



**LAMK**

Lahden ammattikorkeakoulu  
Lahti University of Applied Sciences

# BIOHIILISUODATIN HULEVESIEN KÄSITTELYSSÄ

Case Espoo Otsolahti

LAHDEN AMMATTIKORKEAKOULU  
Tekniikan ala  
Energia- ja ympäristötekniikka  
Ympäristötekniikka  
Opinnäytetyö AMK  
Kevät 2018  
Tomi Kirjokivi

## Kuvailulehti

Tekijä Kirjokivi Tomi	Julkaisun laji Opinnäytetyö, AMK Sivumäärä 57	Valmistumisaika kevät 2018
Työn nimi <b>Biohiilisuodatin hulevesien käsittelyssä</b> Case Espoo Otsolahti		
Koulutusohjelma Energia- ja ympäristötekniikka		
Tiivistelmä <p>Rakennetun pinnan lisääntyminen taajamissa lisää hulevesien määriä ja niistä syntyviä haittavaikutuksia. Kaupungistumisen myötä, hulevesissä esiintyvien haitta-aineiden määrä myös kasvaa. Perinteinen hulevesien johtaminen viemäristössä vesilaitokselle käsiteltäväksi tai purettavaksi lähimpään vesistöön, ei ole tulevaisuudessa kestävä ratkaisu hulevesien hallitsemiselle. Lisääntyneiden hulevesien haittavaikutuksien vähentämisessä erilaiset hulevesien hallintamenetelmät nousevat hyvin tärkeiksi tekijöiksi. Hulevesien hallintamenetelmät voidaan jakaa kolmeen osaan: vähentämiseen, johtamiseen ja pidättämiseen.</p> <p>Opinnäytetyössä tehtiin taustaselvitys biohiilen käytöstä biosuodatuksessa sekä selvitys eri biohiilten ominaisuuksista ja tuotantoprosessin vaikutuksia biohiilen ominaisuuksiin. Työ tehtiin osaksi tutkimus- ja kehitystyö hanketta, jossa Espoon Otsolahteen suunniteltiin hulevesiä käsittelevä biohiilisuodattamo. Toimeksiantajana työlle oli Vahanen Environment.</p> <p>Työ toteutettiin pääosin kirjallisuusselvityksillä ja haastatteluilla. Työtä varten tehtiin myös esitys Espoon kaupungille biohiilen ominaisuuksiin vaikuttavista tekijöistä. Selvitysten perusteella voidaan todeta, että biohiili toimii yleispiirteisesti hyvin hulevesien käsittelyssä, laadullisesti ja määrällisesti. Biohiilen ominaisuuksiin vaikuttaa kuitenkin monet eri tekijät, jonka vuoksi on hyvä tietää, minkälaista biohiiltä tultaisiin käyttämään.</p>		
Avainsanat Aktivointi, biosuodatus, biohiili, biohiilisuodattamo, hulevesien hallintamenetelmät, pyrolyysi, hidaspyrolyysi		

## Description

Author Kirjokivi Tomi	Type of publication Bachelor's thesis	Published spring 2018
	Number of pages 57	
Title of publication <b>Biochar filtration in stormwater management</b> Case Espoo Otsolahti		
Degree programme Bachelor's Degree Programme in Energy and Environmental Engineering		
Abstract  <p>With the increase in building and development in urban areas, increases in stormwater can cause problems. With urbanization, the number of contaminants in stormwater also increases. Leading the stormwater in the sewer to the nearest drainage system or to the nearest water treatment plant is not a sustainable solution in the future. In reducing the adverse effects of stormwater, the various methods of controlling stormwater are important factors to consider. Stormwater management methods can be divided into three parts: reduction, hydromodification and retention.</p> <p>The subject of this thesis was to make a background study on the use of biochar in biofiltration, and to investigate the properties of different biochars and the effects of the production process on biochar. The work was part of a research and development project in which a biofiltration plant was designed in the Otsolahti area in Espoo. The project was commissioned by Vahanen Environment.</p> <p>The project was mainly carried out by literature review and interviews. Also, a presentation was given for the city of Espoo about the factors affecting biochar properties.</p> <p>Based on the findings, it can be stated that biochar is generally well- treated, in both qualitative and quantitative terms. However, there are still many factors that influence the properties of biochar, which is why it is important to know what kind of biochar has been used.</p>		
Keywords Activation, biofiltration, biochar, biochar filtration, stormwater management, pyrolysis, slow pyrolysis		

## SISÄLLYS

1	JOHDANTO.....	1
2	HULEVEDET .....	2
2.1	Hulevesien muodostuminen ja vaikutus ympäristöön .....	2
2.2	Lainsäädäntö ja ohjeistukset .....	3
2.2.1	Keskeiset toimijat ja vastuut.....	3
2.2.2	Kuntien hulevesiohjelmat - Espoo.....	4
2.3	Haitta-aineet hulevesissä ja niiden aiheuttajat .....	4
2.3.1	Kiintoaineen mukana kulkeutuvat haitta-aineet .....	5
2.3.2	Ilmansaasteet .....	6
2.4	Hulevesien hallintamenetelmiä.....	7
2.4.1	Vähentäminen.....	7
2.4.2	Hulevesien johtamisjärjestelmät.....	11
2.4.3	Viivyttäminen .....	15
3	BIOSUODATUS HULEVESIEN KÄSITTELYSSÄ .....	19
3.1	Yleistietoa .....	19
3.2	Biosuodattimen rakenne ja materiaalit .....	21
3.2.1	Orgaaninen kerros ja suodatinkerros .....	23
3.2.2	Siirtymäkerrokset ja salaojakerros.....	25
3.2.3	Kyllästynyt kerros .....	26
3.3	Vaikutus hulevesien laatuun .....	26
3.3.1	Kiintoaineet ja fosfori.....	27
3.3.2	Raskasmetallit.....	27
4	BIOHIILI.....	29
4.1	Mitä on biohiili .....	29
4.2	Valmistusmenetelmä.....	30
4.3	Pyrolyysiprosessit .....	31
4.4	Biohiilen valmistusprosessin vaikutus ominaisuuksiin .....	31
4.4.1	Optimaalinen pyrolyysilämpötila .....	32
4.4.2	Molaarisen hapen ja vedyn suhde hiileen.....	32
4.4.3	Huokoisuus ja ominaispinta-ala .....	33
4.4.4	Biohiilen aktivointi.....	34

4.5	Biohiilen haittapuolet.....	34
4.5.1	PAH- ja PCB- yhdisteen, dioksiinit ja furaanit .....	34
4.5.2	Raskasmetallit.....	35
4.6	Biohiilen käytön rajoitukset.....	36
4.6.1	Kationinvaihtokapasiteetti.....	36
4.6.2	Hajoaminen maassa .....	37
4.6.3	Ominaispinta-ala ja hydrofobisuus.....	37
5	BIOHIILEEN LIITTYVIÄ AIKAISEMPI TUTKIMUKSIA .....	38
5.1	Biohiili lisääminen maaperään.....	38
5.2	Vantaan Tikkurilantien katuvesien puhdistus.....	39
6	SUODATUSRAKENTEEEN KUNNOSSAPITO.....	42
6.1	Kunnossapidon merkitys.....	42
6.2	Kunnossapitotoimenpiteet .....	42
7	CASE OTSOLAHTI .....	44
7.1	Yleistietoa nykytilanteesta.....	44
7.2	Valuma-alueet ja hulevesien laatu .....	46
7.3	Tuleva suodattamo .....	48
7.3.1	Hiekanerotin .....	49
7.3.2	Hulevesikasetit .....	52
7.3.3	Biohiilisuodatin ja teoreettinen puhdistuskyky .....	53
8	YHTEENVETO .....	57
	LÄHTEET .....	58

## 1 JOHDANTO

Taajamissa veden luonnollinen kierto kulku yleensä hidastuu vettä läpäisemättömien pintojen takia. Taajamaavaluma-alueiden läpäisemättömiä pintoja ovat yleisimmin pysäköinti-alueet, kadut sekä muut väylät. Nämä on yleensä suoraan kytketty alueen hulevesi ja sekaviemäröinteihin. Alueen maankäyttö ja sille sijoitettu toiminta vaikuttaa merkittävästi siihen, mitä haitta-aineita tai ravinteita hulevesien mukana kulkeutuu. (Kuntaliitto 2012.)

Hulevesien purku puhdistamattomana suoraan vesistöihin voi aiheuttaa vesistöjen rehevöitymistä. Sekaviemäröinnissä hulevedet ja jätevedet kuljetetaan yhteisissä putkistoissa vedenpuhdistuslaitokselle. Sade- ja sulamisvesimäärien kasvaessa hulevedet voivat aiheuttaa ylikuormitusta vedenpuhdistuslaitokselle ja näin ollen häiritä puhdistusprosessia. Kuntaliiton laatiman hulevesioppaan (2012) mukaan hulevesien muodostumista tulisi ensisijaisesti ehkäistä ja tällä tavoin vähentää kuormitusta vesistöihin tai puhdistuslaitoksiin. Myös lainsäädännöillä säädetään hulevesien hallintaa esimerkiksi, Maankäyttö- ja rakennuslain mukaan hulevesien hallinnan tavoitteena on kehittää suunnitelmallista hulevesien hallintaa erityisesti asemakaava-alueella (MRL 103 c §). Yhtenä hulevesien vähentämisen ja puhdistamisen keinoista voidaan pitää biopidätystä / biosuodatusta

Työ on tehty taustaselvityksenä tutkimus- ja kehitysohjelmaan, jossa Espoon Otso-lahteen rakennetaan hulevesiä käsittelevä biohiilisuodattamo. Työn toimeksiantajana on Vahanen Environment. Tässä työssä on lähdetty selvittämään biosuodatuksen toimintaperiaatetta hulevesien puhdistuksessa sekä biosuodatuksen rakenteiden eroja ja tehtäviä.

Työssä oli tarkoitus selvittää pyrolyysillä tuotetun biohiilen vaikutuksia hulevesien laadullisessa käsittelyssä, eri biohiilten eroja, tuotantoprosessin vaikutusta biohiilten eroihin sekä biohiilen mahdolliset haittavaikutukset. Biohiilestä on tehty useita eri selvityksiä, mutta tarkempaa selvitystä eri biohiilten toimintoista hulevesien käsittelyssä ei juurikaan ole.

Työssä on käyty yleispiirteisesti läpi hulevesiin liittyviä lakeja ja säädöksiä sekä hulevesien muodostumisia ja hallintamenetelmiä. Hallintamenetelmistä ainoastaan biosuodatuksesta on tehty tarkempi selvitys. Biohiilten toiminnalliset erot hulevesien käsittelyssä ovat hyvin riippuvaisia raaka-aineesta ja tuotantoprosessista, joilla biohiili on tuotettu. Biohiilten eroja on selvitetty tutkimalla tuotantoprosessin vaikutuksia biohiilen ominaisuuksiin, eikä tutkimalla juuri tietyistä raaka-aineista tuotettujen biohiilten eroja. Otsolahden biohiilisuodattamo ei tämän opinnäytetyön aikana ehtinyt valmistua, joten tuleva rakenne on käyty periaatteisella tasolla läpi.

## 2 HULEVEDET

### 2.1 Hulevesien muodostuminen ja vaikutus ympäristöön

Hulevedet ovat rakennetulla alueella rakennusten katoille, maan pinnalle tai muille pinnoille kertyviä sade- tai sulamisvesiä. Ne voivat vaikuttaa kahdella eri tavalla ympäristöön: tulvien lisääntymisellä taajama-alueilla tai purkuvesistöissä ja purkuvesistöjen sekä pohjavesien laadun heikkenemisellä hulevesien sisältämän haitta-aineiden takia. (Jormola 2016.) Hulevesivalunnan muodostumiseen vaikuttaa monet eri tekijät, kuten sateen intensiteetti ja kesto, kuivan ajan pituus ennen sadetapahtumaa sekä maaperän ominaisuudet ja kaltevuus. Suurin vaikutus hulevesien syntyyn on kuitenkin läpäisemättömillä pinnoilla, etenkin kesäsateiden aikaan. (Kuntaliitto 2012.)

Viimeisen kolmen vuosikymmenen aikana, kaupungistuminen Suomessa on ollut hyvin voimakasta. Pelkästään vuosina 1980-2000 taajama-alueiden pinta-ala kasvoi 50% ja vuonna 2000 koko väestöstä 80% asui näillä alueilla (Hätinen, Setälä, Sillanpää & Valta- nen 2010). Rakennetun pinnan lisääntyminen on vaikuttanut jokaiseen veden kiertokulun osa-alueeseen, kuten sadantaan valuntaan, haihduntaan ja suotautumiseen maaperään. Luonnontilaisessa kiertokulussa huomattava osa sadannasta imeytyy maaperän kautta pohjavesiin ja sieltä virtaa hitaasti kohti vesistöjä ja merta. Taajamissa luontainen yhteys pinta- ja pohjavesien välillä on katkennut läpäisemättömien pintojen, kuten kattojen katujen, teiden ja pysäköintialueiden takia. Tämän vuoksi taajamissa vesien imeytyminen maaperään voi olla huomattavasti vähäisempää, kuin alueilla, joilla vallitsee luonnollinen tila. (Jormola 2016.)

Taajamissa myöskin haihdunta on pienempää ja sadanta runsaampaa (Kuntaliitto 2012). Suomessa perinteinen hulevesien hallinta on perustunut putkiviemärointiin erillis- tai seka- järjestelmissä (jätevesien kanssa samassa putkistossa) sekä rakennetuilla avo- o- jilla poisjoh- tamiseen. Hulevesien hallinnan tulisi olla kokonaisvaltaista, jossa keskityttäisiin hulevesien määrän ja laadun hallintaan sekä kaupunkimaiseman viihtyisyyden edistämiseen pintavesi- aiheiden avulla. (Hätinen ym. 2010.)

## 2.2 Lainsäädäntö ja ohjeistukset

Oleellisimmat hulevesien hallinnan järjestämistä koskevat lait ovat maankäyttö ja rakennuslaki (132/199, MRL), vesilaki (587/2011, VL), Vesihuoltolaki (119/2001, VHL) ja turvariskilaki (620/2010). Hulevesiin liittyy myös muitakin lakeja, kuten vesienhoitolaki (1299/2004, VHJL), joka on laki vesienhoidon järjestämisestä; luonnonsuojelulaki (1096/1996), joka koskee vesiluonnon suojelua ja ympäristönsuojelulaki (527/2014, YSL), joka on pilaantumisen torjunnan yleislaki. Lait jotka liittyvät yleiseen kunnossapitoon ja siisteyteen: laki kadun ja eräiden yleisten alueiden kunnossa ja puhtaanapidosta (669/1978, KatuL), ratalaki (110/2007) ja maantielaki (503/2005). (Kuntaliitto 2017.)

Maankäyttö- ja rakennuslakiin on hulevesiin liittyen säädetty hulevesien hallinnan tavoitteista, kunnan hulevesijärjestelmästä, hulevesien hallintaan liittyvistä viranomaistehtävistä, valvonnasta, vastuista, sekä hulevesien hallinnan ohjaamisesta ja suunnittelusta. Tavoitteena on edistää ekologisesti, taloudellisesti, kulttuurisesti ja sosiaalisesti kestävää kehitystä, sekä luoda edellytykset hyvälle elinympäristölle. Vesilain tarkoituksena on parantaa vesiympäristön ja vesivarojen tilaa, edistää ja sovittaa yhteen niiden käyttöä sekä ehkäistä niiden käytöstä aiheutuvia haittoja. Vesihuoltolaissa säädetään vesihuollon kehittämisestä ja järjestämisestä, eri osallisten (kuntien, kiinteistön omistajien/haltijoiden ja vesihuoltolaitosten) velvollisuuksista ja oikeuksista sekä hulevesien ja vesihuollon viemäroinnin sopimuksista ja maksuista. Valvontaviranomaisina toimivat ELY-keskus, kunnan ympäristönsuojeluviranomainen ja terveydensuojeluviranomainen. Turvariskilaki koskee tulvariskiä. (Kuntaliitto 2017.)

### 2.2.1 Keskeiset toimijat ja vastuut

Maankäyttö- ja rakennuslain mukaan kiinteistön omistajalla tai haltijalla on ensisijainen vastuu hulevesien hallinnan järjestämisestä. Kunnalla on vastuu tarpeellisten hulevesien hallinnan palveluiden järjestämisestä asemakaava-alueella. Jos hulevesiä ei voida hallita kiinteistöllä, tulee kunnan järjestää tarpeelliset palvelut hulevesien hallinnalle. Kiinteistön omistajan tai haltijan on kuitenkin johdettava hulevedet kunnan hulevesijärjestelmään, jos niitä ei pystytä hallitsemaan kiinteistöllä tai johdeta vesihuoltolaitoksen ylläpitämään hulevesiviemäriverkostoon. Vesihuoltolaitos huolehtii ainoastaan hulevesien viemäroinneistä, kun kunta hallitsee muun hulevesien hallinnan. (Kuntaliitto 2017.)



## 2.2.2 Kuntien hulevesiohjelmat - Espoo

Hulevesien hallintaa voidaan ohjata kunnissa kuntien omien hulevesiohjelmien perusteella. Espoon kaupungin hulevesiohjelman tavoitteena on kehittää ja parantaa hulevesiin liittyvää yhteistyötä ja toimintatapoja sekä lisätä hulevesitietoisuutta ja -osaamista. Eri toimenpiteillä pyritään parantamaan hulevesien hallintaa kokonaisuudessaan, ehkäistä hulevesien laatuhaittoja, vähentää tulvariskejä, parantaa vesistöjen tilaa sekä turvata pohjaveden laatu ja määrä. Tärkeimmät hulevesien hallintotoimet ovat ennaltaehkäiseviä ja syntypaikoilla tehtäviä. Hulevesiohjelman mukaan hulevesien hallinnan päävastuu olisi Espoon kaupungilla, mutta noudatettaisiin myös aiheuttamisperiaatetta. Aiheuttamisperiaatteen mukaan, investointi-, käyttö- ja huoltokustannuksiin osallistuisi hulevesijärjestelmästä hyötyvät ja hallintatarpeen aiheuttajat. (Espoo 2012.)

## 2.3 Haitta-aineet hulevesissä ja niiden aiheuttajat

Maankäytöllä on merkittävä vaikutus hulevesien laatuun. Huleveteen kerääntyä haitta-aineita erilaisilta rakennetuilta pinnoilta, sateen mukana märkälasseumana sekä ilmasta tulleen kuivalasseuman huuhtoumana. (Hätinen ym. 2010.) Haitta-aineiden kerääntymiseen hulevesissä vaikuttavat myös monet muutkin tekijät, kuten ajoneuvojen määrä ja raskaan liikenteen osuus (Leinonen 2017). Hulevesille ei ole asetettu tietynlaisia raja-arvoja haitta-ainepitoisuuksien mukaan (Kuntaliitto 2012). Taulukossa 1 on esitetty yleisimpiä hulevesiin kertyviä haitta-aineita ja niiden lähteitä maakäyttömuodon mukaan. Tiedot on kerätty Stormwater-hankkeen kirjallisuusselvitykseen useasta eri lähteestä.

TAULUKKO 1. Haitta-aineita ja niiden lähteitä maakäyttömuodon mukaan (Hätinen ym. 2010)

Haitta-aine	Ilma-kehä	Liikenne	Teollisuus	Rakennustyömaat	Asutus	Kattorakenteet	Nurmialueet
<b>Typpi</b>	x	x	x	x	x		x
<b>Fosfori</b>	x	x	x	x	x		x
<b>Sulfaatti</b>	x	x					
<b>Rikin oksidit</b>	x	x					
<b>Kloridi</b>	x	x					
<b>Metallit</b>	x	x	x		x	x	

PAH-yhdisteet	x	x	x		x		
VOC-yhdisteet		x	x				
Öljyt ja hiilivedyt		x	x	x	x		
Pestisidit		x	x		x		x
Koliformit bakteerit					x		x
Kiintoaine	x	x	x	x	x		x

### 2.3.1 Kiintoaineen mukana kulkeutuvat haitta-aineet

Huleveden mukana kulkeutuu runsaasti sateen huuhtomaa partikkelikooltaan vaihtelevaa kiintoainetta. Kiintoaineeseen on myös sitoutuneena valtaosa ravinteista (typpi ja fosfori) ja metalleista. Metalleista alumiini, kromi, lyijy ja rauta esiintyvät yleisimmin partikkeleihin sitoutuneina, ja kadmium, kupari ja sinkki esiintyvät liukoisessa muodossa. Metallit ovat myrkyllisyyden ja pysyvyyden vuoksi merkittävimpiä haitta-aineita hulevesissä. Fosforista 95 % on kiinnittyneenä maapartikkeleihin ja osa esiintyy myös liukoisessa muodossa. (Hätinen ym. 2010.) Typpi esiintyy hulevesissä pääosin liukoisena ammoniumin ja nitraatin muodossa (Leinonen 2017). Taulukossa 2 on esitetty Clarkin ja Pittin (2012) tekemän tutkimuksen tuloksia hulevesien kiintoaineissa esiintyvien eri haitta-aineiden poistumia suodatuksen jälkeen (Leinonen 2017). Poistumat on esitetty prosentteina. Mitä suurempi prosenttimäärä haitta-aineen kohdalla on, sitä sitoutuneempaa se esiintyy kiintoaineessa.

TAULUKKO 2. Suodatuksen reduktioprosentit (Leinonen 2017)

Seulan koko	20 µm	5 µm	1 µm	0,45 µm
Kiintoaine-osuus	76	81	98	100
Kokonaisfosfori	68	82	89	92
Sinkki	64	70	70	72
Lyijy	41	62	76	82
Kupari	26	34	34	37
Kadmium	20	22	22	22
Nitraatti	0	0	12	17

### 2.3.2 Ilmansaasteet

Ilmansaasteista voi päätyä hulevesiin kuivalaskeumana aerosoleja, kaasuja ja pölyä. Märkälaskeumat ovat sateita, lumisateita, sumua ja kasteita (rakenteiden ja kasvillisuuden pinnoille tiivistynyttä vesihöyryä), ja niissä esiintyy ammoniumia, fosfaattia, kloridia ja sulfaatteja. Ilmansaasteiden mukana tulevat haitta-aineet eivät tule pelkästään lähialueilta, vaan ne voivat kulkeutua myös kaukokulkemana. (Hätinen ym. 2010.) Taulukossa 3 on esitetty eri haitta-aineiden lähteitä ja vaikutuksia luonnossa. Taulukko on muokattu Lehikoisen (2015) tekemästä selvitystyöstä.

TAULUKKO 3. Eri haitta-aineiden lähteitä ja vaikutuksia luonnossa (Lehikoinen 2015)

Haitta-aineet	Parametri	Lähde	Vaikutus luonnossa
<b>Kiintoaine</b>	TSS	Asfaltin kuluminen, rakennustyömaat, ihmisperäinen jäte, ilmansaasteet	Kuljettaa mukanaan ravinteita ja kemikaaleja, lisää sameutta ja heikentää valaistusolosuhteita puroissa, haittaa kalojen lisääntymistä
<b>Raskasmetallit</b>	Cu, Zn, Cd, Pb, Ni, Cr	Polttoaineet ja voiteluöljyt, metalliset tiekiyltit ja liikennemerkkit, renkaiden kuluminen ja mahdollisesti teollisuus	Heikentävät eliöiden lisääntymis- ja vastustuskykyä
<b>Ravinteet</b>	Typpi ja fosfori (kok. N, NO <sub>2</sub> NO <sub>3</sub> , kok. P)	Ilmansaasteet ja lannoitteet	Ekosysteemi joutuu epätasapainoon, leväkukinnot lisääntyvät
<b>Biohajoava orgaaninen materiaali</b>	BOD <sub>7</sub> , COD	Kasvit (lehdet ja puutavara), eläinten jätökset ja kuolleet eläimet	Kuluttavat happea
<b>Orgaaniset mikropollutantit</b>	PAH, PCB, MTBE	PAH: epätäydellinen fossiilisten polttoaineiden palaminen, muovirakenteet, renkaiden ja asfaltin kuluminen	Kerääntymällä eliöihin vaikuttavat luonnolliseen ravintoketjuun
<b>Patogeeniset mikroorganismit</b>	Kolibakteeri	Eläinten jätökset	Lisäävät sairastumisriskiä

## 2.4 Hulevesien hallintamenetelmiä

Hulevesiasiat tulisi ensisijaisesti järjestää kiinteistöllä maankäyttö- ja rakennuslakia soveltamalla. Vastuu on sillä, joka aiheuttaa rakennustoimenpiteillään häiriötä veden luontaiseen hydrologiseen kulkuun. Jos hulevesiasioita ei voida ratkaista kiinteistökohtaisesti, tulisi tällöin liittyä sopimusperusteisesti yhteiseen laitosmaiseen hulevesijärjestelmään tai ryhtyä osakkaaksi yhteiseen ojaan, näissä tapauksissa sovelletaan joko hulevesilakia tai vesilain ojitussääntöjä. (Kuntaliitto 2012.)

Hulevesien hallintamenetelmät ovat hulevesien kertymiseen vaikuttavia ja niiden johtamiseen sekä käsittelyyn liittyviä toimenpiteitä. Toimivien hulevesiratkaisujen saavuttaminen edellyttää laaja-alaisia useimmiten valuma-alueelähtöisiä tarkasteluja ja toimenpiteiden ulottamista hulevesien syntypaikoilta, lopullisiin purkupisteisiin saakka. Ensisijaisesti tärkeimpinä hulevesien hallinnan toimenpiteinä ovat hulevesien syntypaikoilla tehtävät toimenpiteet ja tällä tavoin voidaan ehkäistä hulevesien muodostumista ja niistä aiheutuvia haittoja. (Kuntaliitto 2012.) Kappaleissa 2.4.1-2.4.3 käydään yleispiirteisesti eri hallintamenetelmiä läpi.

### 2.4.1 Vähentäminen

Hulevesien vähentämiset voivat olla ei rakenteellisia- tai rakenteellisia ratkaisuja. Ei rakenteelliset ratkaisut ovat toimintatapoja ja ohjeistuksia, joilla ympäristön suunnittelun ja rakentamisen myötä vähennetään hulevesien muodostumista syntypaikoilla. Rakenteellisissa ratkaisuissa voidaan esimerkiksi muuttaa vettä läpäisemättömät pinnat läpäiseviksi tai pidättäviksi tai vähentää jo muodostuneita hulevesiä imeyttämällä sekä kasvillisuuden avulla. (Kuntaliitto 2012.)

#### **Läpäisevät päällysteet ja viherkatot**

Läpäiseviä päällysteitä voidaan käyttää kohteissa, joissa liikennemäärät ovat pieniä. Kohdeet voivat olla esimerkiksi asuinkorttelien pysäköintialueita, kevyen liikenteen väyliä, tonttiväyliä tai osittain läpäiseviä ratkaisuja, joissa osa alueesta on läpäisevää ja osa läpäisemätöntä esimerkiksi pysäköintialue, jossa pysäköintipaikat ovat läpäiseviä ja ajoväylät läpäisemättömiä. Ympäristöstä voidaan myös johtaa vesiä läpäiseville alueille, jos vedenläpäisevyys on tarpeeksi riittävää maaperässä. Suunnittelussa on huomioitava huleveden laatu, koska läpäisevät päällysteet eivät juurikaan puhdistaa vesiä. Puhdistamattomat hulevedet voivat aiheuttaa riskin pohjaveden pilaantumiselle. (Kuntaliitto 2012.)

Viherkatot ovat kiinteistökohtaisia hulevesien hallintamenetelmiä, joissa kasvillisuuden avulla vähennetään katoilta tulevaa huleveden määrää. Kuntaliiton (2012) tekemän kirjallisuus selvityksen (Berndtsson 2010; Carter ym. 2006; Villarreal ym. 2005) mukaan olosuhteista riippumatta, viherkatoilla voidaan vähentää katoilta tulevaa valuntaa 25-100%. (Kuntaliitto 2012.) Viherkatoilla voidaan merkittävästi vaikuttaa hulevesien määriin tiiviisti rakennetuilla tonteilla. Kuvassa 1 on esitettyinä läpäisevä päällyste parkkialueella ja kuvassa 2 viherkatot.



Kuva 1. Läpäisevä päällyste (Kuntaliitto 2012).



Kuva 2. Viherkatot (Kuntaliitto 2012).

### **Imeytyskaivanto ja imeytyspainanne**

Imeyttämisellä on tarkoitus muuntaa pintavalunta maaperässä tapahtuvaksi pintakerros- ja pohjavesivalunnaksi. Tällä tavoin voidaan vaikuttaa syntyneen huleveden määrää ja laatuun, kun maaperän huokostilavuudet pidättävät hetkellisesti hulevettä ja samalla maan fyysikaalisten, kemiallisten ja biologisten ominaisuuksien myötä hulevedet puhdistuvat.

Imeyttäminen voidaan toteuttaa kaivannolla (imeytyskaivanto) tai painanteella (imeytyspainanne), joissa molemmissa on tarkoitus imeyttää ja käsitellä hulevesiä. (Kuntaliitto 2012.)

Imeytyskaivannon ja Imeytyspainanteen erot ovat vain rakenteellisia. Imeytyskaivanto on kaivanto, jossa täytemateriaalin tarkoituksena on kasvattaa maan huokospintaa ja viivyttää hulevesiä. Materiaali voi olla kiviainesta tai tarkoitusta varten suunniteltuja muovikennos- toja esimerkiksi hulevesikasetteja. Kappaleessa 7 on käyty hulevesikasettien toiminta tarkemmin läpi. Imeytyskaivantoon voidaan johdattaa hulevesiä pintavaluntana tai hulevesiviemäreiden / salaojien avulla. (Kuntaliitto 2012.) Imeytyspainanteet ovat ympäristöään

alempana olevia alueita, joissa hulevedet ovat maanpäällisessä viivytyksessä eli lammikoitumistilassa. Imeytyspainanteen tarkoituksena ei ole toimia hulevesialtaana, vaan veden tulisi lammikoitumistilasta imeytyä ja suodattua. Lammikoitumisen pintaa on mahdollista säädellä maanpäällisillä purkureiteillä ja/tai rei'itetyllä purkuputkella. (Jormola ym. 2016.) Imeytyspainanteista ja kaivannoista käytetään myös nimitystä biopidätysalue, biosuodatusalue tai sadepuutarha. Kappaleessa 3 on käyty biosuodatuksen toimintaa tarkemmin läpi. Kuvassa 3 on esitettyä imeytyskaivanto ja kuvassa 4 imeytyspainanne



Kuva 3. Imeytyskaivanto (Kuntaliitto 2012).



Kuva 4. Imeytyspainanne (Kuntaliitto 2012).

#### 2.4.2 Hulevesien johtamisjärjestelmät

Hulevesien johtamisjärjestelmillä on tarkoitus hallitusti koota ja johdattaa hulevesiä pois kuivatettavalta alueelta muualle käsiteltäväksi tai vesistöihin purettavaksi. Johtamismenetelmillä voidaan myös hidastaa hulevesien virtaamia, mutta niiden tarkoituksena ei ole viivyttää koko mitoitusvesimäärää, vaan ne on tarkoitettu veden hallittuun johtamiseen. Johtamismenetelmät jakautuvat kahdenlaisiin tapoihin: putkijärjestelmiin ja pintajohdattamiin. (Kuntaliitto 2012)

Putkijärjestelmiin lukeutuvat hulevesiviemärit sekä salaojat ja ne ovat rakennetuilla alueilla yleisimpiä hulevesien johdattamismenetelmiä. Putkijärjestelmillä yleensä johdatetaan hulevedet purettavaksi lähimpään vesistöön tai vesilaitokselle käsiteltäväksi. Pintajohtamismenetelmillä pyritään hidastuttamaan hulevesien virtaamia ja tällä tavoin vähentää epäpuhtauksia ja kasvattaa imeytymistä maaperään. Hulevesien imeyttämistä ja puhdistamista voidaan parantaa kasvillisuudella, riittävän pitkällä suodatusmatkalla ja pienellä pituuskaltevuudella. Pintajohtamismenetelmiä ovat avouomavirtaukseen perustuvia menetelmiä, kuten avo-ojat, kanavat, kourut, purot, viherpainanteet. Rummuilla johdetaan pintajohtamismenetelmien vedet teiden ja muiden esteiden alitse tai läpi. (Kuntaliitto 2012.)



## Kourut ja viherpainanteet

Kourut ovat betonista tai kivistä valmistettuja pintavesien johdattamiseksi tarkoitettuja kaapeita ja matalia painanteita. Kourut soveltuvat kohteisiin, joista on tarkoitus johdattaa pieniä määriä hulevesiä viheralueille esimerkiksi kiinteistön katoilta tai pysäköintialueilta. Viherpainanteilla on tarkoitus johdattaa ja samalla imeyttää hulevesiä. Viherpainanteet ovat avo-ojiin verrattuna matalampia, loivaluiskaisempia ja kauttaaltaan nurmettuneita tai muuten kasvillisuudella peittyneitä painanteita. Matalan rakenteen vuoksi ne eivät sovellu ympäristön rakenteiden kuivatukseen, vaan ne soveltuvat pintavalunnan johdattamiseen. Viherpainanteilla voidaan vaikuttaa hulevesien laatuun, toteuttamalla ne suodattavina rakenteina. Huleveden viivyttäminen painanteessa voidaan toteuttaa pohjapadoilla tai kynnyksillä. Pohjapatojen ja kynnyksien on kuitenkin kestettävä veden virtauksen tuoma eroosio. (Kuntaliitto 2012.). Kuvassa 5 on esitetty huleveden johtamismenetelmänä toimiva kouru ja kuvassa 6 viherpainanne.



Kuva 5. Kouru hulevesien johtamista varten (Kuntaliitto 2012).



Kuva 6. Viherpainanne (Ilmastotyökalut 2014).

### **Rakennetut kanavat ja purot**

Rakennetut kanavat ja purot ovat suoraviivaisia linjaukseltaan ja useimmiten materiaaleiltaan betonisia tai kivisiä. Niitä käytetään kaupunkialueilla ja ne soveltuvat läpäisemättömien pintojensa takia lähinnä hulevesien johtamiseen. Kuitenkin patorakenteilla voidaan viivyttää hulevesien virtaamia. Hulevesiä voidaan suodattaa maaperään, lisäämällä viivytyalueita kanavien yhteyteen. (Kuntaliitto 2012.) Kuvassa 7 on esitettyä rakennettu kanava hulevesien johtamista varten ja kuvassa 8 rakennettu puro asuinalueen läheisyydessä.



Kuva 7. Rakennettu kanava (Kuntaliitto 2012).



Kuva 8. Rakennettu puro (Kuntaliitto 2012).

### 2.4.3 Viivyttäminen

Viivytyksen menetelmät ovat kosteikkoja, lammikoita, painanteita sekä rakennettuja altaita ja kaivantoja. Niiden tarkoituksena on hidastaa ja pidättää hulevesivirtaamia tietyn ajan ja sen jälkeen vapauttaa niitä vähitellen tulovirtaaman loppumisen jälkeen. Hulevesien viivyttämisellä voidaan myös määrän ja virtaaman hallinnan lisäksi vaikuttaa hulevesien laatuun, kun kiintoaineiden mukana tulevat epäpuhtaudet laskeutuvat viivytyksen aikana. Kasvillisuudella voidaan lisätä puhdistusvaikutuksia, kun ravinteet sitoutuvat kasvillisuuteen. (Kuntaliitto 2012.) Viivytyksen menetelmillä parannetaan esteettisiä tekijöitä ympäristössä, varsinkin rakennelmilla joissa on hyödynnetty kasvillisuutta.

#### **Kosteikot ja lammikot**

Kosteikot ja lammikot eivät kuivu sadetapahtumien välissä, vaan niissä on pysyvä vesipinta. Alueellisesti ne soveltuvat laajojen valuma-alueiden hulevesien hallintaan ja yleensä ne sijoitetaan virkistysalueiden läheisyydessä olevien norojen tai ojien läheisyyteen. Kosteikot ja lammikot ovat rakenteiltaan samankaltaisia. Kosteikot ovat vain vesisyvyydeltään matalampia ja kasvillisuudeltaan monipuolisempia. (Jormola ym. 2016.)

#### **Viivytyksen painanteet sekä viivytyksen kaivannot ja säiliöt**

Viivytyksen painanteet sekä viivytyksen kaivannot pysyvät sadetapahtumien välissä kuivina. Niitä ei ole tarkoitettu käsittelemään poikkeuksellisia vesimääriä, vaan ne ovat tarkoitettu rakennettujen alueiden sisälle. Viivytyksen painanteita voidaan käyttää asuinalueilla kiinteistökohtaisessa hulevesien hallinnassa ja kohteissa, jossa hulevedestä halutaan tehdä maisemaelementti. Maan alle sijoittuvat kaivannot ja säiliöt soveltuvat alueille, jotka ovat hyvin tiheästi rakennettuja ja joissa tilat eivät riitä maanpäälliselle viivytyksen ratkaisulle (Kuntaliitto 2012.).

Maan alle sijoitettavia säiliöitä ovat esimerkiksi hulevesikasetit. Kuvassa 9 on esitetty kosteikko Järvenpään Lepolan asuinalueelta ja kuvassa 10 on esitetty hulevesikasetteja Tampereen rautatietunnelin läheisyydestä (2). taulukossa 4 on esitetty hallintamenetelmien soveltuvuudet eri maankäyttötyypeille ja taulukossa 5 on esitetty hallintamenetelmien rajoittavia tekijöitä.



Kuva 9. Kosteikko (Kasvio 2017).



Kuva 10. Hulevesikasetit (Talotekniikka 2017).

TAULUKKO 4. Menetelmien soveltuvuuden eri maankäyttötyypeille (Kuntaliitto 2012)

Menetelmien soveltuvuus eri maankäyttötyypeille						
<b>Selite:</b> 3 Sopii hyvin 2 Soveltuu osittain tai tietyin ehdoin 1 Soveltuu harvoin tai ei ollenkaan E Ei relevantti A) Jos liikennealueet sijaitsevat pohjavesialueella tai liikennemäärät ovat huomattavia, ovat ne hotspot -alueita B) Hyväksyttävä vaihtoehto, jos imeytyminen vähäistä C) Hotspot alueet ovat kemikaalipäästöjen riskin aiheuttavia toimintoja, kuten huoltoasemia tai teollisuutta	Pien- ja rivitaloalueet	Kerrostaloalueet	Liikennealueet A	Tiheästi rakennetut alueet	Ydinkeskusta	Hotspot-alueet C
	<b>Hulevesien vähentäminen</b>					
Läpäisevät päällysteet	3	3	2	2	1	1
Viherkatot	3	2	E	2	2	2
Imeytyskaivannot	3	3	2	3	2	1
Imeytyspainanteet	3	2	2	2	1	1
<b>Hulevesien johtaminen</b>						
Kourut	2	3	1	2	1	2
Viherpainanteet	3	3	3	1	1	2B
Rakennetut kanavat ja purot	3	3	2	2	2	1
<b>Hulevesien viivyttäminen</b>						
Kosteikot	3	2	3	2	1	2B
Lammikot	3	2	3	2	1	2B
Viivytysoasenteet	3	3	1	2	2	2B
Viivytysoasenteet ja -säiliöt	1	2	1	3	3	2

TAULUKKO 5. Hulevesien hallintamenetelmien toteuttamista rajoittavia tekijöitä (Kuntaliitto 2012)

Hallintamenetelmien toteuttamista rajoittavia tekijöitä							
<b>Selite:</b> 3 Yleensä ei ole rajoittava tekijä 2 Rajoitukset voidaan välttää huolellisella suunnittelulla 1 Huomattava rajoittava tekijä E Ei relevantti	Valuma-alueen koko	Maaperä	Alueen topografia	Etäisyys pohjaveden pinnasta	Etäisyys kuivatettavista rakenteista	Tilantarve	Suuri kiintoaineen ja roskien määrä
	<b>Hulevesien vähentäminen</b>						
Läpäisevät päällysteet	2	1	2	1	1	3	1
Viherkatot	2	E	2	E	E	3	E
Imeytyskaivannot	1	1	2	1	1	2	2
Imeytyspainanteet	2	1	2	1	1	2	2

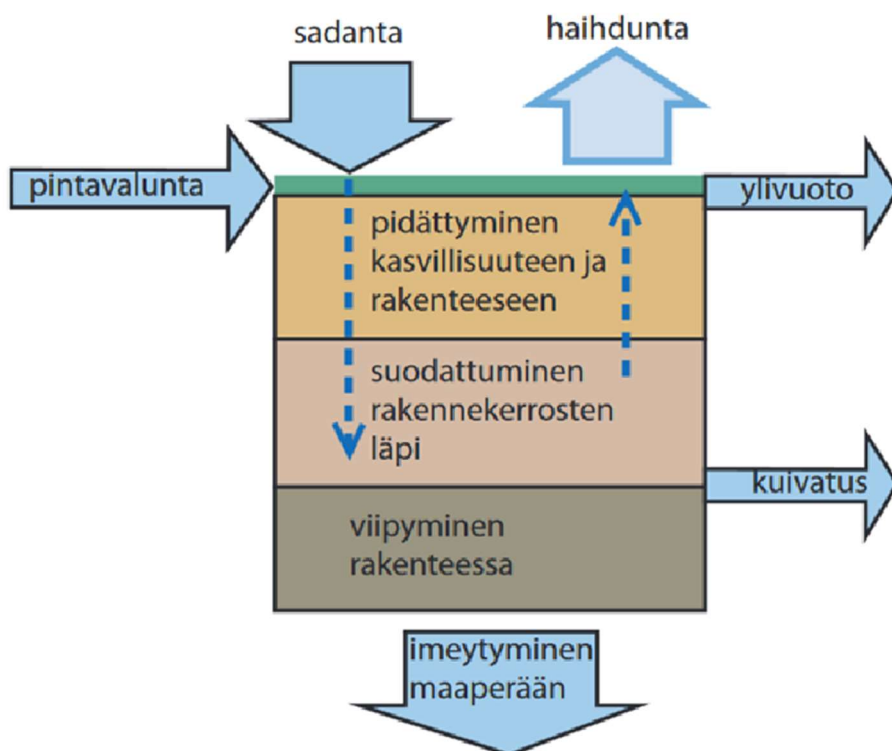
<b>Hulevesien johtaminen</b>							
Kourut	1	3	2	3	3	3	3
Viherpainanteet	2	3	2	2	2	2	3
Rakennetut kanavat ja purot	2	3	2	2	2	2	3
<b>Hulevesien viivyttäminen</b>							
Kosteikot	2	2	2	2	2	1	3
Lammikot	3	2	2	2	2	2	3
Viivytysohjeet	2	2	2	2	2	2	3
Viivytysohjeet ja -säiliöt	2	2	2	2	2	3	2

### 3 BIOSUODATUS HULEVESIEN KÄSITTELYSSÄ

#### 3.1 Yleistietoa

Biosuodatus (engl. biofiltration, bioretention) on yksi suosituimmista luonnonmukaisista hulevesien hallintamenetelmistä, jossa hulevesiä käsitellään johtamalla ne maarakenteiden läpi. Maarakenteiden läpi johtamalla tapahtuu suodattumista ja aineiden pidättymistä biologisten, kemiallisten sekä mekaanisten prosessien kautta. (Sillanpää & Sänkiaho 2012.) Biosuodatuskentät ylläpitävät myös veden luonnollista kulkua. Hulevesien varastoitumisella rakenteeseen tasataan valunnan määrää ja pohjaveden määrää lisääntyy, kun puhdistunut hulevesi imeytyy maakerrosten läpi kohti pohjavettä. (Suihko 2016; Lehikoinen 2015.)

Yleensä biosuodatuskentät ovat tarkoitettu ns. paikalliseen hulevesien käsittelyyn kaupunkialueiden sisällä. Biosuodatusalueet voivat olla viherpainanteita, pintavalutuskaistoja tai maan alle rakennettuja suodatuskammioita. Maaperän tehokkaan puhdistuskyvyn ansiosta biosuodatusalueet soveltuvat sekä pohjavesialueille ja vettä heikosti läpäiseviin maaperiin. (Kuntaliitto 2012.) Kuviossa 1 on esitetty biosuodatusrakenteen toimintaperiaate.



Kuvio 1. Suodatusrakenteen toimintaperiaate (Rakennustietosäätiö 2017).

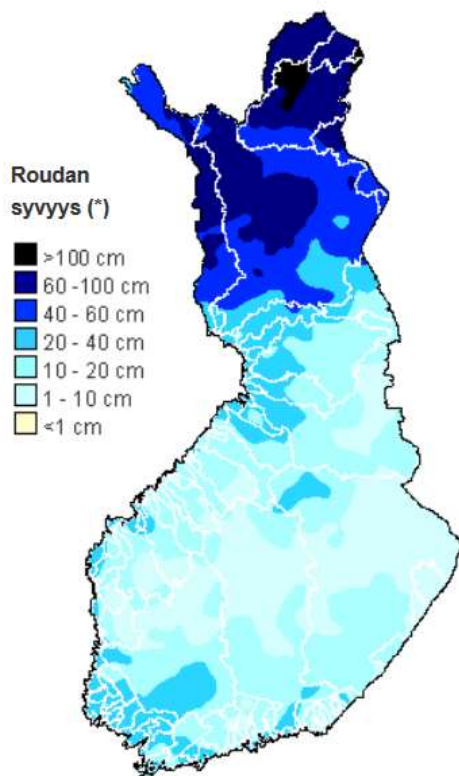


Maaperän vedenjohtavuus on pitkälti maalajisidonnaista. Joten se vaikuttaa suoranaisesti siihen, onko suodatusalueelta hulevedet mahdollista imeyttää maaperään suoraan, vai onko ne johdettava salaojia pitkin pois biosuodatusalueelta. Mitä korkeampi maaperän vedenjohtavuus on sitä paremmin se vastaanottaa vettä. (Kuntaliitto 2012.) Taulukossa 6 on esitetty eri maalajien vedenläpäisevyyksiä ja GEO-luokituksen mukaisia rakeiden läpimittoja.

TAULUKKO 6. Eri maalajien rakeiden läpimittoja ja vedenläpäisevyyksiä (Uponor 2012; GTK 2018)

Maalaji	Rakeiden läpimitta (mm)	Vedenläpäisevyys k (m/s)	Huomautuksia
<b>Sora</b>	2-60	$10^{-2} \dots 10^{-4}$	Hyvin vettä läpäisevä
<b>Hiekka</b>	0,06-2	$10^{-4} \dots 10^{-6}$	Hyvin vettä läpäisevä
<b>Siltti</b>	0,002-0,06	$10^{-5} \dots 10^{-9}$	Huonosti vettä läpäisevä
<b>Savi</b>	<0,002	$10^{-8} \dots 10^{-10}$	Lähes vettä läpäisemätön

Salaojitusta käytetään kylmissä ilmasto-oloissa myös maan jäätyminen ja routivuuden takia. Maan jäätyessä biosuodatinkerrokseen voi aiheutua halkeamia ja tämän myötä maaperän biologiset toiminnot vähenevät. (Lehikoinen 2015.) Suomessa roudan syvyys vaihtelee alueellisesti. Roudan määrään vaikuttaa monet eri tekijät, kuten maalajit, lumen määrä ja kylmyys. Kuviossa 2 on esitetty Suomen ympäristökeskuksen ja alueellisten elinkeino-, liikenne- ja ympäristökeskusten ylläpitämien 140:n routa-aseman roudan syvyyshavaintoja. Havaintopäivämäärä on 13.3.2018. (Ympäristöhallinto 2018.)



Kuvio 2. Roudan syvyudet 13.3.2018 (Ympäristöhallinto 2018).

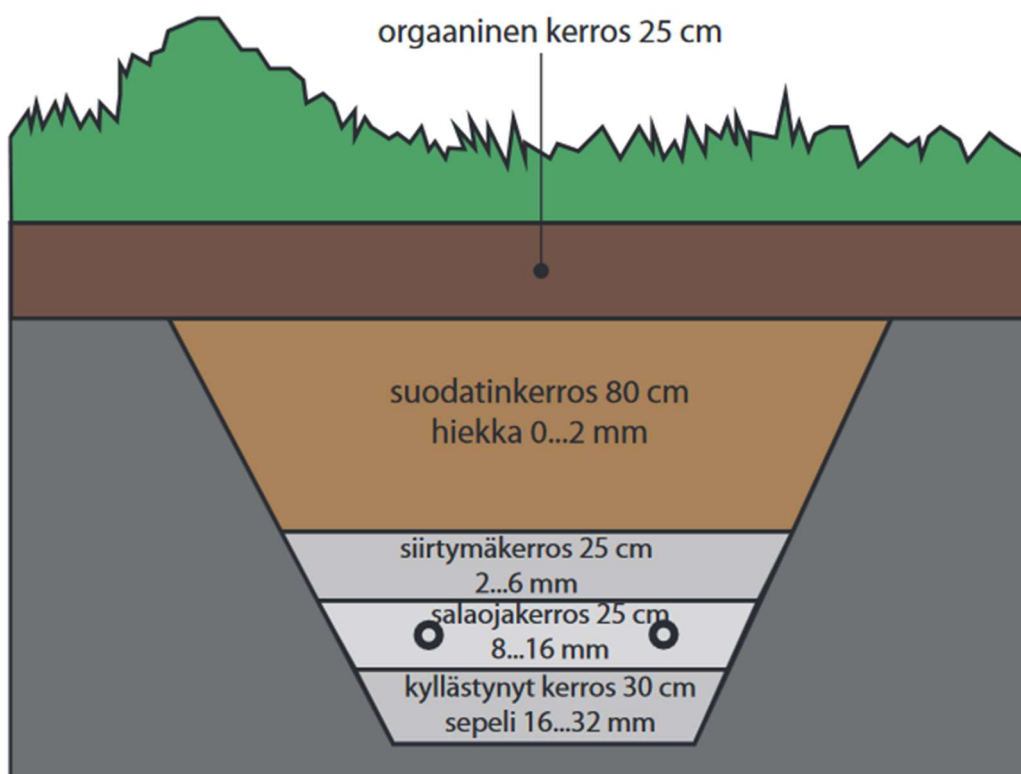
Hulevesioppaan (2012) mukaan vilkkaasti liikennöidyllä pohjavesialueella on suolan ja onnettomuusriskien takia biosuodatusrakenteen suojattava pohjavesisuojauksella. Pohjavesisuojauksella estetään suotautuneen veden päätyminen pohjavesiin. Pohjavesialueilla suodatetut vedet johdetaan salaojaa pitkin pohjavesialueen ulkopuolelle (Kuntaliitto 2012).

### 3.2 Biosuodattimen rakenne ja materiaalit

Biosuodatusrakenteen tulisi toimia veden laadullisena käsittelijänä, mutta sen tulisi myös kuivua sade- ja sulantatapahtumien välissä, jotta seuraavan valuntatapahtuman aikaan rakenne ei alkaisi tulvimaan. Tämän vuoksi biosuodatusrakenteen on suunniteltava hydraulisesti oikeanlaiseksi. Rakenteen koko valuma-alueen suhteen voi vaihdella sen mukaan, miten suuri osa valumavesistä halutaan käsitellä. Useissa toteutetuissa rakenteissa ja tutkimuksissa, rakenteen koko on ollut 2-5% valuma-alueen koosta. (Hätinen, Setälä, Sillanpää & Valtanen 2010.) Biosuodatusrakenteen tasapaino pidättymisen ja tyhjentymisen välillä on hyvin tärkeää. Noin vuorokauden mittaisella viipymällä, vaadittavat prosessit ehtivät tapahtua ja samalla taataan mikrobitoiminnalle suotuisat hapelliset olot. Muthannan (2007)

mukaan esimerkiksi biosuodatusmateriaalina käytetyn hiekkaisen siltin suositeltu suodatusnopeus olisi 5-10 cm/h. (Lehikoinen 2015.)

Biosuodatusrakenteessa on otettava huomioon veden tasainen jakautuminen suodatusalueelle. Pituuskaltevuuden on oltava riittävän pieni, jolloin virtausnopeudet ovat alhaisia ja suodattuminen biosuodatusrakenteen läpi on mahdollista. Kotolan ym. (2005) mukaan kasvillisuuspainanteessa suositeltu pituuskaltevuus on 0,2-1 % luokkaa. (Kotola, Nurminen & Vakkilainen 2005.) Biosuodatusalueen väljä mitoitus ja sopivan kasvillisuuden valinta ovat tärkeitä tekijöitä biosuodatusalueen tukkeutumisen estämiseksi. Rakenteen tukkeutumista voidaan ehkäistä myös biosuodatusrakennetta ennen järjestetyllä hiekan- ja öljynerotuskaivoilla. (Kuntaliitto 2012.) Rakenteen tulvimisen varalle on hyvä olla ylivuotoputkisto, joka ohjaa tulvatilanteissa käsittelemättömän huleveden pois rakenteesta (Kokkila 2014). Kuviossa 3 on esitetty biosuodatuksen rakennekerrokset ja yleiset materiaalit ja kerrospaksuudet



Kuvio 3. Yleiskuva suodatusrakenteesta, jossa suodatinkankaan tilalla on siirtymäkerros (Rakennustietosäätiö 2017).

### 3.2.1 Orgaaninen kerros ja suodatinkerros

Orgaanisessa ja suodatinkerroksessa tapahtuu varsinainen hulevesien suodattuminen ja pidättyminen. Orgaanisessa kerroksessa oleva kasvillisuuskerros pidättää hulevedessä olevia ravinteita ja raskasmetalleja ja samalla muokkaa maaperää kuohkeammaksi, parantaen maaperässä olevien mikrobien olosuhteita. (Lehikoinen 2015.) Kasvillisuuden tulee kestää erilaisia olosuhteita, kuten kuivaa ja kosteaa sekä vedenläpäisevyyden on oltava korkea, jotta pintakerros ei tukkeutuisi (Sillanpää & Sänkiäho 2012).

Suodatinkerroksen materiaalin valinnassa yksi tärkeä tekijä on hydraulinen johtavuus. Hydraulinen johtavuus on nopeus, jolla vesi liikkuu maaperässä. Hydrauliseen johtavuuteen vaikuttaa pienetkin erot raekoossa ja materiaalin heterogeenisyydessä. Kun huokoskoko on liian suuri, biosuodatus ei ehdi puhdistaa haitta-aineita valunnan huuhtoutuessa rakenteen läpi. Muthannan (2007) mukaan onnistuneen hydraulisen johtavuuden tulisi olla vähintään 1,3 cm/h ja korkeintaan 10 cm/h, tällöin vaadittavat prosessit suodatuskerroksissa ehtivät tapahtua ja samalla taataan rakenteessa olevalle mikrobitoiminnalle tarpeelliset happiolosuhteet. (Lehikoinen 2015.)

Puhdistuskyvyn laatuun vaikuttaa monet tekijät (Taulukko 7), kuten orgaanisen aineksen määrä ja laatu, mikrobitoiminta, lajitekoostumus ja maalajitteen kemialliset ominaisuudet sekä kerrospaksuus (Kokkila 2014). Suodatinkerroksen maa-ainekseksi soveltuu esimerkiksi hiekka, joka on raekooltaan 0-2 mm. Suodatinkerros voi olla myös sekoitemaata jonka tarkoituksena on olla sopivasti vettä läpäisevä ja bioaktiivinen epäpuhtauksien pidättämiseksi. Sekoitteeksi soveltuu esimerkiksi biohiili tai leca-sora. (VTT 2017.) Taulukossa 7 on esitetty orgaanisen kerroksen ja suodatinkerroksen rakennevaatimuksia eri haitta-ainneiden käsittelyssä.

TAULUKKO 7. Orgaanisen kerroksen ja suodatinkerroksen rakennevaatimukset eri haitta-aineiden käsittelyssä (Kokkila 2014)

Kohdennettu haitta-aine	Orgaaninen kerros	Suodatinkerros
<b>Kiintoaine</b>	Vedenjohtavuuden säilymistä voidaan edistää paksujuurisilla kasveilla, joilla vähennetään kiintoaineiden päätymistä suodatinkerrokseen	Ajan kuluessa, kiintoaineen kertyminen ja rakenteen tiivistyminen heikentää pintaosan vedenjohtavuutta. Ohut maakerros (200-300 mm) riittää kiintoaineen suodatukseen. Huleveden esikäsittelyllä vähennetään kiintoaineiden määrää
<b>Metallit</b>	Puukuorikatekerros pidättää hyvin elohopeaa, kromia, lyijyä ja rautaa, mutta kohtalaisesti kadmiumia, nikkeliä ja kobolttia	Huleveden suodattumista ja metalleja pidättävien reaktioiden vuoksi, vedenjohtavuuden oltava matala. Savimineraalit sekä orgaaniset ainekset soveltuvat hyvin metallien sitouttamiseen. Hapetus-pelkistys-olojen muuttuessa, rakenteeseen pidättäytyneet metallit voivat muuttua liukoiseen muotoon
<b>Typpi</b>	Puukuorikatekerros voi hajotessaan vapauttaa typpeä. Kasvien tulisi menestyä vähätyppisissä olosuhteissa sekä juurten pinta-ala oltava suuri. Suuri juurten pinta-ala edesauttaa ravinteidenotossa	Rakenteessa orgaanisen aineksen määrä pidettävä pieneenä, jotta pystytään hallitsemaan aineksen hajotessa vapautuva typpi. Maa-aineksen vedenjohtavuus oltava matala, $1 \times 10^{-5}$ – $1 \times 10^{-6}$ m/s. Esimerkki käytettävästä maa-aineksesta hiekkaa 85 %, silttiä/savea 10-12 %, orgaanista ainesta 3-5 %, kerrospaksuus 900 mm
<b>Fosfori</b>	Puukuorikatekerros voi hajotessaan vapautua fosforia. Kasvit joilla on suuri juurten pinta-ala, pidättävät ravinteita tehokkaasti	Rakenteessa orgaanisen aineksen määrä pidettävä pieneenä, jotta pystytään hallitsemaan aineksen hajotessa vapautuva fosfori. Maa-aineksen vedenjohtavuus oltava matala, $1 \times 10^{-5}$ m/s. Esimerkki käytettävästä maa-aineksesta hiekkaa 88 %, silttiä/savea 7-9 %, 3-5 % orgaanista ainesta, kerrospaksuus 700-900 mm
<b>Öljyt ja PAH yhdisteet</b>	Tiheällä ja syväjuurisella kasvillisuudella voidaan tehostaa biohajojamista. Kerrospaksuudeksi suositellaan vähintään 30 mm. Puukuorikatekerros toimii mikrobiologisesti aktiivisena haitta-aineiden vähentäjänä	Rakenteen pintakerroksessa tulee olla biohajojamista edesauttavat olosuhteet
<b>Taudinaiheuttajat</b>	Ei huomioitavaa	Hyvin happamat tai hyvin emäksiset olosuhteet edesauttavat taudinaiheuttajien kuolemista. Hiekan lisäksi oltava vähintään 5 % hienoja lajiteita. Rakenteen kuivahtaminen ja lämpeneminen nopeuttaa taudinaiheuttajien poistumista

### 3.2.2 Siirtymäkerrokset ja salaojakerros

Siirtymäkerroksessa erotetaan rakenteellisesti suodatinkerros, imeytys- ja salaojakerroksesta. Siirtymäkerroksen saatetaan korvata suodatinkankaalla, mutta kiintoaineiden huuhoutuman vuoksi on huomioitava suodatinkankaan mahdollinen tukkeutuminen. Suodatinkankaan tukkeutuminen vaikeuttaa suodattuneen veden imeytymistä tai kulkeutumista salaojaputkistoon. Kerrokset toimivat puhdistetun veden varastona, jolloin materiaalina on oltava hyvin vettä johtavaa ja huokoista maa-ainesta, kuten soraa. Siirtymäkerroksen raekooksi suositellaan 2-6 mm ja salaojakerroksen raekooksi 8-16 mm. Pohjavedeksi imeytymän maaveden määrää, voidaan säätää salaojaputken korkeusasemalla. (Kokkila 2014.) Siirtymäkerroksella ja salaojakerroksella ei ole merkittäviä erityisvaatimuksia materiaalien suhteen, vaan ne toimivat suotautuneen veden varastokerroksina, ennen niiden imeytymistä maaperään tai johdattamista salaojaputkilla pois suodatusrakenteesta. Taulukossa 8 on esitetty siirtymä- ja salaojakerroksen rakennevaatimuksia eri haitta-aineiden käsittelyssä.

TAULUKKO 8 Siirtymä – ja salaojakerroksen rakennevaatimukset eri haitta-aineiden käsittelyssä (Kokkila 2014)

Kohden- nettu haitta- aine	Siirtymäkerros	Salaojakerros
<b>Kiintoaine</b>	Toteutettava maa-aineskerroksena tukkeutumisvaaran vuoksi, eli ei suodatinkangasta. Kerrospaksuus 100mm	Ei erityisvaatimuksia
<b>Metallit</b>	Ei huomioitavaa	Huomioitava metallien mahdollinen huuhoutuminen pohjaveteen, tämän vuoksi rakenne tulee toteuttaa pohjaltaan läpäisemättömäksi ja hulevedet ohjattava rakenteesta pois
<b>Typpi</b>	Jos rakenteen pohjalle on toteutettu typen denitrifikaatiota tehostava kyllästynyt kerros, on selvitettävä se, että salliiko materiaali kapillaarisen vedennousun suodatinkerrokseen. Talvella rakenteeseen voi muodostua jäälinsejä	Salaojan korkeusasemaa muuttamalla, voidaan toteuttaa typen denitrifikaatiota tehostava kyllästynyt kerros

<b>Fosfori</b>	Jos rakenteeseen on pohjalle toteutettu veden kyllästynyt kerros, voi veden kyllästyneissä oloissa vapautua fosforia maahiukkasten pinnalta	Veden kyllästyneissä oloissa, maahiukkasten pinnalta vapautuu fosforia ja tämän vuoksi veden varastokerros on toteutettava riittävän etäällä (45-60 cm) fosforia pidättävästä kerroksesta
<b>Öljy ja PAH yhdisteet</b>	Ei huomioitavaa	Pohjavesialueella rakenne toteutettava vettä läpäisemättömäksi ja ohjattava suotautunut vesi salaojaputkilla pois rakenteesta
<b>Taudinaiheuttajat</b>	Ei huomioitavaa	Ei huomioitavaa

### 3.2.3 Kyllästynyt kerros

Biosuodatusrakenteen alimmaksi kerrokseksi voidaan lisätä typenpoistoa edesauttava rakenne, jossa typenpoistoa tapahtuu denitrifikaation avulla. Biosuodatusrakenteessa typenpoisto tapahtuu suodattimien kuivuessa sadetapahtumien välissä, jolloin on suotuisat hapeliset olosuhteet typen nitrifikaatiolle. Nitrifikaatiossa ammoniumtyppi hapettuu nitriittitypeksi ja siitä edelleen nitraattitypeksi. Sopivissa olosuhteissa nitrifikaatio on nopea ja tehokas prosessi ammoniumtypen poistoon. (Jormola, Kasvio, Koskiaho & Ulvi 2016.)

Suodattimessa on myös tapahduttava denitrifikaatiota. Denitrifikaation avulla estetään nitraatin kertymistä suodattimeen ja tällä tavoin vähennetään nitraattihuuhtoumia seuraavien sateiden aikana. Denitrifikaatiota varten on oltava anoksiset olosuhteet. Anoksiset olosuhteet voidaan luoda biosuodatusrakenteen alimpaan kerrokseen, jossa kerros pyritään pitämään vedellä kyllästyneenä mahdollisimman pitkään. Anoksisissa oloissa nitraatti pelkistyy typpikaasuksi ja tällä tavoin haihtuu ilmaan. (Jormola ym. 2016; Sillanpää & Sänkiaho 2012.) Kyllästyneen kerroksen materiaalina voidaan käyttää esimerkiksi sepeliä, jonka rae-  
koko on 16-32 mm (Rakennustietosäätiö 2017).

### 3.3 Vaikutus hulevesien laatuun

Biosuodatuksessa haitta-aineita poistuu hiukkasmuodossa sekä liuenneina (Lehikoinen 2015.) Eri haitta-aineille on omat ominaiset puhdistusmekanisminsa. Jormolan ym. tutkimuksen (2009) mukaan, suodatusominaisuuksiltaan monipuolisimmiksi suodatusmateriaaleiksi on todettu hiekka ja silttinen hiekka. Kyseiset maa-ainekset tarjoavat hyvän kasvualustan kasvillisuudelle, jolla voidaan merkittävästi parantaa ravinteiden pidättymistä

sekä vähentää hienoainesten huuhtoumia. Kasvien ravinteita kasvuunsa käytettäessä, voidaan parantaa ravinteiden poistumaa sekä lisätä haihduntaa. (Jormola ym. 2016.)

### 3.3.1 Kiintoaineet ja fosfori

Biosuodatus soveltuu erittäin tehokkaasti kiintoainekuormituksen pienentämiseen. Kiintoaineet, kiintoaineeseen kiinnittynyt fosfori ja osa maaperässä olevista patogeneista tarttuu tehokkaasti suodatinmateriaaliin, sedimentoitumalla sen pinnalle. Patogeenien jäädessä kuivuneelle suodattimen pintakerrokselle, ne altistuvat auringonvalolle ja kuolevat. (Jormola ym. 2016.)

Liukoisen fosforin pidättyminen suodatinmateriaaliin on hyvin heikkoa. Kasvillisuudella voidaan parantaa fosforin pidättymistä, mutta väärin valitusta suodatinmateriaalista sekä kuolleesta kasvillisuudesta voi liueta suuriakin määriä fosforia käsiteltävään veteen. Typen puhdistus on osoittautunut haasteelliseksi, mutta rakenteellisilla ratkaisuilla (kyllästynyt kerros) voidaan tehostaa typen denitrifikaatioprosessia. (Jormola ym. 2016.)

### 3.3.2 Raskasmetallit

Biosuodatus on osoittautunut tehokkaaksi menetelmäksi raskasmetallien puhdistuksessa. Muthannan (2007) mukaan kasvillisuudella ei ole merkittävää vaikutusta raskasmetallien (alumiini, kromi, kupari, lyijy ja sinkki) pidättyvyyteen, vaan ne kiinnittyvät paremmin rakennekerrosten materiaaleihin, kuten hienoon hiekkaan. (Muthannan (2007) mukaan raskasmetallit kiinnittyvät partikkeleihin, joiden raekoko on alle 10 µm, tai jopa 5 µm (sinkki ja kupari). (Lehikoinen 2015.) Taulukossa 9 on esitetty hulevesissä tyypillisesti tavattavien haitta-aineiden pitoisuuksia ja biosuodatuksen kuormitusreduktio (Jormola ym. 2016)

TAULUKKO 9. Hulevesissä tyypillisesti tavattavien haitta-aineiden pitoisuuksia ja biosuodatuksen kuormitusreduktio (Jormola ym. 2016)

Aine	Tyypillinen pitoisuus hulevesissä, mg/l	Kuormitusvähenemä biosuodatuksessa, %
<b>Kiintoaine</b>	15-350	90-99
<b>Biologinen hapenkulutus</b>	1,5-22,0	80-90
<b>Kokonaiskupari</b>	0,01-0,28	60-90



<b>Kokonaissinkki</b>	0,03-0,35	85-95
<b>Öljyt ja rasvat</b>	0,4-20,0	95-99
<b>Partikkelimainen fosfori</b>	0,1-2,2	95-99
<b>Liukoinen fosfori</b>	0,05	10-30
<b>Liukoinen typpi</b>	0,1-3,7	-40-40
<b>Partikkelimainen typpi*</b>	0,5-3,5	25-50

\*käsittää partikkelimaisen orgaanisen typen

## 4 BIOHIILI

### 4.1 Mitä on biohiili

Biohiili on biomassasta pyrolyysiprosessilla eli kuivatislauksella tuotettua hiiltä. Pyrolyysissä biomassan (raaka-aine) hiiltoprosessi tapahtuu hapettomissa tai lähes hapettomissa olosuhteissa, ilman avointa liekkiä. (SBY 2018.) Pyrolyysin avulla voidaan lisätä biomassan huokoisuutta, kestävyyttä hajotusta vastaan ja ominaispinta-alaa. Biohiili soveltuu erilaisiin toiminnallisiin tarkoituksiin, kuten hulevesien käsittelyyn ja maaperän parannukseen. (Hovi 2017.)

Biohiilellä voidaan myös lisätä maan biologisen eliöstön määrää ja aktiivisuutta, estää huuhtoumien mukana kulkeutuvia kemikaaleja ja ravinteita sekä vähentää kasvihuonekaasuja ja sitoa hiili pysyvästi maahan. Biohiilellä on lukemattomia käyttösovelluksia sen monipuolisten fysikaalisten ja kemiallisten ominaisuuksiensa vuoksi. (Tiilikkala 2015.)

Raaka-aineena voidaan käyttää esimerkiksi puuta, rehua tai muita vastaavia orgaanisia aineita, joissa ei ole epäorgaanisia aineksia, kuten muovia tai maaleja (EBC 2017). Käytettävä raaka-aine tulee valita prosessin ja lopputuotteen toivottujen ominaisuuksien mukaan. Kuvassa 11 on esitetty eri raaka-aineista valmistettuja biohiiliä.

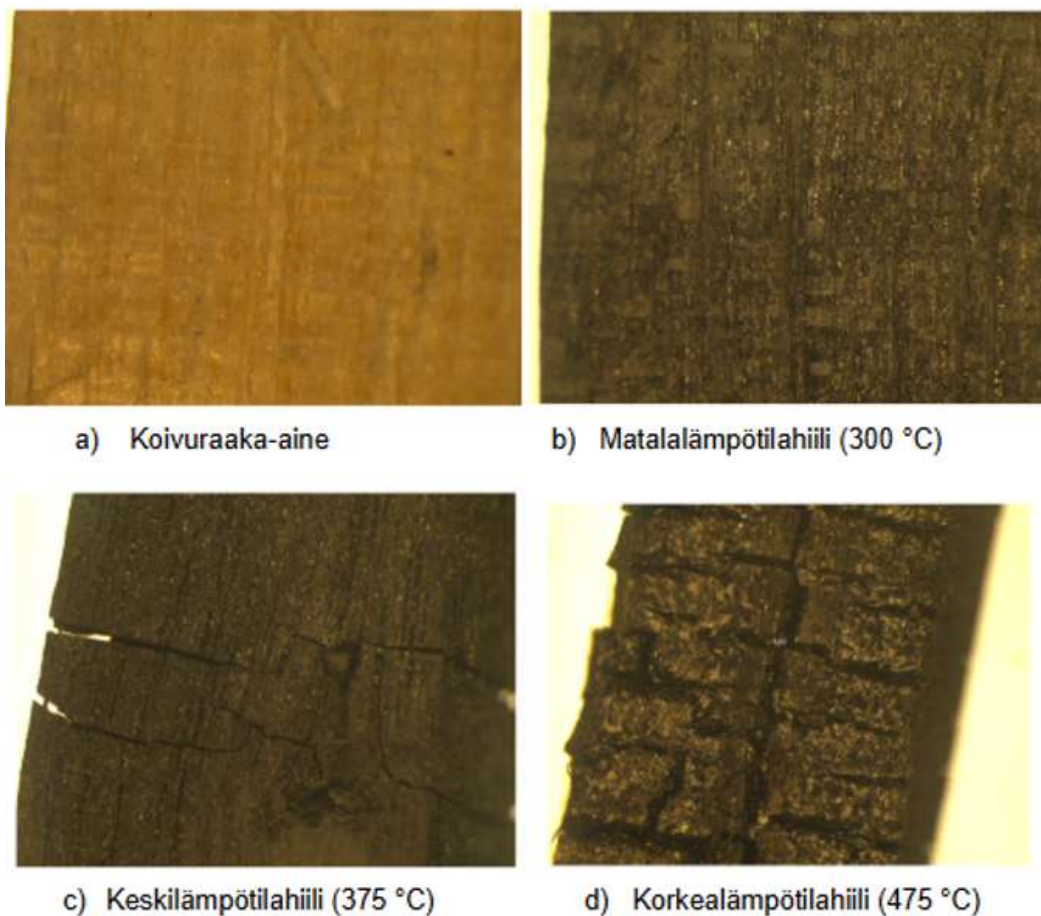


Kuva 11. Eri raaka-aineista tehtyjen biohiilten rakenteelliset erot (Tiilikkala 2015).

## 4.2 Valmistusmenetelmä

Biohiiltä valmistetaan pyrolyysissä, jonka lämpötila vaihtelee 350-1000 °C asteeseen. Lämpötilan noustessa yli 120 °C asteen, biomassassa alkaa lämpöhajoaminen, ja kemiallisesti sitoutunut vesi alkaa poistumaan. Pyrolyysi alkaa lämpötilan ylittäessä 270 °C astetta, tällöin rakennekomponentit, lukuun ottamatta hiiltä, hajoavat ja kaasuuntuvat. (Vuori 2017) Alle 300 °C lämpötilassa (220-300 °C) pyrolysoitua biomassaa kutsutaan torrefioituksi biomassaksi, torrefioitu biomassa soveltuu esimerkiksi energiantuotantoon, sen tiivistyneen energiatiheydensä ansiosta (Pitkänen & Sikanen 2014.).

Biohiilen valmistusmenetelmät ovat melko vakiintuneita. Valmistusmenetelmällä ei ole suoranaista vaikutusta biohiilen ominaisuuksiin, vaan valmistusprosessilla on ratkaiseva merkitys lopputuotteen ominaisuuksiin. (Kolehmainen 2018.) Kappaleessa 4.3 on käyty läpi valmistusprosessin vaikutuksia biohiilen ominaisuuksiin. Kuvassa 12 on esitetty koi-vun rakenteen muutoksia eri pyrolyysilämpötiloissa



Kuva 12. Eri pyrolyysilämpötilan vaikutus raaka-aineen rakenteen muutokseen. (Arpiainen ym. 2014).

### 4.3 Pyrolyysiprosessit

Erilaisilla pyrolyysiprosessimenetelmillä voidaan päättää, mitä lopputuotetta biomassasta halutaan ja kuinka paljon. Biomassasta on mahdollista saada biohiiltä, bioöljyä tai synteesikaasua. Pyrolyysiprosessit voidaan jakaa neljään eri prosessi menetelmään (Taulukko 10), joista jokaisella on omat vaatimukset raaka-aineen kosteudelle ja palakoolle. Esimerkiksi nopeassa pyrolyysissä, jossa prosessin viipymäaika on lyhyt, olisi palakoon oltava noin 2 mm ja raaka-aineen kosteus < 10 %. (Kettunen & Saarinen 2014.)

Vastaavasti hitaassa pyrolyysissä, jossa prosessin viipymäaika on pitkä (minuuteista tunteihin), ei raaka-aineella ole tarkempia erityisvaatimuksia. Kaasutuksessa raaka-aineen vaatimukset riippuvat kaasutusteknologiasta. Pyrolyysi on energiatehokas prosessi, joka pyörii omavaraisesti, prosessista muodostuvien haihtuvien palavien kaasujen tuottaman energian avulla. (Kettunen & Saarinen 2014.)

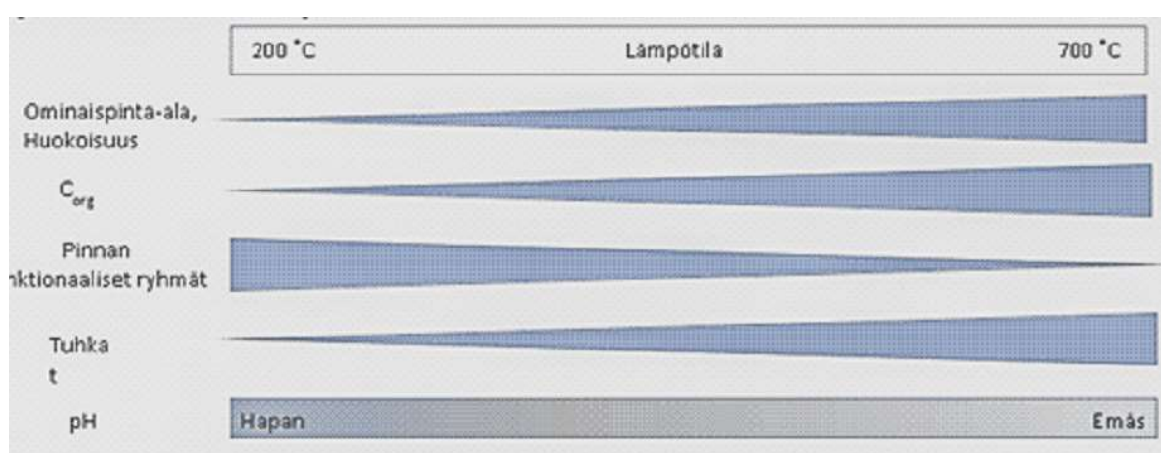
TAULUKKO 10. Erilaiset pyrolyysiprosessimenetelmät, prosessin vaatimat olosuhteet sekä saatujen lopputuotteiden keskimääräiset saannot (Kettunen & Saarinen 2014)

Pyrolyysiprosessi	Olosuhteet		Saanto (%)		
	Lämpötila	Viipymäaika	Biohiili	Bioöljy	Synteesikaasu
<b>Hidas</b>	n. 400 °C	pitkä, minuuteista tunteihin	35	30	35
<b>Keskinopea</b>	n. 500 °C	10 – 20 sekunttia	20 %	50 %	30 %
<b>Nopea</b>	n. 500 °C	hyvin lyhyt n. 1 sekunti	10 – 30	50 – 70	15 – 20
<b>Kaasutus</b>	n. 800 – 1200 °C	pitkä, kymmeniä minutteja	10	5	85

### 4.4 Biohiilen valmistusprosessin vaikutus ominaisuuksiin

Maanparannukseen käytettävän biohiilen yleisin pyrolyysiprosessimenetelmä on hidaspYROLYYSI. Biohiilen saantoon pyrolyysiprosessista vaikuttaa monet tekijät, kuten raaka-ai-

neena käytetty biomassa, biomassan esi- ja jälkikäsitteily, lämpötilan noston nopeus ja korkein käytetty lämpötila, prosessissa käytetty paine sekä prosessin kesto-aika. Lämpötilan kasvaessa biohiilen saanto vähenee, mutta lämpötilaa kasvattamalla voidaan parantaa biohiilen säilyvyyttä maassa. (Kettunen & Saarinen 2014.) Kuviossa 4 esitetään pelkistettynä biohiilen prosessilämpötilan vaikutus muutamisiin ominaisuuksiin, jotka biohiilessä muuttuvat.



Kuvio 4. Biohiilen ominaisuuksien kehitys eri prosessilämpötiloissa (Kolehmainen 2018).

#### 4.4.1 Optimaalinen pyrolyysilämpötila

Maanparannusaineeksi soveltuvan biohiilen optimaalinen pyrolyysilämpötila on yleensä 500-600 °C:ta. Pienemmässä lämpötilassa tuotetun biohiilen ominaispinta-ala ja stabiilin hiilen osuus jäävät pieniksi, sekä pysyvyys maassa on heikkoa. Korkeammassa lämpötiloissa taas ravinteet, kuten fosfori ja kalium alkavat poistumaan. (Vuori 2017.) Lämpötilan noustessa yli 1000 °C:een tuhkaantuminen lisääntyy, jonka vuoksi ominaispinta-ala laskee ja hiilen rakenne muuttuu grafiittiseksi (Kettunen & Saarinen 2014).

#### 4.4.2 Molaarisen hapen ja vedyn suhde hiileen

Kun prosessin lämpötilaa kasvatetaan, molaarisen hapen ja vedyn suhde hiileen ( $O/C_{org}$  ja  $H/C_{org}$ ) laskee, ja tämän myötä biohiilen pysyvyys maassa paranee. Molaarisen  $O/C_{org}$

suhde osoittaa biohiilen eron muihin karbonisoituihin tuotteisiin ja molaarisen  $H/C_{org}$  suhde kuvaa biohiilen karbonisointiasetta ja vakautta. (Hovi 2017.) Jotta tuotettu biohiili vastaisi Euroopan biohiilisertifikaatin arvoja, tulisi molaarisen happi-hiilisuhteen ( $O/C_{org}$ ) olla alle 0,4 ja molaarisen vety-hiilisuhteen ( $H/C_{org}$ ) alle 0,7 (EBC 2017).

Myös biohiilen muihin ominaisuuksiin, kuten pH:hon, pysyvän hiilen määrää, kokonaishiilen hiilipitoisuuteen sekä ominaispinta-alaan, voidaan vaikuttaa lämpötilan kasvatuksella. (Hovi 2017.)

#### 4.4.3 Huokoisuus ja ominaispinta-ala

Valmistusprosessissa mahdollisimman huokoiseksi valmistettu biohiili toimii parhaiten vedenpidätyksessä. Biohiilen suurta huokoisuutta ja ominaispinta-ala voidaan hyödyntää myös haitta-aineiden poistamisessa hulevesistä. Ominaispinta-ala kertoo, kuinka suuri pinta-ala aineksessa on painoyksikköä kohti. Biohiilellä ominaispinta-ala voi olla jopa 300 m<sup>2</sup>/g. Turpeella sitä vastoin on korkea nesteen pidätyskyky, sen ominaispinta-ala ollessa 200 m<sup>2</sup>/g. Suuren ominaispinta-alansa ansiosta, biohiili kykenee sitomaan yli viisinkertaisen määrän oman painonsa verran vettä. (Myllylä 2017.)

Valmiin biohiilen huokoisuuteen vaikuttavat monet tekijät, kuten käytetty raaka-aine (solukkorakenne), partikkelikoko, pyrolyysissä käytetty lämpötila ja prosessin happipitoisuus. Korkeammalla prosessissa käytetyllä lämpötilalla, voidaan kasvattaa biohiilen huokoisuutta, koska korkeammalla lämpötilalla biomassasta saadaan enemmän vettä ja happea poistumaan, ja näin muodostuu enemmän huokosiakin. Pyrolyysilämpötilan noustessa biomassassa alkaa tuhkaantumaa, ja syntyneet huokokset tukkeentuvat. Tuhkaantuminen riippuu käytetystä raaka-aineesta, esimerkiksi puuta voidaan pyrolysoida korkealla lämpötilalla, koska se tuhkaantuu hitaammin, kuin esimerkiksi ruoho. Puubiohiilen huokoisuushuippu saadaan 750 °C pyrolyysilämpötilalla. (Myllylä 2017.)

Pyrolyysilämpötilan kaksinkertaistamisella, voidaan saada puun huokoisuus 70 kertaistumaan. Esimerkiksi tammesta valmistetun biohiilen ominaispinta-ala 400 °C pyrolyysissä on 6 m<sup>2</sup>/g kun taas 800 °C:ssa käsitellyn ominaispinta-ala on 398 m<sup>2</sup>/g. (Jindo, Mizumoto, Sawada, Sanchez-Monedero & Sonoki 2014.)

Pajupoikien mukaan 300 kg pajusta tuotettua biohiiltä, pystyi käsittelemään vettä vuorokaudessa 0,6 m<sup>3</sup> ja kolmessa vuorokaudessa 0,9 m<sup>3</sup>. Biohiilen ominaispinta-ala oli 200 m<sup>2</sup>/g ja partikkelikoko noin 30 mm (Pajupojat 2017).

#### 4.4.4 Biohiilen aktivointi

Vaikkakin biohiili soveltuu moneen käyttötarkoitukseen veden ja ravinteiden pidätyskykynsä ansiosta, niin pyrolyysiuunista otettu puhdas biohiili ei välttämättä toimi tavalla, jolla sen on toivottu toimivan (Myllylä 2017). Puhdas biohiili on yleensä aktivoitava käyttötarpeidensa mukaan. RPK-hiili Oy:n Jari Rissasen (2017) mukaan aktivointi tai rikastaminen tapahtuu joko biologisesti, fysikaalisesti tai kemiallisesti. Esimerkiksi fosforin pidätykseen tarkoitettu biohiili voidaan aktivoida rautaoksidoilla, kun taas tyypeä pidättävä biohiili tulisi otsonoida (Vuori 2017). Stenströmmen (2017) tekemässä laboratoriokokeessa rautaoksidilla kyllästetty biohiili puhdisti fosforia synteettisestä hulevedestä 93 % ja raaka-biohiili puhdisti 32 % (Stenström 2017).

#### 4.5 Biohiilen haittapuolet

Eviran Lannoitevalmisteiden tyyppinimiluettelossa on maan rakennetta parantavien aineiden ryhmässä ”Kasvipерäinen kasvualustahiili” omana tyyppinimenään (Vuori 2017). Eviran mukaan biohiilen tuoteselosteessa on ilmoitettava seuraavat pitoisuudet; vesiliukoinen fosfori ja kokonaisfosfori, vesiliukoinen kalium ja kokonaiskalium, pH, johtokyky, kosteus, tuhkapitoisuus, haitallisten metallien pitoisuudet, hiiltämislämpötila ja viipymä sekä raaka-aineet ja alkuperä (Evira 2016a). Vuodesta 2018 lähtien biohiilen tuottajien on oltava REACH-rekisteröityjä, jos tuotanto ylittää yli tuhat kiloa vuodessa (Vuori 2017). REACH-asetus 1907/2006 on Euroopan parlamentin ja neuvoston asetus, kemikaalien rekisteröinnistä, arvioinneista, lupamenettelyistä ja rajoituksista. (Tukes 2016.)

##### 4.5.1 PAH- ja PCB- yhdisteen, dioksiinit ja furaanit

Biohiilestä suodatusrakenteessa liukeneviin haitta-aineisiin vaikuttaa ratkaisevasti se, millaisesta biohiilestä on kyse ja miten sitä on käsitelty tuotantoprosessin jälkeen ennen käyttöönottoa. Korkealaatuisesta biohiilestä ei irtoa juuri mitään, kun taas huonolaatuisesta irtoaa haitta-aineita PAH-yhdisteistä alkaen. (Kolehmainen 2018.) Biohiilessä voi esiintyä monia eri haitta-aineita, kuten raskasmetalleja, polysyklisiä aromaattisia hiilivetyjä (PAH-yhdisteet), polykloorattuja bifenyyleitä (PCB-yhdisteet), dioksiineja ja furaaneja. Haitta-aineita voi syntyä pyrolyysin sivutuotteina, riippuen käytetystä raaka-aineesta tai pyrolyysiprosessin toiminnasta. Esimerkiksi biohiilellä, joka on valmistettu keittiöjätteestä, on kor-

keampi dioksiinipitoisuus kuin biohiilellä, joka on valmistettu kasvijätteestä. Korkea dioksiinipitoisuus voi johtua raaka-aineen korkeasta klooripitoisuudesta. Keittiöjätteen korkea klooripitoisuus on osittain peräisin ruokasuolasta NaCl. (Riikonen 2017.)

PAH-yhdisteiden määrään vaikuttaa pyrolyysin lämpötila ja kesto, sekä raaka-aine, jota käytetään. Biohiilessä olevien PAH-yhdisteiden pitoisuus vähenee pyrolyysin keston ja lämpötilan lisääntyessä (Hovi 2017). Valtioneuvoston asetus maaperän pilaantuneisuuden ja puhdistustarpeen arvioinnille (214/2007) asettaa alemman- ja ylemmän ohjearvon PAH-yhdisteiden pitoisuuksille. Alemmalla ohjearvolla kuvataan suurinta yleisesti hyväksyttävää riskiä tavanomaisessa maankäytössä ja ylemmällä ohjearvolla kuvataan suurinta hyväksyttävää riskiä tavanomaista vähemmän herkässä maankäytössä, kuten teollisuus- ja varastoalueilla. (Valtioneuvosto 214/2007, 2§.) Valtioneuvoston asettaman Dioksiini ja PCB-yhdisteiden raja-arvoissa PAH-yhdisteiden alempi ohjearvo on 30 mg/kg kuiva-ainetta ja ylempi ohjearvo 100 mg/kg kuiva-ainetta (Maaperän haitallisten aineiden pitoisuuksien kynnys- ja ohjearvot 2007)

Euroopan biohiilisertifikaatti on asettanut enimmäispitoisuudet eri haitta-aineille. PAH-pitoisuus tulee olla alle 12 mg/kg, PCB-pitoisuus alle 0,2 mg/kg, dioksiini- ja furaanipitoisuus alle 20 mg/kg kuiva aineessa biohiiltä (EBC 2017).

#### 4.5.2 Raskasmetallit

Biohiilen tuotannossa käytetyssä raaka-aineessa olevat raskasmetallit rikastuvat biohiileen, koska tuotantoprosessissa raaka-aineen massa pienenee, mutta raskasmetalleja poistuu heikosti (Riikonen 2017). Taulukossa 11 on esitetty Euroopan biohiilisertifikaatin määrittämät enimmäispitoisuudet raskasmetalleille ja Suomessa sallitut tuhkalannoitteen raskasmetallien enimmäispitoisuudet. Taulukossa 11 on myös esitetty eri raaka-aineista valmistettujen biohiilien raskasmetallipitoisuuksien keskiarvoja.



TAULUKKO 11. Raskasmetallien sallitut enimmäispitoisuudet sekä keskiarvoja eri raaka-aineista valmistetuista biohiilistä. Pitoisuudet ilmoitettu mg/kg (Hovi 2017; EBC 2017; Evira 2016b)

Enimmäispitoisuudet	Arseeni (As)	Kadmium (Cd)	Kromi (Cr)	Kupari (Cu)	Elohopea (Hg)	Nikkeli (Ni)	Lyijy (Pb)	Sinkki (Zn)
<b>Tuhkalannoite</b>	25	2,5	300	600	1,0	100	100	1500
<b>Biohiilisertifikaatti</b>		< 1,5	90	< 100	< 1	< 50	< 150	400
<b>Raaka-aine</b>								
<b>Purkupuuh</b>	< 0,72	< 0,04	15,96	10,36	< 0,23	1,67	35,25	40,29
<b>Vehnän olki</b>	< 0,72	< 0,04	14,36	2,17	< 0,23	1,41	< 0,74	2,65
<b>Pajun runko</b>	< 0,72	11,46	< 0,49	6,91	< 0,23	0,36	16,27	513,64
<b>Punapaju</b>	< 0,72	48,86	0,83	8,14	< 0,23	0,78	20,71	629,87
<b>Ruokajäte</b>	< 0,72	< 0,04	6,34	14,38	< 0,23	10,21	15,12	56,41

#### 4.6 Biohiilen käytön rajoitukset

Pyrolyysiuunista tulevan raakabiohiilen pinta alkaa hapettua ja siihen muodostuu toiminnallisia ryhmiä hiilestä, vedystä sekä hapestä. Tämän vuoksi raakabiohiili tulisi aktivoida, käyttökohteensa mukaan. Raakabiohiili sitoo hyvin ravinteita, mutta lisää VOC- yhdisteitä (Volatile Organic Compounds), jotka ruokkivat mikrobeja ja sitovat typpivaroja pois kasvien käytöstä. (Wilson 2014.) VOC-yhdisteet ovat haihtuvia orgaanisia yhdisteitä

##### 4.6.1 Kationinvaihtokapasiteetti

Biohiilen kationinvaihtokapasiteettiin (cation exchange capacity, CEC tai KVK) vaikuttavat monet tekijät, kuten pyrolyysin lämpötila tai raaka-aine, josta biohiili on tehty. Korkeammassa lämpötilassa valmistetun biohiilen KVK on pienempi kuin alhaisemmissa lämpötiloissa valmistetun ja vastaavasti puusta valmistetulla biohiilellä on pienempi KVK kuin heinästä valmistetulla biohiilellä. (Kettunen & Saarinen 2014; Hovi 2017.) Myöskin kationinvaihtokapasiteetti tuoreella biohiilellä on alhainen, verrattuna biohiilen, joka on ollut maassa jonkin aikaan (Rizzo 2015).

Kationinvaihtokapasiteetilla kuvataan materiaalin kykyä sitoa itseensä ravinteita ja positiivisesti varautuneita ioneja eli kationeja. KVK:n ollessa alhainen, ravinteet pääsevät huuh-

toutumaan herkemmin (Haikarainen 2017). Vaikkakin raakabiohiilellä olisi alhainen kationinvaihtokapasiteetti, niin raaka-aineista riippuen biohiilessä voi olla runsaasti karbonaateja, jotka nostavat maaperän pH:ta. pH:n kasvu lisää maaperän KVK:ta, kun maahiukkasten pinnoilta irtoavat vetyionit vapauttavat negatiivisesti varautuneita paikkoja (Myllylä 2017).

#### 4.6.2 Hajoaminen maassa

Biohiilen hajoamiseen maassa vaikuttavat monet tekijät, kuten biohiilen itsensä ominaisuudet (käytetty raaka-aine, tuotantoprosessin lämpötila ja pyrolyysin nopeus), ympäristötekijät (maalaji, maan muun orgaanisen aineksen pitoisuus, lämpötila ja kosteus), maan ja kasvuston käsittely (kyntäminen ja kulotus) sekä maaperäeliöstö. Biohiilen kulkeutumisherkkyys kasvaa, kun biohiilikappaleet hajoavat maassa pienemmiksi palasiksi, tällöin ne altistuvat veden tai tuulen mukana pois kulkeutumiselle. Riikosen (2017) tekemän selvityksen mukaan Wangin ym. (2016) laboratorioissa tehtyjen inkubaatiokokeiden perusteella on päätelty, että biohiilen hitaasti hajoavan fraktion suuruus on keskimäärin noin 97 % painosta, tällöin keskimääräinen viipymä maassa olisi noin 560 vuotta. Laboratorioinkubaatioissa voidaan välttää biohiilen säilymisaikaan vaikuttaviin tekijöihin, kuten eroosioon tai pois kulkeutumiseen. (Riikonen 2017.)

#### 4.6.3 Ominaispinta-ala ja hydrofobisuus

Ajan myötä biohiilen ominaispinta-ala laskee, kun sen huokokset tukkeutuvat adsorboituvista partikkeleista, mikrobeista jne. Toisaalta biohiilen pinnan jatkuvan hapettumisen myötä, voi partikkelien pinnoille syntyä uusia funktionaalisia ryhmiä, ja tällöin biohiilen voi kiinnittyä muita eloperäisiä molekyyliä, joiden avulla biohiilen kemiallinen aktiivisuus lisääntyy. Myös maaperäeliöt syövät pinnalle ja huokosiin kertynyttä ainetta, ja tällä tavoin hidastavat huokosten tukkeutumista. Biohiilen kokonaisvedenpidätyskyky riippuu biohiilen hydrofobisuudesta sekä huokosista. Tuore biohiili on usein hydrofobista, eli veden imemisen sijaan se hylkii vettä, kyseinen ominaisuus kuitenkin heikkenee ajan kuluessa. Hydrofobisuuteen vaikuttaa pyrolyysilämpötila sekä käytetty raaka-aine. Korkeammissa lämpötiloissa tuotetut biohiilet ovat yleensä vähemmän hydrofobisempia. Vaikkakin korkeammassa lämpötilassa tuotetulla biohiilellä olisi hyvä huokosto, niin hydrofobisuus voi heikentää vedenimemiskykyä. (Riikonen 2017.)

## 5 BIOHIILEEN LIITTYVIÄ AIKAISEMPI TUTKIMUKSIA

### 5.1 Biohiili lisääminen maaperään

Delawaren yliopiston tekemässä kenttäkokeessa testattiin, tuoko biohiilen lisääminen maaperään hyötyä tienvarrelta valuvien hulevesien ja sadevesien käsittelyssä. Mittauksia varten tienvarrelle tehtiin kaksi eri testikenttää kontrollikenttä ja biohiilikenttä. Molempien kenttien maa-aineksena toimi tienvarrella oleva maalaji, biohiilikenttään oli vain lisätty 4% biohiiltä maalajin sekaan. (Brown 2016.) Kuvassa 13 on esitetty testikenttien sijoittumiset tienvarrelle.

Mittauksia otettiin kolmesta eri kohteesta: tienvarrelta, kontrollikentältä sekä biohiilikentältä. Mittausten perusteella biohiili vähensi valunnan määrää, kun maaperän vedenpidätyskyky kasvoi 30%. Biohiili vähensi myös nitraatin ( $\text{NO}_3$ ) määrää 43%, kun taas kontrollikenttä kasvatti nitraatin määrää 6.1%. Nitriitin ( $\text{NO}_2$ ) määrä myös vähentyi 21%, mutta sademäärän kasvaessa kokonaistypen (kok N) määrä kasvoi 15%. (Brown 2016.)



Kuva 13. Yleiskuva tienvarrella sijaitsevistä testiketistä (Brown 2016).

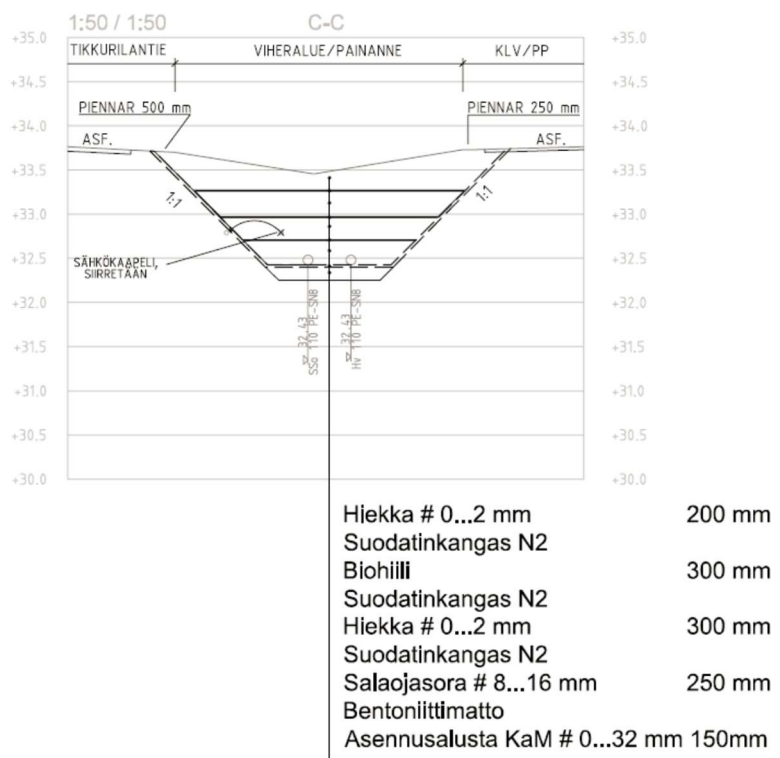
## 5.2 Vantaan Tikkurilantien katuvesien puhdistus

Vantaan Tikkurilantien varrella sijaitseville biosuodatuskentille, toteutettiin vuonna 2017 hiekkasuodatuskenttien kohdalle pilottisuodatin, jossa käytettiin koivusta valmistettua biohiiltä. Pilottisuodatin eristettiin muista suodatuskentistä. Biohiilisuodattimen rinnalle rakennettiin vertailukohtana toimiva hiekkasuodatin. Uudet suodattimet ovat rakenteeltaan lähes samat, mutta biohiilisuodattimessa on 300 mm kerros koivuhakkeesta valmistettua biohiiltä. Molempien kenttien koot olivat 10m x 3,4m sekä molemmista rakenteista estettiin veden suotautuminen salaojitusvyöhyteen bentoniittimatolla. (Leinonen 2017, 32-33.) Kuvassa 14 on suodatuskentän rakennusvaiheet sekä kuviossa 5 on esitetty biohiilisuodattimen rakenteen poikkileikkaus.



salaojat ja sepeli – hiekka ja biohiili – pintahiekka

Kuva 14. Suodatuskentän rakennusvaihe (Auvinen 2017).



Kuvio 5. Vantaan Tikkurilantielle toteutetun biohiilisuodattimen poikkileikkaus (Leinonen 2017).

Tutkimuksissa tehtyjen tulosten perusteella molemmat suodatuskentät (biohiili- ja hiekkakenttä) paransivat huleveden laatua, varsinkin raskasmetallien ja kiintoaineiden kohdalla. Biohiilisuodatus puhdisti raskasmetalleja hieman paremmin kuin hiekkasuodatus, etenkin lyijyn osalta. Molemmat myös pidättivät fosforia hyvin, mutta niiden havaittiin vapauttavan fosfaattia, hiekkasuodatus vapautti enemmän. Biohiilisuodatuksesta taas vapautui orgaanista hiiltä.

Biohiilisuodattimen suurin etu oli typen pidätyksessä, etenkin nitraatti muodossa olevan typen, myös vedenpidätyskyky oli parempi kuin pelkällä hiekkasuodatuksella. (Assmuth 2017, 33-67) Taulukossa 12 on verrattuna suodatuskentille tulevien hulevesien ja sieltä poistuvien hulevesien eroja. Laatuasteikolla vihreä kuvaa huleveden laadunparantumista ja punainen heikentymistä

TAULUKKO 12. Hulevesien laadunmuutokset suodatuksen jälkeen (Auvinen 2017)

Laatuasteikko	Biohiilisuodatus	Hiekkasuodatus
++ hyvä		
+ tydyttävä		
0		
- välttävä		
-- huono		
Kiintoaine	++	++
pH	-	--
Sähkönohtavuus	--	-
Alkaliniteetti	--	-
Redox	+	++
Sameus	++	++
Ammonium (NH <sub>4</sub> )	++	++
Fosfori (P)	++	++
Fosfaatti (PO <sub>4</sub> )	0	--
Kokonaistyyppi (N)	+	--
Nitriitti (NO <sub>2</sub> )	+	--
Nitraatti (NO <sub>3</sub> )	+	--
Kokonaishiili (TOC)	-	0

## 6 SUODATUSRAKENTEEN KUNNOSSAPITO

### 6.1 Kunnossapidon merkitys

Biosuodatusalueen pitkäaikainen toiminta varmistetaan rakentamisen valvonnalla ja kunnossapidolla. Esimerkiksi rakenteen syvyys jää rakennusvaiheessa huolimattomuuden vuoksi matalammaksi kuin on mitoitettu, on sillä suora vaikutus maan pällisen varastotilavuuteen ja sen myötä rakenteen mahdolliseen tulvimiseen. (Komulainen 2012.)

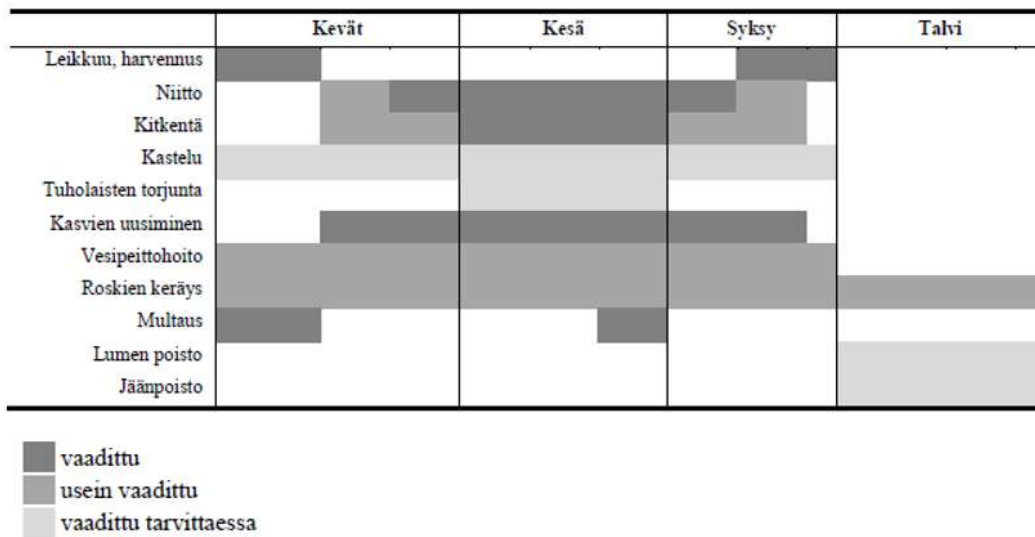
Suurimpia haasteita biosuodatusalueen toiminnalle ovat niiden tukkeutumiset. Suurimmat tukkeutumiseriskit ovat suodattimissa, jotka ovat valuma-alueeseen verrattuna kooltaan liian pieniä, tällöin suodattimeen päätyvän kiintoaineiden määrä ja hydraulinen kuormitus ovat liian suuria (Jormola ym. 2016). Pintarakenteen voidaan olettaa olevan tukossa, jos hulevesi viipyy rakenteen päällä yli 6 tuntia (Lehikoinen).

Muthannan (2007) tutkimuksen mukaan suodatinkerroksen vaihtoväliksi riittää arvioilta 10-20 vuotta. Ilman kunnossapitoa olevan suodatusrakenteen elinkaareksi, arvioitiin laboratoriotutkimuksessa noin 11 vuotta, tällöin puhdistuskyvyt heikkenevät huomattavasti. Tutkimuksen tapauksessa sinkin poisto väheni selkeästi. (Komulainen 2012.)

### 6.2 Kunnossapitotoimenpiteet

Rakenteen toiminnan kannalta on tärkeintä varmistaa rakenteen vedenläpäisykyky. Hydraulisen toimivuuden kannalta on tärkeää vähentää ylimääräisten kiintoaineiden ja roskien kulkeutuminen suodatusrakenteeseen. Kiintoaineiden määrää voidaan vähentää lisäämällä tuloreitille tai hallintarakenteen alkupäähän lietepesä tai muu vastaava erotin, kiintoainesten laskeutumista varten. Lietepesä tulisi puhdistaa vuosittain (Rakennustietosäätiö 2017).

Kuntaliiton (2012) laatiman hulevesioppaan mukaan, rakenteen pinnalle ja salaojiin kertyneet sedimentit, tulisi puhdistaa vuosittain. Myös alueen puhdistaminen roskista ja kuolleesta kasvillisuudesta pidentää suodatusrakenteen elinikää. (Kuntaliitto 2012.) Kasvillisuuden leikkaamisella pidennetään kasvien elinikää ja parannetaan metallien sitomista, samoin myös mahdollisen katekerroksen uusimisella parannetaan metallien sitomista. Muthannan (2007) mukaan katekerros tulisi uusia 3-7 vuoden välein, jotta metallien sitominen säilyisi. (Komulainen 2012.) Kuviossa 6 on esitetty biosuodatusalueen eri kunnostustoimenpiteitä eri vuodenaikoina.



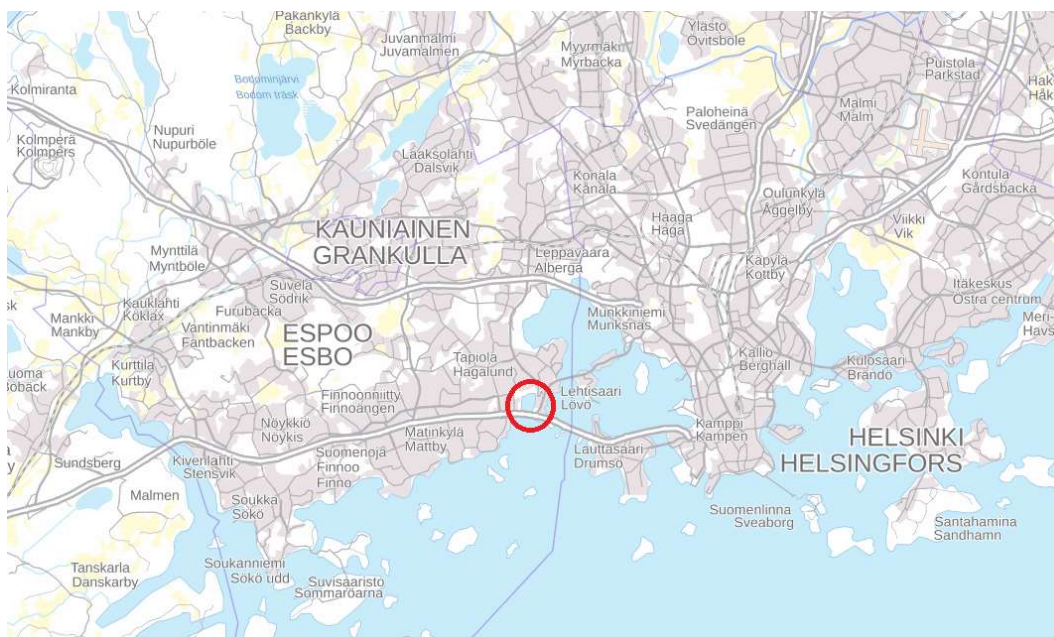
Kuvio 6. Biosuodatusalueen kunnostustoimenpiteitä eri vuodenaikoina (Lehikoinen 2015).



## 7 CASE OTSOLAHTI

### 7.1 Yleistietoa nykytilanteesta

Otsolahti on Espoon Tapiolassa sijaitseva lähes suljettu merenlahti. Otsolahti on osa Suomenlahden sisäsaaristoa ja Kymijoen-Suomenlahden vesienhoitoaluetta. Otsolahtea ympäröivät vilkkaasti liikennöidyt tiet: Kehä I pohjoisessa ja idässä (Hagalundintie ja Karhusaarentie), etelässä Länsiväylä ja lännessä Tapiolantie. (Vahanen 2017.) Lahden ympärillä on runsaasti asutusta ja lähimmät asuinrakennukset ovat noin 30 metrin päässä rantaviivasta (Maanmittauslaitos 2018). Otsolahtea rajaavat pohjoispäädyssä laaja nurmialue ja metsikkö; itäpuoli on pääosin luonnontilaista, jossa lähin asutus rannasta on noin 30 metrin etäisyydellä; etelässä on Länsiväylän siltapenkereet ja Lännessä on Otsolahden satama ja puisto / viheraluetta. (Vahanen 2017.). Kuviossa 7 on esitetty sinisellä merkittynä Otsolahden sijainti kartalla.



Kuvio 7. Otsolahden sijainti (Paikkatietoikkuna 2018).

Alueen asukkaat ja venekerhon jäsenet toimivat aktiivisesti lahden kunnossapidon puolesta. Vuosina 2012 ja 2015 Otsolahden kunnostuksesta ja ruoppauksesta on tehty kuntalaisaloitteet ja lahden ympäröivää aluetta on kunnostettu talkoovoimin. Vuonna 2017 valmistui Vahanen Environmentin laatima Otsolahden perustilaselvitys, jossa tutkittiin vesistön nykytilaa muun muassa veden ja pohjan laatua kuvaavien muuttujien avulla. Edellinen perustilaselvitys oli tehty vuonna 2000. Merkittäviä muutoksia ei 17 vuoden aikana ole tapahtunut, mutta Otsolahden sedimentin ravinnepitoisuudet ovat kasvaneet huomattavasti ja pohjaeliöstö on muuttunut runsasravinteisia olosuhteita suosivaksi. Vedenlaatu Otsolahdessa on pääosin yleisen käyttökelpoisuuden vedenlaatuluokituksen luokkarajojen mukaisella tyydyttävällä ja ajoittain välttävällä tasolla. (Vahanen 2017.)

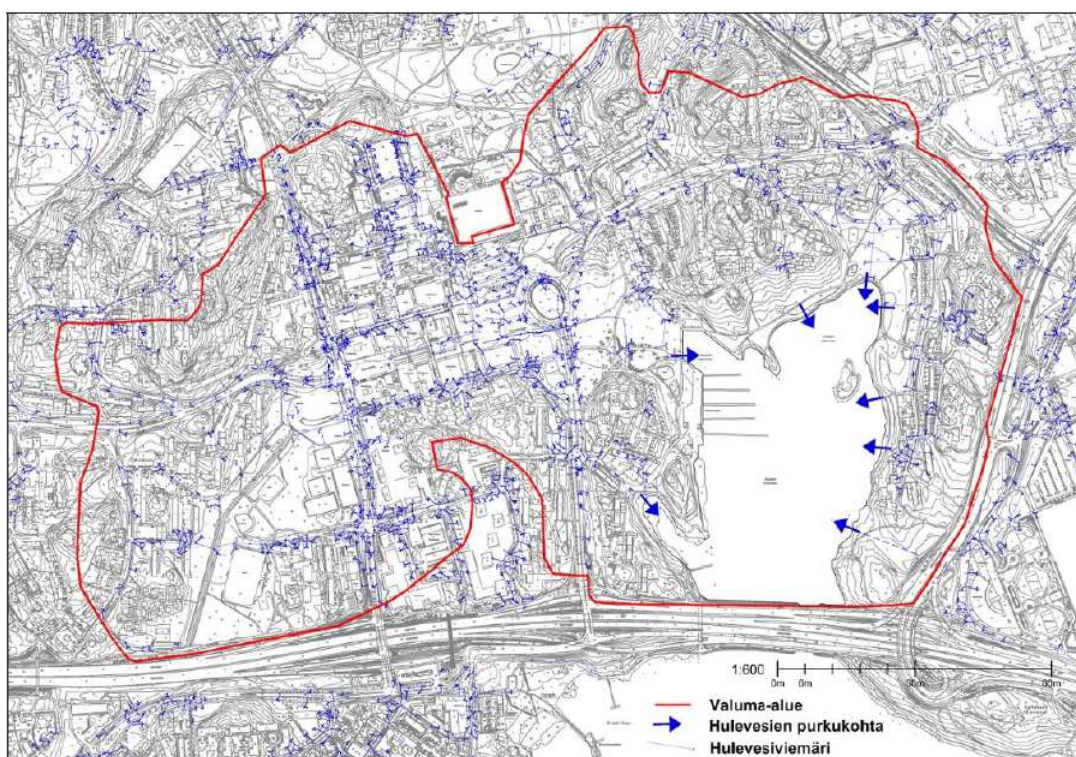
Tulosten perusteella on arvioitu jatkotutkimusten ja -toimenpiteiden tarvetta sekä kunnostusvaihtoehtoja ja niiden kustannuksia. Yksi vaihtoehto olisi hulevesien viivyttäminen ja laadullinen parantaminen esimerkiksi kosteikoilla tai hulevesialtailla, joilla voitaisiin vähentää lahden päätyvien ravinteiden ja hienoainesten määrää. (Vahanen 2017.) Vuonna 2018 rakennetaan hulevesiä käsittelevä ja viivyttävä biohiilisuodatuskenttä Otsolahden pohjoispäädyyn nurmialueelle. Kuviossa 8 on esitetty kartalla, tulevan biohiilisuodatuskentän sijoittuminen.



Kuvio 8. Biohiilisuodatuskentän sijainti (Paikkatietoikkuna 2018).

## 7.2 Valuma-alueet ja hulevesien laatu

Otsolahteen laskee ja johdetaan hulevesiä hulevesiviemäreitä ja avo-ojia pitkin pohjoisesta, idästä ja lännestä. Maapinnanmuotoihin perustuvaa valuma-aluetta, rajaavat pitkälti lahtea kiertävät tiet. Maapinnanmuotojen perusteella on arvioitu Otsolahden luonnollisen valuma-alueen laajuudeksi noin 80 ha. Otsolahteen johdetaan hulevesiä viemäröitynä Tapiolan länsipuolelta, Tapiolantien pohjoispuolelta ja Karhusaarentieltä. Karhusaarentien itäpuolelta ei johdeta vesiä Otsolahteen. Kokonaisuudessaan Otsolahteen tulee vesiä (hulevesiviemäröitynä ja luontaisesti) noin 193 ha alueelta. (Vahänen 2017.) Kuviossa 9 on esitetty arvioitu Otsolahden valuma-alue punaisella ja sadevesilinjat ja purkupaikat sinisellä. Kaikkia hulevesiviemäreitä ja avo-ojia ei ole kartoitettu ja merkitty kartalle.



Kuvio 9. Otsolahden valuma-alue ja sadevesilinjat ja purkupaikat (Vahänen 2017).

## Vesinäytteiden laatu

Otsolahteen laskevien hulevesien laatua ei ole seurattu aktiivisesti. Vuonna 2015 perustilaselvitystä varten otettujen vesinäytteiden perusteella on selvitetty Otsolahden veden fysikaalis- kemialliset ominaisuudet. Mittaukset tehtiin kahdesta eri pisteestä kahtena eri aikana.

Vesistön rehevyystasoa kuvaava Klorofylli-a on ollut toisessa pisteessä tyydyttävällä tasolla ja toisessa hyvällä tasolla. Veden happipitoisuus kuvastaa vesistön rehevyyttä ja orgaanisen aineksen aiheuttamaa kuormitusta, happipitoisuus Otsolahdessa on ollut kesäkaudelle keskimääräinen, jopa hiukan korkea. Kesäaikaan rehevissä järvissä happipitoisuus on korkea kasvien yhteyttämisen johdosta. Ongelmia muodostuu talvella, kun orgaaninen aines hajoaa ja kuluttaa happea. Otsolahden kemiallinen hapenkulutus on ollut koholla, kemiallisella hapenkulutuksella kuvataan vedessä kemiallisesti hapettuvien orgaanisten aineiden määrää. (Vahanen 2017.)

Kiintoainepitoisuus on ollut koholla ja ravinteiden (typpi ja fosfori) pitoisuudet ovat olleet tyydyttävällä ja välttävällä tasolla. Ravinteiden ylitarjonta voi johtaa vesialueen rehevöitymiseen. Koliformisten bakteerien lukumäärät ovat korkeat, ne kuvaavat yleistä likaantumista ja epäpuhtauksia. Kuitenkin saastumista aiheuttavien E.coli ja enterokokki bakteerien pitoisuudet ovat olleet vähäisiä. Otsolahdesta saatuja vesituloksia on verrattu pintavesien ekologisen luokituksen luokkarajoihin (Ympäristöhallinnon ohjeita 7/2012), yleisten uimarantojen uimaveden laatuvaatimukseen (Sosiaali- ja terveysministeriön asetus 177/2008) ja yleisesti Suomenlahden sisäsaariston ja Itämeren fysikaalis- kemiallisiin arviointeihin. (Vahanen 2018.)

Otsolahden pohjoispäätyyn johdetusta hulevesiviemäristä on otettu vesinäytteitä loppuvuonna 2017 ja alkuvuodesta 2018. Taulukossa 13 on esitetty Otsolahden pohjoispäädyn hulevesiviemäristä otettujen vesinäytteiden tuloksia, verrattuna Otsolahden perustilaselvityksen vesinäytteiden tuloksiin sekä suositukseen pintaveden laadun yleisiin vertailuarvoihin. Tuloksista voidaan nähdä myös huleveden metallipitoisuuksien kasvu lumien sulannan aikaan

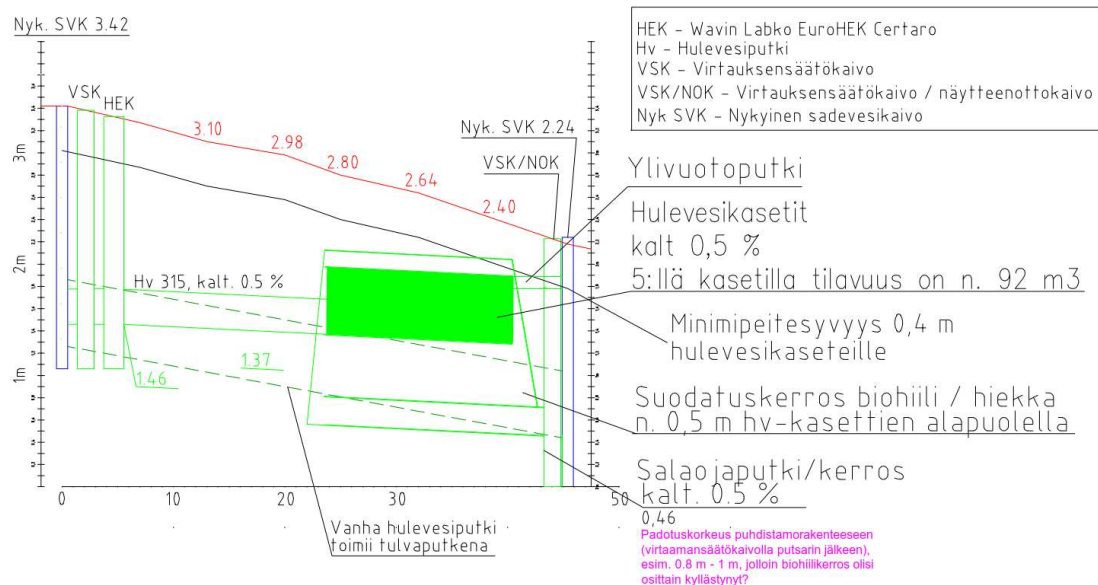
TAULUKKO 13. Otsolahden vesinäytteiden tuloksia ja suosituksia pintaveden laadun yleiseksi vertailuarvoiksi. (Vahanen 2017; Vahanen 2018a Ympäristöhallinto 2014)

		Otsolahti 29.11.2017	Otsolahti 4.4.2018	Suosituksset pinta- veden laadun yleiseksi vertai- luarvoiksi (OH 6/2014)
Kiintoaine (GF/C)	mg/l	22	28,1	
pH		6,99	6,7	
Fosfori (P)	mg/l	< 0,050	0,45	
Kokonais- typpi (N)	mg/l	2,99	2,5	
Kupari (Cu)	µg/l	22,5	65,8	7,8
Lyijy (Pb)	µg/l	<5,0	<5,0	7,2
Sinkki (Zn)	µg/l	46,6	183	3,1
Kadmium (Cd)	µg/l	<0,40	<0,40	0,08
Kromi (Cr)	µg/l	3,5	9,8	3,4
E. Coli	pmy/100ml	170	170	

### 7.3 Tuleva suodattamo

Espoon Otsolahden biohiilisuodattamo sijoittuu Otsolahden pohjoispäädyn nurmialueelle (kuviossa 8). Varsinaiset rakennesuunnitelmat eivät tämän opinnäytetyön aikana kerenneet valmistua, joten opinnäytetyössä käydään tuleva biohiilisuodatusrakenne periaatteisella tasolla läpi. Biohiilisuodatusrakenne kytketään olemassa olevaan hulevesiviemäriin. Hulevesiviemäristä hulevedet johdetaan ensimmäiseksi virtauksensäätökaivolle, jossa huleveden virtaama voidaan ohjata ja säätää halutun mukaiseksi. Virtauksensäätökaivolta hulevedet siirtyvät hiekanerottimelle. Hulevesien ensimmäinen käsittely on hiekanerottimella, jolla erotetaan hulevedestä suurimmat kiintoaineet. Tämän jälkeen vesi johdetaan hulevesikasetteihin, joiden tarkoituksena on hidastaa valuntaa ja varastoida hulevesiä. Lopuksi vedet valutetaan hulevesikasettien alapuolella olevalle biohiilisuodattimelle. Biohiilisuodatuksessa hulevedet puhdistetaan suodattamalla ne suodatusrakenteen läpi. Suodatetut hulevedet johdetaan hulevesiviemäriä pitkin Otsolahteen. Kuviossa 10 on esitetty periaatekuva Otsolahden hulevesien suodattamosta

PITUUSLEIKKAUS 1:200 / 1:20  
PITUUSLEIKKAUS 1:200 / 1:20



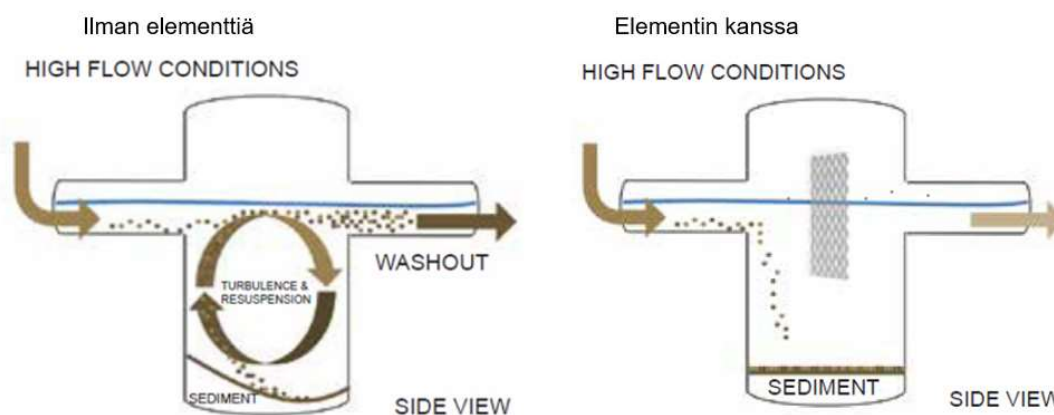
Kuvio 10. Periaatekuva Otsolahden hulevesien suodattamosta (Vahanen 2018b).

### 7.3.1 Hiekanerotin

Avoimet imeytyskaivannot ja maansisäiset kaivannot tulee varustaa hulevesien esikäsitteilyllä esimerkiksi hiekanerottimella. Hiekanerottimella vähennetään hulevesien mukana tulevaa kiintoainetta ja se on tärkeä osa suodatuskentän pitkäikäisyyden kannalta, koska kiintoaine nopeuttaa suodatusrakenteen tukkeutumista (Rakennustietosäätiö 2017). Kiintoaineeseen on sitoutunut myös osa haitta-aineista, joita hulevesissä tavataan, kappaleessa 2 on käyty kiintoaineessa olevia haitta-aineita läpi.

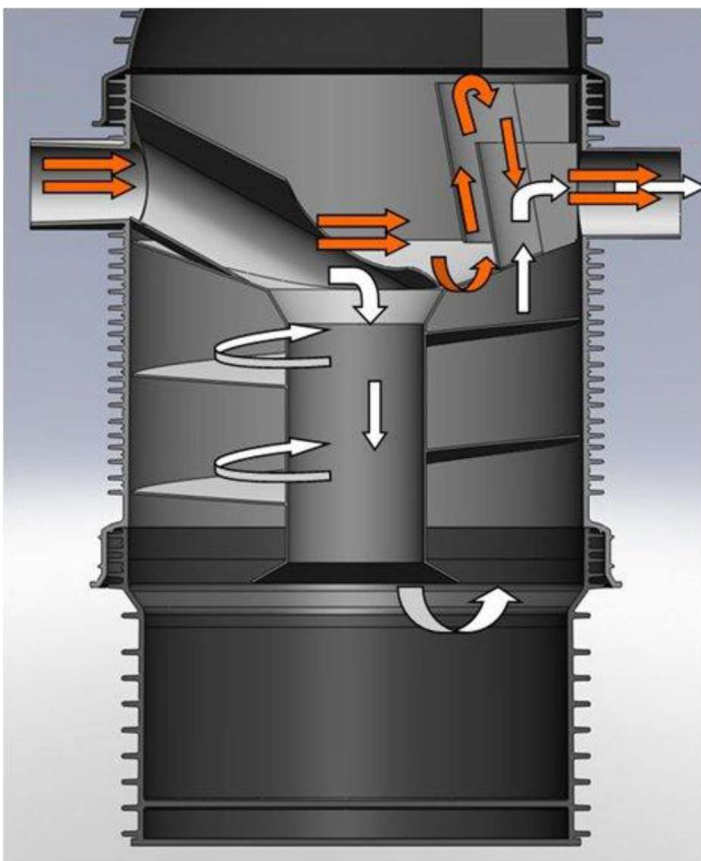
Hiekanerottimia on saatavilla kahdenlaisia painovoimaisesti- ja pyörrevirralla erottavia hiekanerottimia. Perinteisessä hiekanerottimessa puhdistettava vesi virtaa hiekanerottimelle ja siellä kiintoaineet vajoavat painovoimaisesti hiekanerottimen pohjalle. Uponor on patentoinut smart trap kiintoaineita tehostavan elementin, jolla kiintoaineen erottelukyky on neljä kertaa tehokkaampi kuin tavanomaisessa painovoimaisessa hiekanerottimessa. Uponor Smart Trap hiekanerottimen toiminta perustuu turbulenssin vähentämiseen kaivossa, jolloin virtaama rauhoittuu ja kiintoaine erottuu tehokkaammin (Lempinen 2018).

Painovoimaisen hiekanerottimen ja Uponor Smart Trap erottimen toimintaperiaatteet on esitetty kuviossa 11.



Kuvio 11. painovoimaisen hiekanerottimen ja smart trap elementillä varustetun hiekanerotin toimintaperiaate (Lempinen 2018).

Otsolahden biohiilisuodattamon hiekanerottimeksi valikoitui Wavin Labkon EuroHEK Certaro pyörrevirtahiekanerotin. Wavin Labkon EuroHEK Certaro pyörrevirtahiekanerottimen toiminta perustuu spiraalimaiseen rakenteeseen ja veden pyörivään liikkeeseen. Wavin Labkon testien mukaan pyörrevirtahiekanerottimella erottuu pieniä kiintoainehiukkasia jopa 50 % tehokkaammin, kuin perinteisellä painovoimaan perustuvalla hiekanerottimella. (Kauppi 2018). Kuviossa 12 on esitetty EuroHEK Certaro pyörrevirtahiekanerottimen toiminta ja taulukossa 14 on esitetty kiintoaineiden prosentuaaliset vähenemät eri hiekanerotimilla.



Kuvio 12. Wavin Labko EuroHEK Certaro hiekanerotin toimintaperiaate (Kauppi 2018).

TAULUKKO 14. Pienten kiintoaineiden prosentuaaliset vähenemät eri hiekanerotimilla (Kauppi 2018; Lempinen 2018)

Toimintaperiaate	Hiekanerotin	Virtaama l/s	Partikkelikoko $\mu\text{m}$	Erotus %
<b>Painovoimaiset</b>	Ilman Smart Trap elementtiä	17	110	18
	Uponor Smart Trap	17	110	40
<b>Pyörrevirta</b>	Wavin Labko EuroHEK Certaro	10	75	85



### 7.3.2 Hulevesikasetit

Hulevesikasetit on tarkoitettu veden varastointia varten ja ne pystyvät varastoimaan vettä yli 90 % kokonaistilavuudestaan (Kuntaliitto 2012). Hulevesikasetit on valmistettu tyypillisesti polypropeenista sekä niiden moduulirakenteen ansiosta niitä voidaan asentaa päällekkäin ja riveihin halutun kokoiseksi järjestelmäksi. Järjestelmän on mitoitettava paikallisten rankkasateiden määrän mukaan. Muita huomioon otettavia asioita ovat: vähintään 1 metrin etäisyys pohjavedestä, riittävällä etäisyydellä puustosta ehkäistään juuriston tunkeutuminen hulevesituotteisiin (vähintään odotetun latvuksen halkaisijan verran) ja vähintään 6 metrin etäisyys kellaritiloista joita ei ole tiivistetty. Asennussyvyudessa on myös otettava huomioon hulevesikasettien päälle tuleva kuormitus. (Uponor 2012; Wavin labko 2018) Otsolahden suodattamon hulevesikasettien vesitilavuudeksi tulee n. 93 m<sup>3</sup>, tämä saavutetaan 5 hulevesikasetilla. Kuvassa 15 on esitettyä Tampereen Kaupin alueelle asennetuista hulevesikaseteista.



Kuva 15. Hulevesikasetit Tampereen Kaupin alueella (Wavin Labko 2018).

### 7.3.3 Biohiilisuodatin ja teoreettinen puhdistuskyky

Hulevesikaseteilta biohiilisuodatukseen johdetut hulevedet suodattuvat maarakenteiden läpi, jonka jälkeen vedet johdetaan hulevesiviemäriä pitkin Otsolahteen. Biosuodatuksen toiminta on käyty tarkemmin läpi kappaleessa 3. Biohiilen lisäksi suodatusrakenteen puhdistavaa toimintaa voidaan tehostaa muillakin aineksilla, kuten hiekalla, Leca® soralla tai turpeella. Taulukossa 15 on esitetty VTT:n suodatusmateriaalitestin tuloksia eri suodatusmateriaalisekoitusten mukaan. Taulukosta 15 nähdään myös rautaoksidilla (Fe) aktivoimisen vaikutus suodatusmateriaalin puhdistuskykyyn. Puhdistuskyvyn prosentuaalinen parantuminen Fe aktivoinnilla on laskettu kaavalla 3. Kaavat löytyvät sivuilta 54-55.

TAULUKKO 15. Suodatusmateriaalisekoitusten haitta-aineiden puhdistuskyvyt prosentuaalisesti ja Fe aktivoitun biohiilen puhdistuskyvyn prosentuaalinen muutos (Holt ym. 2017a)

VTT Stormfilter projektin suodatusmateriaalitestit	Kupari (Cu) %	Lyijy (Pb) %	Sinkki (Zn) %	Fosfori (P) %
Leca®, turve +10% kalkkikivi, kuusibiohiili	86	88	70	43
Leca®, turve +10% kalkkikivi, Fe kuusibiohiili	97	97	96	81
Kuusibiohiili, hiekka	95	97	80	71
Leca®, kuusibiohiili	81	84	50	61
Puhdistuskyvyn prosentuaalinen parantuminen - Fe aktivoitu	11,3	9,4	27,2	47

Otsolahden vesinäytteiden ja eri biohiilten testitulosten perusteella suodatusmateriaalisekoitukseksi Otsolahden biohiilisuodattamoon soveltuisi esimerkiksi rautaoksidilla aktivoitu kuusibiohiili sekoitettuna hiekkaan. Biohiilen aktivoiminen rautaoksidilla tehostetaan haitta-aineiden poistumista hulevedestä, etenkin fosforin poistumista (taulukko 15). Kuusibiohiilen puhdistuskyvyt olivat VTT:n (Holt ym. 2017b) suodatusmateriaalitestissä biohiilistä parhaimmat. Taulukossa 16 on esitetty VTT:n suodatusmateriaalitestin tulokset koivu-

biohiilen ja kuusibiohiilen kohdalta. Lukema on haitta-aineen prosentuaalinen poistumismäärää hulevedestä ja punaisella merkitty lukema ilmoittaa haitta-aineen lisääntymisen hulevedessä.

TAULUKKO 16. Eri biohiilten puhdistuskyvyt prosentuaalisesti (Holt ym. 2017b)

VTT - suodatusmateriaalitesti	Kupari (Cu) %	Lyijy (Pb) %	Sinkki (Zn) %	Fosfori (P) %
Koivubiohiili	81,7	80	72,9	-69,4
Kuusibiohiili	96,2	96,2	93,7	88,0

Biohiilen sekoittamisella hiekkaan varmistetaan mahdollisimman pieni määrä orgaanista ainesta suodatuskerroksessa, koska orgaanisen aineksen hajotessa vapautuu typpeä ja fosforia suodatettavaan veteen (taulukko 7 orgaanisen kerroksen ja suodatinkerroksen rakennevaatimukset eri haitta-aineiden käsittelyssä). Suodatusrakenteen ikä myös pitenee, kun ei ole orgaanista ainesta hajoamassa ja tukkimassa biohiilen huokosia.

Taulukossa 17 on esitetty kahden eri biohiili ja hiekkasekoituksen puhdistustuloksien keskiarvoja ja niiden perusteella tehtyjä teoreettisesti laskettuja Otsolahden hulevesien haitta-aineiden puhdistustuloksia. Taulukossa on myös laskettu biohiilen rautaoksidilla aktivoimisen vaikutukset puhdistuskykyyn. VTT:n testissä ei testattu kokonaistypen ja kiintoaineen poistumia, jonka vuoksi ne on jätetty pois taulukosta. Suosituksia pintaveden laadun yleisiksi vertailuarvioiksi ei ole kaikista haitta-aineista saatavilla. Teoreettiset puhdistustulokset on laskettu kaavoilla 1,2 ja 3.

### Taulukon laskukaavat

- Haitta-aineen määrä suodatuksen jälkeen. Kaava 1.

$$x - \left( y * \frac{x}{100} \right) = \text{haitta - aineen määrä suodatuksen jälkeen} \quad (1)$$

x on haitta-aineen alkuperäinen lukema ja y on haitta-aineen prosentuaalinen vähentymä suodatuksen jälkeen.

- Prosentuaalinen haitta-aineen poistuma käsittelyn jälkeen. Kaava 2.

$$100 * \frac{(x-y)}{x} = \text{prosentuaalinen haitta} - \text{aineen poistuma käsittelyn jälkeen} \quad (2)$$

x on haitta-aineen alkuperäinen arvo ja y on haitta-aineen arvo käsittelyn jälkeen

- Rautaoksidilla (Fe) aktivointi. Puhdistuskyvyn prosentuaalinen parantuminen. Kaava 3.

$$\left(x * \frac{100}{y}\right) - 100 = \text{Puhdistuskyvyn prosentuaalinen parantuminen Fe aktivoinnilla} \quad (3)$$

x on Fe aktivoinnin puhdistuskyky prosentteina ja y on aktivoimattoman puhdistuskyky prosentteina

- Aktivoitun biohiilen vaikutus on laskettu kaavalla 1. kaavan x on aktivoimattoman biohiilen ja hiekan puhdistustulos, ja y on puhdistuskyvyn prosentuaalinen parantuminen Fe aktivoinnin jälkeen. Taulukossa 15 on Fe aktivoinnin prosentuaaliset vaikutukset puhdistuskykyyn. Fe aktivoitun biohiili ja hiekkasekoituksen prosentuaalinen puhdistuskyky on laskettu kaavalla 2.

TAULUKKO 17. Testituloksia biohiilisekoituksista ja Otsolahden vesinäytteistä lasketut teoreettiset puhdistuskyvyt kahdella eri suodatusmateriaali sekoituksella (Assmuth 2017; Holt ym. 2017a; Vahanen 2018a; Ympäristöhallinto 2014)

Testituloksia - haitta-aineen vähenemä prosentteina	Fosfori (P)	Kupari (Cu)	Lyijy (Pb)	Sinkki (Zn)	Kokonaistyyppi (N)	Kiintoaine (GF/C)
	%	%	%	%	%	%
VTT- Kuusibiohiili (10%) ja hiekka (90%)	71	95	97	80		
Vantaa Tikkurilantie - Koivubiohiili (38%) ja hiekka (62%)	76	80	90	98	76	74
Otsolahti vesinäyte - pohjoinen kaivo 3	Fosfori (P)	Kupari (Cu)	Lyijy (Pb)	Sinkki (Zn)	Kokonaistyyppi (N)	Kiintoaine (GF/C)
	mg/l	µg/l	µg/l	µg/l	mg/l	mg/l
Otsolahti 4.4.2018	0,45	65,8	<5,0	183	2,5	28,1

<b>Teoreettiset puhdistustulokset - testitulosten perusteella</b>	<b>mg/l</b>	<b>%</b>	<b>µg/l</b>	<b>%</b>	<b>µg/l</b>	<b>%</b>	<b>µg/l</b>	<b>%</b>	<b>mg/l</b>	<b>%</b>	<b>mg/l</b>	<b>%</b>
Kuusibiohiili (10%) ja hiekka (90%)	0,13	71	3,29	95	0,15	97	36,6	80				
Fe Kuusibiohiili (10%) ja hiekka (90%)	0,015	97	2,87	96	0,13	97	23	87				
Koivubiohiili (38%) ja hiekka (62%)	0,11	76	13,16	80	0,5	90	3,7	98	0,6	76	7,3	74
Fe Koivubiohiili (38%) ja hiekka (62%)	0,013	97	11,49	82	0,45	91	2,32	99				
<b>Suosituksset pintaveden laadun yleisiksi vertailuarvoiksi (OH 6/2014)</b>			7,8		7,2		3,1					

Vihreä - korkein puhdistuskyky ja  
keltainen heikoin puhdistuskyky

Lasketut puhdistustulokset ovat teoreettisia, joten ne ovat vain suuntaa antavia. Puhdistuskykyyn vaikuttaa oleellisesti biohiilen ominaisuudet ja suodatusmateriaalin sekoitussuhteen määrä. Sekoitussuhteen määrän tärkeys ja biohiilen ominaisuuden erot tulevat eri testien perusteella selkeästi esille. VTT:n testissä koivubiohiilen puhdistavat ominaisuudet olivat selkeästi heikommät kuin kuusibiohiilellä (taulukko 16), etenkin fosforin poiston kohdalla. Kuitenkin Vantaan Tikkurilantien koivubiohiili (38 %) ja hiekka (62 %) suodattamossa puhdistustulokset olivat lähes vastaavanlaiset kuin kuusibiohiili (10 %) ja hiekka (90 %) sekoituksella. Tuloksiin todennäköisesti on vaikuttanut koivubiohiilen tuotantoprosessi ja biohiilen määrä suodatusmateriaalisekoituksessa.

## 8 YHTEENVETO

Hulevesien paikallinen käsittely biosuodattamalla vähentää vesistöihin ja vedenpuhdistuslaitoksiin kohdistuvaa kuormitusta. Se, että biosuodatus toimisi oikeanlaisesti, tulisi se mitoitaa- ja rakennuttaa huolellisesti sekä huoltaa säännöllisesti. Suodatuskentällä on myös tarkoitus hidastaa valuntaa. Oikeanlaisten materiaalien valinnalla voidaan saada lisää ominaispinta-alaa suodatuskentälle. Yhtenä vaihtoehtona suodatusmateriaaliksi, jolla on korkea ominaispinta-ala, voidaan pitää biohiiltä. Biohiilellä on korkean ominaispinta-alansa ja ominaisuuksiensa myötä myös hyvä kyky sitoa eri haitta-aineita hulevesistä.

Biohiili kuitenkin on hyvin laaja käsitys. Biohiilen ominaisuuksiin vaikuttaa niin monet eri tekijät, kuten raaka-aine josta biohiili on tehty, pyrolyysiprosessin lämpötila ja kesto tai biohiilen valmistuksen jälkeinen ”aktivointi”. Biohiilen sisältämät ravinteet ja haitta-aineet ovat pääosin peräisin raaka-aineesta, josta biohiili on tehty. Suomalaiset biohiilentuottajat ovat yleisimmin valinneet raaka-aineekseen puun, koska sitä on helposti saatavilla ja se on riittävän homogeenista, jolloin tuotantoprosessia voidaan helposti ohjata (Kolehmainen 2018).

Eri tutkimuksissa on käynyt ilmi, että biohiili toimii yleispiirteisesti hyvin, hulevesistä havaittujen haitta-aineiden poistamisessa. Etenkin raskasmetallien ja typen poistossa. Joissain tapauksissa biohiili on toiminut ravinteita lisäävänä materiaalina, kuten esimerkiksi fosforia lisäävänä. Mutta kyseissä tapauksissa fosforia vapauttava ominaisuus on ollut kyseisen biohiilen raaka-aineesta ja tuotantoprosessista kiinni, koska tuotantoprosessi ja käytetty raaka-aine vaikuttavat merkittävästi biohiilen ominaisuuksiin.

Taajamissa rakennettujen pintojen lisääntyminen lisää myös hulevesien määrää entisestään sekä kasvattaa tulvariskiä kaupunkialueilla. Hulevesien laatu tulee myös ottaa huomioon, koska kaupungistumisen myötä haitta-aineiden määrät hulevesissä kasvavat ja haitta-aineiden vaikutukset hulevesien loppusijoituksessa myös kasvavat. Hulevesien määrän kasvassa perinteinen kunnallistekniikka (hulevesi- ja sekaviemäröinti) ei riitä käsittelemään jo syntyneitä hulevesiä, vaan niitä tulisi jo käsitellä syntypaikoillaan. Eri hallintamenetelmillä voidaan ehkäistä, puhdistaa ja ohjata hulevesiä niin, että niistä ei synny haittaa kaupunkialueella. Hulevesien laadun parantamisen ja määrän vähentämisen lisäksi hulevesirakenteet, kuten kosteikot, purot, lammikot sekä muut hallintamenetelmät tarjoavat mahdollisuudet viihtyvyyden lisääntymiseen kaupunkialueella erilaisten virkistysalueiden muodossa.

## LÄHTEET

- Arpiainen, V., Fagernäs, L., Hagner, M., Kemppainen, R., Kuoppala, E., Ranta, J., Tiilikkala, K. & Setälä, H. 2014. Hidaspyrolyysituotteiden hyödyntäminen ja tuotannon kannattavuus biohiili ja tisle [viitattu 6.3.2018]. Saatavissa: <http://www.vtt.fi/inf/pdf/technology/2014/T182.pdf>
- Assmuth, E. 2017. Performance of roadside filtration systems in the treatment of stormwater [viitattu 28.3.2018]. Saatavissa: [http://www.vtt.fi/sites/stormfilter/Documents/eng\\_2017\\_assmuth\\_eero.pdf](http://www.vtt.fi/sites/stormfilter/Documents/eng_2017_assmuth_eero.pdf)
- Auvinen, A. 2017. Tikkurilantien katuvesien puhdistus [viitattu 12.3.2018]. Saatavissa: [http://www.vhvsy.fi/files/upload\\_pdf/7340/9Auvinen\\_Tikkurilantie.pdf](http://www.vhvsy.fi/files/upload_pdf/7340/9Auvinen_Tikkurilantie.pdf)
- Brown, J. 2016. A Field Study of Biochar Amended Soils: Water Retention and Nutrient Removal from Stormwater Runoff [viitattu 10.3.2018]. Saatavissa: <http://biochar-us.org/sites/default/files/presentations/4.6.3%20Brown%2C%20Joseph.pdf>
- Espoo. 2012. Espoon kaupungin hulevesiohjelma [viitattu 17.3.2018]. Saatavissa: [https://www.espoo.fi/fi-FI/Asuminen\\_ja\\_ymparisto/Ymparisto\\_ja\\_luonto/Hulevedet\\_ojasta\\_allikkoon\(39396\)](https://www.espoo.fi/fi-FI/Asuminen_ja_ymparisto/Ymparisto_ja_luonto/Hulevedet_ojasta_allikkoon(39396))
- European biochar certificate. 2017. Guidelines for sustainable production of biochar [viitattu 17.2.2018]. Saatavissa: <http://www.european-biochar.org/biochar/media/doc/ebc-guidelines.pdf>
- Evira. 2016a. Eviran määräys kansallisesta lannoitevalmisteiden tyyppinimiluettelosta 18.03.2016 [viitattu 24.2.2018]. Saatavissa: [https://www.evira.fi/globalassets/kasvit/tuonti-ja-vienti/lannoitevalmisteet/tyyppinimiluettelo\\_konsolidoitu\\_31\\_3\\_2016.pdf](https://www.evira.fi/globalassets/kasvit/tuonti-ja-vienti/lannoitevalmisteet/tyyppinimiluettelo_konsolidoitu_31_3_2016.pdf)
- Evira. 2016b. Tuhkan käyttö lannoitteena [viitattu 26.2.2018]. Saatavissa: <https://www.evira.fi/kasvit/viljely-ja-tuotanto/lannoitevalmisteet/kierratysravinteet/tuhkan-kaytto-lannoitteena/>
- GTK. 2018. Maalajien luokitus [viitattu 19.3.2018]. Saatavissa: <http://weppi.gtk.fi/aineistot/mp-opas/maalajiluokitus2.htm>
- Haikarinen, I. 2017. Mikä on kationinvaihtokapasiteetti [viitattu 23.2.2018]. Saatavissa: [https://www.maajakotitalousnaiset.fi/sites/default/files/attachment/15.3.2017\\_iina\\_haikarinen\\_kationinvaihtokapasiteetti.pdf](https://www.maajakotitalousnaiset.fi/sites/default/files/attachment/15.3.2017_iina_haikarinen_kationinvaihtokapasiteetti.pdf)

- Holopainen, S., Inkiläinen, E., Kling, T., Korkealaakso, J., Krebs, G., Kuosa, H. & Loimula, K. 2016. Urban needs and best practices for enhanced stormwater management and quality [viitattu 15.2.2018]. Saatavissa: [http://www.vtt.fi/sites/stormfilter/Documents/D1.1\\_SOTA\\_Stormwater%20quality%20management.pdf](http://www.vtt.fi/sites/stormfilter/Documents/D1.1_SOTA_Stormwater%20quality%20management.pdf)
- Holt, E., Iitti, H., Korkealaakso, J., Hannele Kuosa, H., Loimula, K & Wendling, L. 2017a. Summary Report Performance of stormwater filtration systems StormFilter Material Testing [viitattu 28.3.2018]. Saatavissa: [http://www.vtt.fi/sites/stormfilter/Documents/VTT\\_R\\_05980\\_17.pdf](http://www.vtt.fi/sites/stormfilter/Documents/VTT_R_05980_17.pdf)
- Holt, E., Iitti, H., Korkealaakso, J., Hannele Kuosa, H., Loimula, K & Wendling, L. 2017b. Report on localized performance of bio- and mineral-based filtration components, based on laboratory tests [viitattu 28.3.2018]. Saatavissa: [http://www.vtt.fi/sites/stormfilter/Documents/VTT\\_R\\_01757\\_17\\_1708.pdf](http://www.vtt.fi/sites/stormfilter/Documents/VTT_R_01757_17_1708.pdf)
- Hovi, H. 2017. Havupuubiohiilen jälkivaikutuksia maaperän viljavuuteen ja nurmikasveihin suomen oloissa. Maisterivaiheen opinnäytetyö [viitattu 21.2.2018]. Saatavissa: <https://helda.helsinki.fi/handle/10138/181456>
- Hätinen, N., Setälä, H., Sillanpää, N. & Valtanen, M. 2010. Hulevesien imeyttäminen ja suodattaminen: haitta-aineet ja menetelmät [viitattu 10.2.2018]. Saatavissa: [https://tuhat.helsinki.fi/portal/fi/publications/hulevesien-imeyttam\(122caad8-937e-401a-b56d-db80049caee9\).html](https://tuhat.helsinki.fi/portal/fi/publications/hulevesien-imeyttam(122caad8-937e-401a-b56d-db80049caee9).html)
- Ilmastotyökalut. 2014. Hulevesien hallintarakenteet ja niiden kunnossapito [viitattu 31.3.2018]. Saatavissa: [http://ilmastotyokalut.fi/files/2014/07/3.2.Hulevesien-hallintarakenteet-ja-niiden-kunnossapito\\_ty%C3%B6kalu.pdf](http://ilmastotyokalut.fi/files/2014/07/3.2.Hulevesien-hallintarakenteet-ja-niiden-kunnossapito_ty%C3%B6kalu.pdf)
- Jindo, K., Mizumoto, Y., Sawada, M., Sanchez-Monedero, A & Sonoki, T. 2014. Physical and chemical characterizations of biochars derived from different agricultural residues [viitattu 20.2.2018]. Saatavissa: <https://www.biogeosciences-discuss.net/11/11727/2014/bgd-11-11727-2014.pdf>
- Jormola, J., Kasvio, P., Koskiahho, J. & Ulvi, T. 2016. Kosteikkojen ja biosuodatusalueiden toimivuus hulevesien käsittelyssä. HULE-hankkeen loppuraportti [viitattu 14.2.2018]. Saatavissa: <https://helda.helsinki.fi/handle/10138/160201>
- Kasvio, P. 2017. Hulevesikosteikko Lepolan asuinalueella Järvenpäässä [viitattu 31.3.2018]. Saatavissa: <http://www.ymparisto.fi/hulevedet>



- Kauppi, M. 2018. Re: Selvitystyö EuroHEK® Certaro –hiekanerottimesta opinnäytetyötä varten. Sähköpostiviesti. Vastaanottaja Kirjokivi, T. Lähetetty 12.3.2018
- Kettunen, R. & Saarinen 2014. Biohiili suomen maataloudessa [viitattu 20.2.2018]. Saatavissa: <http://rae.savonia.fi/ajankohtaista/101-kirjallisuuskooste-biohiilen-maatalouskayton-mahdollisuuksista-suomessa>
- Kokkila, M. 2014. Biopidätysrakenne kohdennetussa huleveden laadun hallinnassa. Opinnäytetyö [viitattu 12.2.2018]. Saatavissa: [https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/73506/Kokkila\\_Mervi.pdf?sequence=1](https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/73506/Kokkila_Mervi.pdf?sequence=1)
- Kolehmainen, I. 2018. Re: Kysymyksiä biohiilestä, selvitystä opinnäytetyötä varten. Sähköpostiviesti. Vastaanottaja Kirjokivi, T. Lähetetty 21.2.2018.
- Komulainen, E. 2012. Hulevesien biosuodatuksen soveltuvuus suomen ilmasto-oloihin. Diplomityö [viitattu 4.3.2018]. Saatavissa: <http://doczz.net/doc/7031651/hulevesien-bio-suodatuksen-soveltuvuus-suomen-ilmasto>
- Kotola, J., Nurminen, J. & Vakkilainen, P. 2005. Rakennetun ympäristön valumavedet ja niiden hallinta. [viitattu 13.2.2018]. Saatavissa: [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)
- Kuntaliitto. 2012. Hulevesiopas 2012. Opas [viitattu 15.2.2018]. Saatavissa: [http://shop.kunnat.net/product\\_details.php?p=2714](http://shop.kunnat.net/product_details.php?p=2714)
- Kuntaliitto. 2017. Hulevesioppaan päivitetty luvut lainsäädännön muutosten osalta [viitattu 16.3.2018]. Saatavissa: [http://shop.kunnat.net/product\\_details.php?p=3345](http://shop.kunnat.net/product_details.php?p=3345)
- Laitinen, A. 2015. Kolmivaiheisen pyrolyysin mallintaminen Maisterivaiheen opinnäytetyö [viitattu 16.2.2018]. Saatavissa: <https://jyx.jyu.fi/dspace/bitstream/handle/123456789/48787/URN:NBN:fi:ju-201602151576.pdf?sequence=1>
- Laki maankäyttö- ja rakennuslain muuttamisesta 682/2014
- Lehikoinen, E. 2015. Kadun vastavalmistuneiden huleveden biosuodatusalueiden toimivuus Vantaalla. Maisterivaiheen opinnäytetyö [viitattu 7.2.2018]. Saatavissa: <https://aalto-doc.aalto.fi/handle/123456789/16663>

- Leinonen, M. 2017. Huleveden hallinta liikennöidyillä alueilla tienvarren tienvarren suodatusrakenteiden avulla [viitattu 28.3.2018]. Saatavissa: [http://www.vtt.fi/sites/stormfilter/Documents/D5.1\\_WP5\\_AaltoMaster\\_thesis\\_Leinonen.pdf](http://www.vtt.fi/sites/stormfilter/Documents/D5.1_WP5_AaltoMaster_thesis_Leinonen.pdf)
- Lempinen, T. 2018. Re: Soittelin hiekanerottimista. Sähköpostiviesti. Vastaanottaja Kirjokivi, T. 13.3.2018.
- Maanmittauslaitos. 2018. Karttapaikka karttapalvelu [viitattu 19.3.2018]. Saatavissa: <https://asiointi.maanmittauslaitos.fi/karttapaikka/>
- Maaperän haitallisten aineiden pitoisuuksien kynnys- ja ohjeavot 26.03.2007. Suomen laki [viitattu 5.2.2018]. Saatavissa: <https://www.finlex.fi/data/sdliite/liite/5382.pdf>
- Muthanna, T. 2007. Bioretention as a Sustainable Stormwater Management Option in Cold Climates [viitattu 25.2.2018]. Saatavissa: <https://brage.bibsys.no/xmlui/handle/11250/242064>
- Myllylä, H. 2017. Biohiili biopidätysalueessa ja kantavassa kasvualustassa opinnäytetyö [viitattu 15.2.2018]. Saatavissa: <http://www.theseus.fi/handle/10024/134089>
- Paikkatietoikkuna. 2018. Karttapalvelu [viitattu 19.3.2018]. Saatavissa: <https://kartta.paikkatietoikkuna.fi/?lang=fi>
- Pajupojat. 2017. Biohiilen keskeisiä ominaisuuksia [viitattu 25.2.2018]. Saatavissa: [https://pajupojat.fi/wp-content/uploads/2017/02/biohiilen\\_keskeisia\\_ominaisuuksia.pdf](https://pajupojat.fi/wp-content/uploads/2017/02/biohiilen_keskeisia_ominaisuuksia.pdf)
- Pitkänen, S. & Sikanen, L. 2014. Hajautetut biojalostamot – lähellä resursseja kestävästi Hankkeen toimintaa kuvaavat infokortit [viitattu 5.2.2018]. Saatavissa: [www.forestenergy.org/openfile/551?PHPSESSID](http://www.forestenergy.org/openfile/551?PHPSESSID)
- Rakennustietosäätiö. 2017. RTS 17:27 Hulevesirakenteet. Opas [viitattu 5.2.2018]. Saatavissa: [https://www.rakennustieto.fi/material/attachments/5fIPeDhrH/EapGeFOfj/Hulevesirakenteet\\_Taitto\\_.pdf](https://www.rakennustieto.fi/material/attachments/5fIPeDhrH/EapGeFOfj/Hulevesirakenteet_Taitto_.pdf)
- Riikonen, A. 2017. Biohiili ja sen käyttömahdollisuudet viherrakentamisessa. Esiselvitys Metsätiet, Its Helsingin yliopisto [viitattu 24.2.2018]. Saatavissa: [http://intra.kaupunkitila-ohje.hel.fi/?wpfb\\_dl=853](http://intra.kaupunkitila-ohje.hel.fi/?wpfb_dl=853)
- Rissanen, J. 2018. Toimitusjohtaja. RPK-hiili Oy. Puhelinkeskustelu 14.2.2018

- Rizzo, G. 2015. Use of biochar geostructures for urban stormwater cleanup. Opinnäytetyö [viitattu 24.2.2018]. Saatavissa: <https://eprints.usq.edu.au/29161/>
- Sillanpää, N & Sänkiaho, L. 2012. Stormwater hankkeen loppuraportti. Taajamien hulevesihaasteiden ratkaisut ja liiketoimintamahdollisuudet [viitattu 5.2.2018]. Saatavissa: <https://aaltodoc.aalto.fi/handle/123456789/3639>
- Stenström, Y. 2017. Phosphorus and nitrogen removal in modified biochar filters [viitattu 12.3.2018]. Saatavissa: [http://www.w-program.nu/filer/exjobb/Ylva\\_Stenstr%C3%B6m.pdf](http://www.w-program.nu/filer/exjobb/Ylva_Stenstr%C3%B6m.pdf)
- Sterck, J. 2010. Biohiili. Kandidaatin tutkinnon opinnäytetyö [viitattu 14.2.2018]. Saatavissa: <http://www.doria.fi/handle/10024/61636>
- Suihko, M. 2016. Biofiltration for stormwater management in Finnish climate. Maisterivaiheen opinnäytetyö [viitattu 10.2.2018]. Saatavissa: <https://aaltodoc.aalto.fi/handle/123456789/23953>
- Suomen biohiilyhdistys. 2018. Biohiilen määritelmä [viitattu 14.2.2018]. Saatavissa: <http://fi.suomenbiohiili.info/maunlaumlritelmauml.html>
- Talotekniikka. 2017. Tampereen rautatietunneli pysyy kuivana [viitattu 31.3.2018]. Saatavissa: <https://talotekniikka-lehti.fi/tampereen-rautatietunneli-pysyy-kuivana/>
- Tiilikkala, K. 2015. Biohiilen merkitys kasvualustassa ”tulossa maanhoitoremontti” [viitattu 15.2.2018]. Saatavissa: <http://jukuri.luke.fi/handle/10024/531172>
- Tukes. 2016. REACH-asetus [viitattu 26.2.2018]. Saatavissa: <http://www.tukes.fi/fi/Toimialat/Kemikaalit-biosidit-ja-kasvinsuojeluaineet/Teollisuus--ja-kuluttajakemikaalit/REACH---asetus/>
- Tukiainen, S. 2018. Re: Kysymyksiä biohiilestä, selvitystä opinnäytetyötä varten. Sähköpostiviesti. Vastaanottaja Kirjokivi, T. Lähetetty 21.2.2018.
- Uponor. 2012. Uponor Hulevesikasetit ja tunnelit suunnittelu ja asennusohje. [viitattu 7.3.2018]. Saatavissa: <https://www.uponor.fi/tuotejarjestelmat/hulevesiputkistot/hulevesien-imeyttaminen>

- Uponor. 2012. Uponor-hulevesikasetit ja -tunnelit Suunnittelu- ja asennus ohje [viitattu 31.3.2018]. Saatavissa: <https://www.uponor.fi/tuotejarjestelmat/hulevesiputkistot/hulevesien-imeyttaminen>
- Vahanen. 2017. Otsolahden perustilaselvitys [viitattu 21.3.2018]. Saatavissa: [http://www.itamerihaaste.net/files/1886/ENV663\\_Otsolahden\\_perustilaselvitys\\_Es-poon\\_kaupunki\\_13.11.2017.pdf](http://www.itamerihaaste.net/files/1886/ENV663_Otsolahden_perustilaselvitys_Es-poon_kaupunki_13.11.2017.pdf)
- Vahanen. 2018a. Otsolahden vesinäytteiden tuloksia. Näytetuloksia
- Vahanen. 2018b. Periaatekuva Otsolahden suodattamosta. Luonnos
- Valtioneuvoston asetus maaperän pilaantuneisuuden ja puhdistustarpeen arvioinnista 214/2007 01.03.2007. Suomen laki [viitattu 26.2.2018]. Saatavissa: <http://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2007/20070214>
- Wavin Labko. 2015. Kaupin hulevesikasetit [viitattu 28.3.2018]. Saatavissa: <https://www.wavin.com/fi-fi/Ajankohtaista/Referenssit/Kaupin-alue-Tampere>
- Wavin labko. 2018. Q-Bic ja Q-BB – hulevesikasetit [viitattu 31.3.2018]. Saatavissa: <https://www.wavin.com/fi-fi/Ratkaisut/Hulevesien-hallinta/Viivastys-ja-imeytys/Q-Bic-ja-Q-BB-hulevesikasetit>
- Wilson, K. 2014. How biochar works in soil [viitattu 19.3.2018]. .Saatavissa: <https://www.biochar-journal.org/en/ct/32-How-biochar-works-in-soil>
- VTT. 2017. Engineered infiltration systems for urban stormwater quality and quantity management. Työpajan esitykset [viitattu 20.2.2018]. Saatavissa: [http://www.vtt.fi/sites/stormfilter/Documents/Stormfilter\\_presentations\\_14112017.pdf](http://www.vtt.fi/sites/stormfilter/Documents/Stormfilter_presentations_14112017.pdf)
- Vuori, E. 2017. Ihmeaine biohiili. Puutarha & kauppa. Nro 5/ [viitattu 15.2.2018]. Saatavissa: [http://energiatehokkaasti.fi/sites/energiatehokkaasti/files/puutarhakauppa\\_biohiili\\_5\\_2017.pdf](http://energiatehokkaasti.fi/sites/energiatehokkaasti/files/puutarhakauppa_biohiili_5_2017.pdf)
- Ympäristöhallinto. 2014. Pilaantuneen maa-alueen riskinarviointi ja kestävä riskinhallinta [viitattu 28.3.2018]. Saatavissa: [https://helda.helsinki.fi/bitstream/handle/10138/136564/OH\\_6\\_2014.pdf?sequence=1](https://helda.helsinki.fi/bitstream/handle/10138/136564/OH_6_2014.pdf?sequence=1)
- Ympäristöhallinto. 2018. Vesitilanne, roudan syvyys [viitattu 19.3.2018]. Saatavissa: [http://www.ymparisto.fi/fi-FI/Vesi/Vesitilanne\\_ ja\\_ennusteet/Roudan\\_syvyys](http://www.ymparisto.fi/fi-FI/Vesi/Vesitilanne_ ja_ennusteet/Roudan_syvyys)