksena oli keskittyä hulevesijakeisiin ja niiden laadunhallintaan erilaisilla hallintarakenteilla. Opinnäytetyöprosessin edetessä kävi kuitenkin ilmi, että parempi rajaus työlle on keskittyminen biopidätysrakenteeseen liittyvän tietämyksen koostamiseen ja rakenteen suunnitteluohjeistuksen laatimiseen. Tällä rajauksella oli mahdollista syventyä tähän varsin monimutkaiseen aiheeseen riittävällä tarkkuudella.

Tässä opinnäytetyössä on keskitytty biopidätysrakenteen rakennosien toimintaan, joten työssä ei esitetä rakennepoikkileikkauksia tai detaljeja esimerkiksi katuviheralueelle sijoitettavasta biopidätysrakenteesta. Valinta on ollut tietoinen aihealueen rajaus, jolla on mahdollistettu aihealueen perustietämyksen vahvistaminen. Rajaus on ollut perusteltu myös työn sovellettavuuden näkökulmasta, koska työhön on tällä rajauksella pystytty kokoamaan kattavasti detaljisuunnittelussa huomioon otettavia asioita, jotka olisivat laveammalla rajauksella väistämättä jääneet suppeammalle tarkastelutasolle.

Biopidätysrakennetta on tässä työssä tarkasteltu ainekohtaisesti. Pitäytymisellä ainekohtaisessa tarkastelussa on haluttu tukea irrottautumista sekä ”black box” – että ”one type fits all” –ajattelusta. Biopidätysrakennetta ei luonnollisesti suunnitella pelkästään yksittäisen aineen vähentämistä varten, mutta ainekohtaisen rajauksen on katsottu mahdollistavan parhaiten aiheen jatkotyöstämisen. Kuten mikä tahansa kehittämistyö, myös tämä opinnäytetyö voidaan nähdä prosessina, joka ei suinkaan pääty opinnäytetyön valmistumiseen, vaan jatkuu käytännön suunnittelutyössä.

## LÄHTEET

Bhargava, S.K. 2009. Practical methods for water and air pollution monitoring. New Age International. India. 166 s.

Bini, C. 2010. Air, water and soil pollution science and technology: from soil contamination to land restoration. Nova science publishers. NY, USA. 80 s.

Bioavailability of contaminants in soils and sediments: processes, tools and applications. Committee on bioavailability of contaminants in soils and sediments. National academies press. Washington DC. USA. 432 s.

Blecken, G.-T., Zinger, Y., Deletic, A., Fletcher, T.D. ja Viklander, M. 2009a. Impact of a submerged zone and a carbon source on heavy metal removal in stormwater biofilters. Ecological engineering 35. s. 769-778.

Blecken, G-T., Zinger, Y., Deletic, A., Fletcher, T. D. ja Viklander, M. 2009b. Influence of intermittent wetting and drying conditions on heavy metal removal by stormwater biofilters. Water research. Vol. 43. s. 4590-4598.

Blecken, G-T., Zinger, Y., Deletic, A., Fletcher, T. D. ja Hedström, A. 2010. Laboratory study on stormwater biofiltration: Nutrient and sediment removal. Journal of hydrology. Vol. 394. s. 507-514.

Bratieres, K., Fletcher, T.D., Deletic, A. ja Zinger, Y. 2008. Nutrient and sediment removal by stormwater biofilters: A large-scale design optimization study. Water research. Vol. 42. s. 3930-3940.

Brown, R.A. ja Hunt, W.F. 2011a. Underdrain configuration to enhance bioretention exfiltration to reduce pollutant loads. Journal of environmental engineering. Vol. 137. No. 11. s. 1082-1091.

Brown, R.A. ja Hunt, W. F. 2011b. Impacts of media depth on effluent water quality and hydrologic performance of undersized bioretention cells. Journal of irrigation and drainage engineering. Vol. 137. No. 3. s. 132-143.

Brown, R.A. ja Hunt, W. F. 2012. Improving bioretention/biofiltration performance with restorative maintenance. Water science & Technology. Vol. 65. No. 2. s.361- 367.

Cahill, T.H. 2012. Low impact development and sustainable stormwater management. Wiley. 309 s.

Chapman, C. ja Horner, R.R. 2010. Performance assessment of a street-drainage bioretention system. *Water environment research*. Vol. 82. s. 109-119.

Chen, X., Peltier, E., Strum, B.S.M. Young, C.B. 2013. Nitrogen removal and nitrifying and denitrifying bacteria quantification in a stormwater bioretention system. *Water research*. Vol. 47. s. 1691-1700.

Clark, S. E. ja Pitt, R. 2012. Targeting treatment technologies to address specific stormwater pollutants and numeric discharge limits. *Water research*. Vol. 46. s. 6715-6730.

Collins, K. A., Lawrence, T.A., Stander, E. K., Jontos, R.J., Kaushal, S.S., Newcomer, T.A., Grimm, N.A. ja Ekberg, M. L.C. 2010. Opportunities and challenges for managing nitrogen in urban stormwater. A review and synthesis. *Ecological engineering*. Vol. 36. s. 1507-1519.

Correll, D.L. 1999. Phosphorus: A rate limiting nutrient in surface waters. *Poultry Science*. Vol. 78. s. 674-682.

Davis, A.P., Hunt, W.F., Traver, R.G. ja Clar, M. 2009. Bioretention technology: overview of current practice and future needs. *Journal of environmental engineering*. Vol. 135. No 3. s. 109-117.

DiBlasi, C., Houg, L., Davis, A.P ja Ghosh, U. 2009. Removal and fate of polycyclic aromatic hydrocarbon pollutants in an urban stormwater bioretention facility. *Environmental science & technology*. Vol. 43. No. 2. s. 494-502.

Fritioff, A. ja Greger, M. 2003. Aquatic and terrestrial plant species with potential to remove heavy metals from stormwater. *International journal of phytoremediation*. Vol. 5. No. 3. s. 211-224.

Garbrecht, K., Fox, G.A., Guzman, J.A. ja Alexander, D. 2009. Technical note: *E. coli* transport through soil columns: implications for bioretention cell removal efficiency. *Transactions of the ASABE*. Vol. 52(2). s. 481-486.

Gunawardana, C., Goonetilleke, A., Egodawatta, P., Dawes, L. ja Kokot, S. 2012. Role of solids in heavy metals buildup on urban road surfaces. *Journal of environmental engineering*. Vol. 138. No. 4. s. 490-498.

Harper, D. M., Zalewski, M ja Pacini, N. 2006. *Ecohydrology: processes, models and case studies*. CABI publishing. 401 s.

Hartikainen, H. ja Peltovuori, T. 2002. Fosforin reaktiot ja liikkuminen maaperässä. Julkaisussa: Maataloustieteen Päivät 2002. verkkojulkaisu. Suomen maataloustieteellisen seuran julkaisuja no 18. Toim. Anneli Hopponen. Viitattu 25.1.2014. Julkaistu 16.1.2002. Saatavilla <http://www.smts.fi/MTP%20julkaisu%202002/esit/61hartikainen.pdf>

Hathaway, J.M. ja Hunt, W.F. 2008. Removal of pathogens in stormwater. NC State University, A&T University. Cooperative extension. AGW-588-16W. 10 s. Internet-viite: <http://www.bae.ncsu.edu/stormwater/PublicationFiles/PathogensSW.2008.pdf> haettu 27.3.2014.

Hathaway, J.M., Hunt, W.F., Graves, A.K. ja Wright, J.D. 2011. Field evaluation of bioretention indicator bacteria sequestration in Wilmington, North Carolina. Journal of environmental engineering. Vol. 137. No. 12. s. 1103-1113.

Hatt, B. E., Fletcher, T. D. ja Deletic, A. 2009. Hydrologic and pollutant removal performance of stormwater biofiltration systems at the field scale. Journal of hydrology. Vol. 365. s. 310-321.

Haygarth, P ja Jarvis, S. 2002. Agriculture, hydrology and water quality. CABI Publishing. 514 s.

Heikkinen, P. 2000. Haitta-aineiden sitoutuminen ja kulkeutuminen maaperässä. Geologian tutkimuskeskus, Tutkimusraportti 150. 74 s + liite.

Herngren, L., Goonetilleke, A. ja Auoko, G.A. 2005. Understanding heavy metal and suspended solids relationships in urban stormwater using simulated rainfall. Journal of environmental management. Vol. 76. s. 149-158.

Hillel, D. 1998. Environmental soil physics. Academic press. 771 s.

Hong, E., Seagren, E.A. ja Davis, A.P. 2006. Sustainable oil and grase removal form synthetic stormwater runoff using bench-scale bioretention studies. Water environment research. Vol. 78. No. 2. s. 141-155.

Hsieh, C-h ja Davis, A. P. 2005. Evaluation and optimization of bioretention media for treatment of urban storm water runoff. Journal of environmental engineering. Vol. 131. No. 11. s. 1521-1531.

Hsieh, C-h., Davis, A.P. ja Needelman, B.A. 2007. Bioretention column studies of phosphorus removal from urban stormwater runoff. *Water environment research*. Vol. 79.No.2. s.177-184.

Hujanen, J. ja Sänkiäho, L. 2012. Hulevesien määrä- ja laatumittaukset Kouvolan keskustassa. Teoksessa Sänkiäho, L. ja Sillanpää, N. (toim.). 2012. STORMWATER-hankkeen loppuraportti – Taajamien hulevesihaasteiden ratkaisut ja liiketoimintamahdollisuudet. Aalto-yliopiston julkaisusarja TIEDE+TEKNOLOGIA, 4/2012. s. 12-14. Internet-viite: <https://aaltodoc.aalto.fi/handle/123456789/3639> haettu 26.4.2014.

Hunt, W.F. ja Lord, W.G. 2006. Bioretention performance, design, construction and maintenance. NC, State University and A&T State University. Cooperative Extension. 10 s. Internet-viite, haettu 24.1.2014. <http://www.bae.ncsu.edu/stormwater/PublicationFiles/Bioretention2006.pdf>

Hunt, W.F., Smith, J.T., Jadlocki, S.J., Hathaway, J. M. ja Eubanks, P.R. 2008. Pollutant removal and peak flow mitigation by a bioretention cell in urban Charlotte, N.C. *Journal of environmental engineering*. Vol. 134. No. 5. s. 403-408.

Hunt, W.F., Davis, A.P. ja Traver, R.G. 2012. Meeting hydrologic and water quality goals through targeted bioretention design. *Journal of environmental engineering*. Vol. 138. No. 6. s. 698-707.

Hätinen, N., Pouta, A. ja Sillanpää, N. 2012. Hollolan maaperätutkimukset. Teoksessa Sänkiäho, L. ja Sillanpää, N. (toim.). 2012. STORMWATER-hankkeen loppuraportti – Taajamien hulevesihaasteiden ratkaisut ja liiketoimintamahdollisuudet. Aalto-yliopiston julkaisusarja TIEDE+TEKNOLOGIA, 4/2012. s. 15-18. Internet-viite: <https://aaltodoc.aalto.fi/handle/123456789/3639> haettu 26.4.2014.

Jamieson, R.C., Gordon, R.J., Sharples, K.E., Stratton, G.W. ja Madani, A. 2002. Movement and persistence of fecal bacteria in agricultural soils and subsurface drainage water: A review. *Canadian biosystems engineering*. Vol. 44. s. 1.1-1.9.

Johnson, C., Demetriades, A. ja Locutura, J. 2011. Mapping the chemical environment of urban areas. Wiley.USA. 642 s.

Kabir, M.I., Daly, E. ja Maggi, F. 2014. A review of ion and metal pollutants in urban green water infrastructures. *Science of the total environment*. Vol. 470-471. s. 695-706.

Khan, U.T., Valeo, C., Chu, A. ja van Duin, B. 2012a. Bioretention cell efficacy in cold climates: Part 1 – hydrologic performance. *Can. J. Civ. Eng.* Vol. 39. s. 1210-1221.

Khan, U.T., Valeo, C., Chu, A. ja van Duin, B. 2012b. Bioretention cell efficacy in cold climates: Part 2 – water quality performance. *Can. J. Civ. Eng.* Vol. 39. s. 1222-1233.

Khan, R.R. 2010. Environment and metal pollution. *Global media.* India. 173 s.

Komlos, J. ja Traver, R.G. 2012. Long-term orthophosphate removal in a field-scale storm-water bioinfiltration rain garden. *Journal of environmental engineering.* Vol. 138. No. 10. s. 991-998.

Komulainen, E. 2012. Hulevesien biosuodatuksen soveltuvuus Suomen ilmasto-oloihin. Diplomityö. Aalto-yliopisto. Insinööritieteiden korkeakoulu. Yhdyskunta- ja ympäristötekniikka. 118+11 s.

Kotola, J. ja Nurminen, J. 2003. Kaupunkialueiden hydrologia – valunnan ja ainehuhtouman muodostuminen rakennetuilla alueilla. Osa 1: kirjallisuustutkimus. Teknillisen korkeakoulun vesitalouden ja vesirakennuksen julkaisuja 7. Espoo. 92 s.

Kuntaliitto 2012. Hulevesiopas. Suomen kuntaliitto. Helsinki. 297 s. Internet-viite  
[http://shop.kunnat.net/product\\_details.php?p=2714](http://shop.kunnat.net/product_details.php?p=2714) haettu 27.4.2014

Kuusela-Lahtinen, A., Tarvainen, T., Backman, B., Hänninen, P., Reinikainen, J. ja Niskala, K. 2012. Metalleilla pilaantuneiden maa-aineisten liukoisuusselvitykset. Tutkimusraportti VTT-R-06935-12. 56 s.

Le Coustumer, S., Fletcher, T. D., Deletic, A., Barraud, S. ja Lewis, J. F. 2009. Hydraulic performance of biofilter systems for stormwater management: Influences of design and operation. *Journal of hydrology.* Vol. 376. s. 16-23.

Le Coustumer, S., Fletcher, T. D., Deletic, A., Barraud, S. ja Poelsma, P. 2012. The influence of design parameters on clogging of stormwater biofilters: A large-scale column study. *Water research.* Vol. 46. s. 6743-6752.

LeFevre, G.H., Hozalski, R.M. ja Novak, P.J. 2013. Root exudate enhanced contaminant desorption: an abiotic contribution to the rhizosphere effect. *Environmental science & technology.* Vol. 47. s. 11545-11553.

LeFevre G.H., Hozalski, R.M ja Novak, P.J. 2012. The role of biodegradation in limiting the accumulation of petroleum hydrocarbons in raingarden soils. *Water research*. Vol. 46. s. 6753-6762.

LeFevre, G.H. 2012. Fate and degradation of petroleum hydrocarbons in stormwater bioretention cells. Dissertation, Graduate school of the University of Minnesota. August 2012. 258 s.

Li, H. ja Davis, A. 2008a. Urban particle capture in bioretention media. I. Laboratory and field studies. *Journal of environmental engineering*. Vol. 134. No. 6. 409-418.

Li, H. ja Davis, A.P. 2008b. Urban particle capture in bioretention media. II: Theory and model development. *Journal of environmental engineering*. Vol. 134. No. 6. s. 419-432.

Logsdon, G.S. 2008. Water filtration practices: including slow sand filters and precoat filtration. *American water work association*. Denver. USA. 314 s.

Lucas, W.C. ja Greenway, M. 2008. Nutrient retention in vegetated and nonvegetated bioretention mesocosms. *J. Irrig. Drain. Eng.* Vol. 134. No. 5. s. 144-153.

Lucas, W.C. ja Greenway, M. 2011. Phosphorus retention by bioretention mesocosms using media formulated for phosphorus sorption: responses to accelerated loads. *Journal of irrigation and drainage engineering*. Vol. 137. No. 3. s. 144-153.

LUOKO 2007. Haja-asutuksen jätevesien puhdistus – katsaus maaperäkäsittelyyn. Luonnonhoidon koulutus LUOKO ry. Helsinki. 29 s. Internet-viite  
<http://www.salaojakeskus.fi/pdf/hajajatevesiopas.pdf> haettu 26.4.2014.

Marschner, H ja Dell, B. 1994. Nutrient uptake in mycorrhizal symbiosis. *Plant and soil*. Vol.159. No. 1. s. 89-102.

Miguntanna, N.P., Liu, A., Egodwatta, P., Goonetilleke, A. 2013. Characterising nutrients wash-off for effective urban stormwater treatment. *Journal of environmental management*. Vol. 120. s. 61-67.

Mohanty, S.K., Torkelson, A.A., Dodd, H., Nelson, K.L. ja Boehm, A.B. 2013. Engineering solutions to improve the removal of fecal indicator bacteria by bioinfiltration systems during intermittent flow of stormwater. *Environmental science & technology*. Vol. 47. s. 10791-10798.

Muthanna, T.M. 2007. Bioretention as a sustainable stormwater management option in cold climates. Dissertation. Faculty of Civil Engineering at the Norwegian University of Science and Technology. NTNU. 63 s + liitteet.

Muthanna, T.M., Viklander, M., Gjesdahl, N. ja Thorolfsson, S.T. 2007a. Heavy metal removal in cold climate bioretention. *Water, air and soil pollution*. Vol. 183. s. 391-402.

Muthanna, T.M., Viklander, M., Blecken, G. ja Thorolfsson, S.T. 2007b. Snowmelt pollutant removal in bioretention areas. *Water research*. Vol. 41. s. 4061-4072.

Muthanna, T.M., Viklander, M. ja Thorolfsson, S.T. 2007c. An evaluation of applying existing bioretention sizing methods to cold climates with snow storage conditions. *Water science & technology*. Vol. 56. No. 10. s. 73-81.

Mälkönen, E. (toim.) 2003. Metsämaa ja sen hoito. Metsäntutkimuslaitos, Metsälehti Kustannus. 220 s.

Novotny, V., Ahern, J. ja Brown, P. 2010. Water centric sustainable communities: planning, retrofitting and building the next urban environment. Wiley, USA. 627 s.

Paus, K.H., Morgan, J., Gulliver, J.S., Leiknes, T. ja Hozalski, R.M. 2014. Assessment of the hydraulic and toxic metal removal capacities of bioretention cells after 2 to 8 years of service. *Water, air and soil pollution*. Vol. 225. s. 1803. (12 s.)

Pedley, S., Yates, M., Schjiven, J.F., West, G., Howard, G. ja Barret, M. 2006. Pathogens: health, relevance, transport and attenuation. Teoksessa: Schmoll, O., Howard, G., Chilton, J. ja Chorus, I. (toim). Protecting groundwater for health: managing the quality of drinking water sources. WHO. IWA Publishing. Lontoo. s. 49-80.

Peel, M.C., Finlayson, B.L. ja McMahon, T.A. 2007. Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. *Hydrology and earth system sciences*. Vol. 11. s. 1633-1644.

Peltola-Thies, J. 2005. Rakennetun ympäristön aiheuttama vesistökuormitus. s. 32-44. Julkaisussa: Vakkilainen, P., Kotola, J. ja Nurminen J. (toim.). 2005. Rakennetun ympäristön valumavedet ja niiden hallinta. Suomen ympäristö 776. Ympäristöministeriö. 116 s. Internet-viite:

[https://helda.helsinki.fi/bitstream/handle/10138/40647/SY\\_776.pdf?sequence=1](https://helda.helsinki.fi/bitstream/handle/10138/40647/SY_776.pdf?sequence=1) haettu 20.4.2014.

Pitt, R., Clark S., Parmer K. 1994. Potential groundwater contamination from intentional and nonintentional stormwater infil-

tration. U.S. Environmental protection agency, EPA/600/SR-94/051, PB94- 165354AS, Storm and Combined Sewer program. 195 s.

Puumala, M., Paasonen, M. ja Nykänen, A. 2003. Tarhasta tulevien valumavesien puhdistaminen suodattamalla. s. 94-106. Julkaisussa: Uusi-Kämpä, J., Yli-Halla, M. ja Grék, K. (toim.). 2003. Lypsykarjataloudesta tulevan ympäristökuormituksen vähentäminen. Maa- ja elintarviketalous 25. 131 s + 6 liitettä. Internet-viite: <http://www.mtt.fi/met/pdf/met25.pdf> haettu 6.4.2014.

Randall, M. 2011. Bioretention garden for the removal of nitrogen and phosphorus from urban runoff. Master of applied science, thesis. August 2011. The University of Guelph, Canada. 155 s.

Rike, A.G., Haugen, K.B., Borresen, M., Engene, B. ja Kolstad, P. 2003. In situ biodegradation of petroleum hydrocarbons in frozen arctic soils. Cold regions science and technology. Vol. 37. s. 97-120.

Roy-Poirier, A. 2009. Bioretention for phosphorus removal: modelling stormwater quality improvements. Queen's University, Ontario, Canada. Thesis. Master of Science in Engineering. 257 s.

Roy-Poirier, A., Champagne, P. ja Fillon, Y. 2010. Review of bioretention system research and design: past, present and future. Journal of environmental engineering. Vol. 136. No. 9. s.878-889.

Rusciano, G.M. ja Obropta, C.C. 2007. Bioretention column study: fecal coliform and total suspended solids reductions. Transactions of the ASABE. Vol. 50(4). s. 1261-1269.

Saadoun, I.M.K ja Al-Ghzawi, Z.D. 2005. Bioremediation of petroleum contamination. teoksessa Fingerman, M ja Nagabhusnam, R. (toim.) 2005. Bioremediation of aquatic and terrestrial ecosystem. Science publishers. Enfield, USA. 415 s.

Sansalone, J., Ying, G. ja Lin, H. 2010. Distribution of metals for particulate matter transported in source area rainfall-runoff. Journal of environmental engineering. Vol. 136. No. 2. s. 172-184.

Sillanpää, P. 2007. Öljyhiilivedyillä saastuneen maan puhdistaminen puiden avulla. Suomen ympäristö 02/2007. Pirkanmaan ympäristökeskus. Yhdyskuntatekniikan osasto. 91 s. Internet-viite:

[https://helda.helsinki.fi/bitstream/handle/10138/38391/SY\\_2\\_2007.pdf?sequence=3](https://helda.helsinki.fi/bitstream/handle/10138/38391/SY_2_2007.pdf?sequence=3) haettu 2.4.2014.

Simcock, R. ja Dando, J. 2013. Mulch specification for storm-water bioretention devices. Auckland Council technical report, TR2013/056 Landcare Research NewZealand Ltd. 41 s. Internet-viite:

<http://www.aucklandcouncil.govt.nz/SiteCollectionDocuments/aboutcouncil/planspoliciespublications/technicalpublications/tr2013056mulchspecification.pdf> haettu 19.4.2014

Soveri, J. ja Varjo, M. 1977. Roudan muodostumisesta ja esiintymisestä Suomessa vuosina 1955-75. Vesientutkimuslaitoksen julkaisuja 20. Vesihallitus. Helsinki

Speight, J.G. ja Arjoon, K. 2012. Energy and environment: bioremediation of petroleum and petroleum products. Wiley. Somerset, USA. 588 s.

Stevik, T.K. Aa, K., Ausland, G. ja Hanssen, J.F. 2004. Retention and removal of pathogenic bacteria in wastewater percolating through porous media: a review. Water research 38. s. 1355-1367.

Tamminen, P. 2009. Suomen metsämaiden maannokset. Metsätieteen aikakauskirja. 1/2009. s. 74-78.

Trowsdale, S. A. ja Simcock, R. 2011. Urban stormwater treatment using bioretention. Journal of hydrology. Vol. 397. s. 167-174.

Valtanen, M., Sillanpää, N., Hätinen, N. ja Setälä, H. 2010. Hulevesien imeyttäminen ja suodattaminen: haitta-aineet ja menetelmät. Stormwater-hanke, kirjallisuusselvitys 10.10.2010. Helsingin yliopisto. 48 s.

Valtanen, M., Sillanpää, N. ja Setälä, H. 2012a. Hulevesien määrä ja laatu Lahden kaupungissa. Teoksessa Sänkiaho, L. ja Sillanpää, N. (toim.). 2012. STORMWATER-hankkeen loppuraportti – Taajamien hulevesihaasteiden ratkaisut ja liiketoimintamahdollisuudet. Aalto-yliopiston julkaisusarja TIEDE+TEKNOLOGIA, 4/2012. s. 5-11. Internet-viite: <https://aaltodoc.aalto.fi/handle/123456789/3639> haettu 26.4.2014.

Valtanen, M., Sillanpää, N. ja Setälä, H. 2012b. Lysimetrikoe hulevesien biosuodattuksesta kylmässä ilmastossa. Teoksessa Sänkiaho, L. ja Sillanpää, N. (toim.). 2012. STORMWATER-hankkeen loppuraportti – Taajamien hulevesihaasteiden ratkaisut ja liiketoimintamahdollisuudet. Aalto-yliopiston

julkaisusarja TIEDE+TEKNOLOGIA, 4/2012. s. 19-24.  
Internet-viite: <https://aaltodoc.aalto.fi/handle/123456789/3639>  
haettu 26.4.2014.

Vanninen, M. 2009. Tyypillisten biomassamateriaalien kemiallinen koostumus. Pro gradu –tutkielma. Jyväskylän yliopisto, kemian laitos. 43 s.

Viherympäristöliitto. 2011. Viherrakentamisen yleinen työselostus VRT'11. Tajakka, H. (toim) Viherympäristöliiton julkaisuja 49. 147 s.

Väänänen, R., Hristov, J., Tanskanen, N., Hartikainen, H., Nieminen, M. ja Ilvesniemi, H. 2008. Phosphorus sorption properties in podzolic forest soils and soil solution phosphorus concentration in undisturbed and disturbed soil profiles. Boreal environment research. Vol. 13. s. 553-567.

Water by design. 2012. Bioretention technical design guidelines, Version 1. October 2012. Healthy waterways ltd. Brisbane. 133 s.

Water treatment (4th edition). 2010. AWWA Staff. American Water Work Association. 527 s.

Yang, H., Dick, W. A., McCoy, E.L., Phelan, P.L. ja Grewal, P.S. 2013. Field evaluation of a new biphasic rain garden for stormwater flow management. Ecological engineering. Vol. 54. s. 22-31.

Zhang, L., Seagren, E.A., Davis, A.P. ja Karns, J.S. 2011. Long-term sustainability of *Escherichia coli* removal in conventional bioretention media. Journal of environmental engineering. Vol. 137. No. 8. s. 669-677.

Zhang, L., Seagren, E.A., Davis, A.P. ja Karns, J.S. 2012. Effects of temperature on bacterial transport and destruction in bioretention media: field and laboratory evaluations. Water environment research. Vol. 84. No. 6. s. 485-496.

Zhang, Z., Rengel, Z., Liaghati, T., Antoniette, T. ja Meney, K. 2011. Influence of plant species and submerged zone with carbon addition on nutrient removal in stormwater biofilter. Ecological engineering. Vol. 37. s. 1833-1841.

Internet –sivut:

Ilmasto-opas 2013. Vantaan Tikkurilantiellä testataan hulevesien biosuodatusalueita. <http://ilmasto->

[opas.fi/fi/kunnat/ratkaisuja/toimialan/-/artikkeli/c/7dd7c173-0e4a-4607-8e22-cd51d6ef2778/a/70306b47-dd97-42bf-a538-ed781f8039de/vantaa](https://opas.fi/fi/kunnat/ratkaisuja/toimialan/-/artikkeli/c/7dd7c173-0e4a-4607-8e22-cd51d6ef2778/a/70306b47-dd97-42bf-a538-ed781f8039de/vantaa) haettu 26.4.2014.

Ramboll 2014. Hulevedet.  
[http://www.ramboll.fi/palvelut/vesi\\_ja\\_ymparisto/vesihuolto/hulevedet](http://www.ramboll.fi/palvelut/vesi_ja_ymparisto/vesihuolto/hulevedet) haettu 26.4.2014.

Syke 2013. Hulevesien hallintamenetelmien toimivuus vihreänä infrastruktuurina – HULEGREEN. [http://www.syke.fi/fi-FI/Tutkimus\\_kehittaminen/Tutkimus\\_ja\\_kehittamishankkeet/Hankkeet/Hulevesien\\_hallintamenetelmien\\_toimivuus\\_vihreana\\_infrastruktuurina\\_HULEGREEN/Hulevesien\\_hallintamenetelmien\\_toimivuus%2825583%29](http://www.syke.fi/fi-FI/Tutkimus_kehittaminen/Tutkimus_ja_kehittamishankkeet/Hankkeet/Hulevesien_hallintamenetelmien_toimivuus_vihreana_infrastruktuurina_HULEGREEN/Hulevesien_hallintamenetelmien_toimivuus%2825583%29) haettu 26.4.2014.

UEF 2014. Metallien hyperakkumulation ja hypertoleranssin mekanismit kasveilla. <https://www.uef.fi/fi/plant-biotechnology/metal-hyperaccumulation> haettu 16.4.2014.

