



OULUN YLIOPISTO
UNIVERSITY of OULU

TEKNILLINEN TIEDEKUNTA

**PAJUKOSTEIKKOJEN KÄYTTÖ
VESIENPUHDISTUKSESSA**

Simo Hannula

YMPÄRISTÖTEKNIikka

Kandidaatintyö

Elokuu 2016



OULUN YLIOPISTO
UNIVERSITY of OULU

TEKNILLINEN TIEDEKUNTA

**PAJUKOSTEIKKOJEN KÄYTTÖ
VESIENPUHDISTUKSESSA**

Simo Hannula

Ohjaaja: Heini Postila

YMPÄRISTÖTEKNIikka

Kandidaatintyö

Elokuu 2016

TIIVISTELMÄ

OPINNÄYTETYÖSTÄ Oulun yliopisto Teknillinen tiedekunta

Koulutusohjelma (kandidaatintyö, diplomityö) Ympäristötekniikan koulutusohjelma		Pääaineopintojen ala (lisensiaatintyö)	
Tekijä Hannula, Simo		Työn ohjaaja yliopistolla Postila, Heini	
Työn nimi Pajukosteikkojen käyttö vesienpuhdistuksessa			
Opintosuunta	Työn laji Kandidaatintyö	Aika Elokuu 2016	Sivumäärä 24
Tiivistelmä <p>Kandidaatintyön tavoitteena oli tutkia eri pajulajien ominaisuuksia ja pajukosteikkojen hyödyntämistä vesienpuhdistuksessa. Työssä etsittiin kirjallisuudesta tietoa millaisiin eri tarkoituksiin pajukosteikkoja voidaan käyttää, ja kuinka pajua voidaan näihin tarkoituksiin hyödyntää. Näihin eri tarkoituksiin kuuluivat jätevedenpuhdistamoiden vesien jälkikasittely, varsinainen kotitalouksien jätevesien puhdistus, kaatopaikkojen, kaivosten sekä turvetuotantoalueiden valumavesien käsittely. Työssä on myös kappale pajujen ominaisuuksista, jossa käsiteltiin eri pajulajeja, niiden ominaisuuksia ja pajukosteikkojen hyödyntämisen historiaa. Työn lopuksi käytiin läpi pajukosteikoilta saatuja puhdistustuloksia.</p> <p>Työssä saatiin tietoa pajukosteikkojen rakenteista ja toimintamekanismeista. Yksittäisten pajukosteikkojen puhdistustuloksia ei voida suoraan yleistää kaikkialle, erilaisten olosuhteiden, lajikkeiden ja jätevesien koostumuksen vuoksi. Kuitenkin suoritettujen pajukosteikkojen testauksen lukumäärä ja yleisesti positiiviset tulokset antoivat positiivisen käsityksen tekniikan ja pajujen potentiaalista.</p>			
Muita tietoja			

ABSTRACT FOR THESIS

University of Oulu Faculty of Technology

Degree Programme (Bachelor's Thesis, Master's Thesis) Degree programme of environmental engineering		Major Subject (Licentiate Thesis)	
Author Hannula, Simo		Thesis Supervisor Postila, Heini	
Title of Thesis Use of willow tree wetlands in water treatment			
Major Subject	Type of Thesis Bachelor's thesis	Submission Date August 2016	Number of Pages 24
<p>Abstract</p> <p>The goal of this bachelor's thesis was to investigate the properties of different species of willow, and ways to use constructed wetlands planted with willow in water treatment. In this thesis information about willows, methods, uses and results from research were collected from literature, as much as possible. These uses include secondary treatment after traditional treatment in facilities, treatment of municipal wastewater from single households, treatment of minewater and runoff water from peat extraction areas, and treatment of landfill leachate. This thesis also contains a chapter about properties of willow, in which properties and differences between species of willow, how they could be utilized in water treatment and history of using willow in wastewater treatment were investigated. At the end of this thesis, results from different uses were compiled.</p> <p>One result of this thesis was the information about structure and mechanics of constructed wetlands. Results from only one separate willow tree wetland cannot be generalized everywhere, because of different conditions, species of willow and composition of wastewater. But great amount of research made and generally positive results gave positive image about the potential of using willow tree plantations in water treatment.</p>			
Additional Information			

SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ.....	
ABSTRACT.....	
SISÄLLYSLUETTELO.....	
1 Johdanto	5
2 Pajun ominaisuudet	7
3 Pajukosteikkojen käyttö erilaisiin vesienpuhdistustarkoituksiin.....	10
3.1 Yhdyskuntien jätevedenpuhdistamoiden jälkikäsittely	10
3.2 Pajukosteikko talousjätevesien varsinaisena käsittelynä.....	11
3.3 Kaatopaikkojen suoto vesien käsittely	12
3.4 Muu valumavesien käsittely.....	14
4 Pajukosteikkojen rakenne.....	16
5 Pajukosteikolta saatuja vedenpuhdistustuloksia.....	18
6 Yhteenveto ja johtopäätökset	20
7 Lähteet.....	21

1 JOHDANTO

Asutuksen jätevedenpuhdistus on välttämätön prosessi, jonka avulla ehkäistään luonnon vesistöjen rehevöitymistä, haitallisten yhdisteiden kertymistä ympäristöön ja tautien leviämistä. Jätevettä joudutaan käsittelemään myös erilaisten terveydelle riskialttiiden patogeenien hävittämiseksi, koska se sisältää paljon erilaisia kosteissa ja ravinteikkaissa olosuhteissa viihtyviä bakteereja, kuten esimerkiksi ihmisen suolistobakteereja (Wéry ym., 2009).

Jäteveden puhdistus koostuu fysikaalisesta, biologisesta ja kemiallisesta vaiheesta (Water environment federation, 1994), joista fysikaalista vaihetta lukuun ottamatta muut vaiheet voidaan korvata kosteikkokäsittelyllä (Kadlec ja Wallace, 2009). Lisäksi klooraukseen perustuva mikrobien eliminointi voidaan jättää väliin (Water environment federation, 1994), koska maaperässä patogeenit eivät aiheuta ihmisille harmia, kuten ne aiheuttaisivat vesistöissä. Jätevesiä hyödynnettäessä on kuitenkin suositeltavaa suorittaa perinteiset käsittelymenetelmät käytettävälle vedelle, koska jätevesi saattaa sisältää kosteikoille haitallista kiintoainetta ja happea vaativia yhdisteitä (Kadlec ja Wallace, 2009). Yleensä mikrobien kasvatuksen sijaan veteen lienneet ravinteet voidaan hyödyntää pajujen kasvatuksessa, jolloin puhdistuvan veden lisäksi saadaan tuotettua runsaasti biomassaa (Börjesson ja Berndes, 2006). Näin jätevedenpuhdistamon kustannuksia saadaan laskettua, ja lisäksi tuotettu biomassa voidaan hyödyntää edelleen energiantuotannossa.

Typpi ja fosfori ovat kasveille elintärkeitä ravinteita ja kasvua rajoittavia tekijöitä, jonka vuoksi niitä käytetäänkin esimerkiksi maataloudessa yleisinä lannoitteina. Kasvit tarvitsevat myös vettä, joten typpeä ja fosforia sisältävän jäteveden vaikutuksia on alettu tutkia biomassan tuotannossa. Viljan kasvatuksessa jäteveden käyttö on kuitenkin elintarvikelaissa kielletty patogeenien vuoksi (Börjesson ja Berndes, 2006).

Paju on kosteissa olosuhteissa viihtyvä nopeakasvuinen, puuvartinen kasvi, jota on jo aiemmin hyödynnetty biomassan tuotannossa. Lähiaikoina on alettu tehdä tutkimuksia pajun käytöstä esimerkiksi jätevedenpuhdistamoiden jätevesien puhdistuksessa, jolloin puhdistamon jätevesi johdetaan puhdistamon läheisyyteen istutetuille pajuvyöhykkeille, jossa paju hyödyntää jäteveden sisältämää typpeä ja fosforia kasvaakseen (Börjesson ja

Berndes, 2006). Tällöin säästetään sekä jätevedenpuhdistuskuluissa, että biomassan tuotannon lannoitekustannuksissa.

Jätevesien käsittelyyn tarkoitetut kosteikot toteutetaan käytännössä kolmella toisistaan poikkeavalla menetelmällä (Kadlec ja Wallace, 2009):

1. FSW (Free water surface) eli luonnollista suoaluetta muistuttava kosteikko,, jossa vesi virtaa ainakin osittain maan pinnalla. Näitä käytetään usein impulsseina kerääntyvän jäteveden, kuten myrskyvesien keräämiseen ja käsittelyyn.
2. HSSF (Horizontal subsurface flow) eli maanpinnan alaisella, vaakatasossa tapahtuvalla menetelmällä. Vesi johdetaan vettä läpäisemättömällä kalvolla vuoratun maa-alueen läpi kasvin juurien tasolla.
3. VF (Vertical flow) eli pystysuoralla kastelulla, jossa maan pinnalle levitettävän jäteveden annetaan kulkea maakerrosten ja kasvien juurten läpi pystysuunnassa ja vesi kerätään pohjalta.

Pajukosteikkoja hyödynnettäessä kastelu tapahtuu yleensä joko pintakasteluna (Rosenkranz, 2013), vaakatasoisella pinnan alaisella kastelulla (Brix ja Arias, 2005) tai näiden yhdistelmällä (Amofah ym., 2012). Pinnanalainen kastelu ei levitä patogeeneja aerosolien mukana, eikä edistä hyttysten lisääntymistä avoimen kosteikon lailla (Kadlec ja Wallace, 2009), jonka vuoksi se on hyvä valinta ihmisasutuksen välittömään läheisyyteen

Tässä kandintyössä selvitetään jäteveden puhdistamista pajukosteikkojen avulla olemassa olevan kirjallisuuden avulla. Työssä esitellään erilaisia tilanteita, joissa pajua on käytetty jätevesien puhdistukseen, sekä pajukosteikoilta saatuja puhdistustuloksia.

2 PAJUN OMINAISUUDET

Pajut ovat puuvartisia, puiksi, pensaiksi, ja varvuiksi luokiteltavia kasveja, joista useat lajit menestyvät hyvin viileissä ja kosteissa olosuhteissa (Mäkinen ym. (toim), 1994). Pajut lisääntyvät hyönteis- ja tuulipölytyksellä (Vuokko ym. (toim), 1996) ja ovat kaksikotisia kasveja, eli emi- ja hedekukinnot sijaitsevat eri yksilöissä (Väre ym. (toim), 2005). Suomessa pajulajeja on noin 20, jonka lisäksi erilaisia lajien risteymiä tavataan huomattavan suuria määriä pajun luontaisen risteytymistäipumuksen vuoksi. Tämän lisäksi risteytyneet kasvit ovat usein fertiilejä, joka on risteytyskokeissa mahdollistanut jopa kymmenen lajin perimää sisältävien kasvien tuottamisen. Luonnossa risteytymistä kuitenkin rajoittaa eri lajien poikkeavat kukkimisajat, mutta paikallisista maantieteellisistä poikkeavuuksista johtuen risteymiä pääsee usein syntymään myös luonnossa. Pajukasvit ovat usein myös hyvin sitkeitä. Esimerkiksi raita selviää hyvin lyjy-, nikkeli- ja kuparisulattamoiden läheisyydessä päästöistä huolimatta. (Vuokko ym. (toim), 1996)

Ruotsissa haluttiin 70-luvun öljykriisin jälkeen löytää mahdollisimman tehokas kasvi biomassan tuotantoon. Pajut valittiin tarkemman tutkimuksen kohteeksi, koska niiden on todettu tuottavan biomassaa hyvin tehokkaasti (Sirén 1983, Elowson 1999 mukaan). Pajua voidaan kasvattaa erittäin tiheissä, hyvin valoa keräävässä riveissä, ja niistä on onnistuttu jalostamaan hyvin pakkasta ja tauteja kestäviä yksilöitä. Varsinkin *Salix viminalis* (koripaju) ja *Salix dasyclados* (vannepaju) todettiin Ruotsissa tutkimuksen arvoiseksi lajeiksi (Elowson 1999). Suomelle vierasperäiset vesi-, kori- ja vannepajut eivät kuitenkaan menestyneet Suomessa toivotulla tavalla. Tämä johtuu ainakin siitä, että Suomen ilmasto on Ruotsin ilmasto ankarampi. Lisäksi Suomessa pajua kasvatetaan usein kostealla turvepohjaisella maalla toisin kuin Ruotsissa, jossa pajua kasvatetaan usein ravinteikkaassa kivennäismaassa. Suomen oloihin soveltuivatkin paremmin *Salix myrsinifolia* (mustuvapaju), *Salix phylicifolia* (kiiltopaju) ja *Salix pentandra* (halava). (Pohjonen, 2015)

Suomessa pajun käyttämistä biomassan tuotantoon on tutkittu vuodesta 1973 lähtien ja lupaavimmaksi kotimaiseksi lajikkeeksi todettiin *Salix myrsinifolia*. Vuonna 1991 Jyskyn

tilalla toteutetussa kasvatuskokeessa *Salix myrsinifolia* ja *Salix phylicifolia* lajikkeista muodostui viljelytilan mukaan nimetty viljelylajike *Salix Jysky*, jossa on sekaisin kumpaakin lajia olevia lajikkeita. (Pohjonen, 2015)

Salix myrsinifolia eli mustuvapaju on alkukesästä kukkiva, yleisesti Etelä- ja Keski-Suomessa kosteammilla alueilla tavattava noin 5-metriseksi kasvava pensas. Mustuvapajun on todettu risteytyvän ainakin kiilto-, letto-, tuhka- ja tunturipajujen kanssa (Rikkinen, 2010). Lajin on todettu sisältävän suuret määrät fenoleja, etenkin särkylääkkeenä käytettävälle salisyylihapolle sukua olevaa salikortiinia. Salikorttiinien talteenotolla voitaisiin pajukosteikoista hyötyä myös lääketeollisuudessa. (Pohjonen, 2015) Jäteveden puhdistuksessa käytetyistä pajuista salikortiineja ei välttämättä voitaisi hyödyntää, koska yhdyskuntajätteen sisältämien patogeeneiden leviämisestä ei ole vielä kunnolla tutkimustuloksia (Börjesson ja Berndes, 2006). Pajuja ravinnokseen käyttävät eläimet kuten jänikset, porot ja hirvet karttavat vahvasti fenoli- ja salikortiinipitoisia lajikkeita, joten mustuvapaju on tämänkin vuoksi hyvä valinta yhdistettyyn biomassan tuotantoon ja jäteveden puhdistukseen (Pohjonen, 2015).

Pajun kasvatus aloitetaan istuttamalla noin 20 cm mittaisia pistokkaita loppukevästä/alkukesästä. Pistokkaiden juurtuminen on nopeaa ja ne alkavat muutaman viikon päästä kasvaa. Pajut voivat saavuttaa 2-3 m pituuden ensimmäisen vuoden aikana. Toisen vuoden aikana pajut kehittävät hyvin valoa keräävän latvuston, jonka jälkeen biomassan tuotanto pääsee kunnolla käyntiin. 3-5 vuoden jälkeen biomassa on valmis talteen otettavaksi, jonka jälkeen uudet versot kasvavat nopeasti aiempien puiden maahan jätetyistä juurakoista. Noin 25 vuoden jälkeen tulisi kuitenkin harkita uusien kasvien istutusta, koska biomassan tuotanto on saattanut heiketä muun muassa sienitautien vuoksi. (Elowson 1999)

Paju kasvattaa tiheän, monivuotisen juurakon. Täten tiheään istutetulla pajukosteikolla ravinteiden ja mineraalien talteenotto maasta on tehokasta. Ravinteiden otto alkaa aikaisesta keväästä ja jatkuu myöhäiseen syksyyn. (Elowson 1999)

Vaikka paju vaatii menestyäkseen muun muassa typpeä ja fosforia, liiallisella typen määrällä on huomattu olevan negatiivisia vaikutuksia pajun pakkasenkestävyyteen

(Piispa ym., 2009). Vaikka runsas lannoitus vaikuttaa positiivisesti biomassan tuotantoon kasvukauden aikana, pitkällä aikavälillä pakkasvauriot kuitenkin laskevat tuottavuutta. Virossa tehdyissä tutkimuksissa huomattiin jääkiteiden muodostumista katalysoivien bakteerien menestyvän huomattavasti paremmin typellä, kaliumilla ja fosforilla lannoitetuissa pajuissa, joiden pakkasen aiheuttamaa vaurioitumista bakteerit edesauttoivat. (Cambours ym., 2005)

3 PAJUKOSTEIKKOJEN KÄYTTÖ ERILAISIIIN VESIENPUHDISTUSTARKOITUKSIIN

3.1 Yhdyskuntien jätevedenpuhdistamoiden jälkikäsittely

Asuinalueet tuottavat suuret määrät paljon eloperäistä materiaalia ja ravinteita sisältävää jätevettä. Puhdistuslaitokseen päätyneet jätevesi puhdistetaan erilaisilla biologisilla, kemiallisilla ja mekaanisilla menetelmillä. Ensimmäisessä vaiheessa jätevesi kulkee ritilöiden läpi, jotka keräävät suurimmat kiinteät partikkelit, kuten puun, muovin, kankaan ja muun vastaavan jätteen. Hiekka, sora ja muu tiheä kiinteä aines kerrostuu altaan pohjalle, josta ne voidaan hävittää kaatopaikalle (Water environment federation, 1994). Seuraavaksi hienomman aineksen annetaan kerrostua sedimentointialtaassa pohjalle, jolloin se yhdessä pinnalta kerätyn rasvan kanssa voidaan edelleen johtaa lietteen jälkikäsittelyyn, kuten mädätykseen tai kuivaukseen. Sedimentointialtaasta vesi voidaan edelleen johtaa mikro-organismien avulla tapahtuvaan biologiseen käsittelyyn. Tämä biologinen ja sitä seuraava kemiallinen käsittely voidaan kuitenkin korvata johtamalla vesi pajukosteikoille (Water environment federation, 1994), jolloin veden sisältämä typpi ja fosfori hyödynnetään pajujen kasvatuksessa. Käyttämällä jätevedenpuhdistamolta tulevaa vettä, voidaan säästää sekä lannoite- että puhdistuskustannuksissa.

Jätevedenpuhdistamoiden jätevesien jälkikäsittely pajujen avulla toteutetaan johtamalla vesi puhdistamon läheisyyteen istutetulle pajualueelle, jossa vesi levitetään alueelle sopivien kastelujärjestelmien avulla. Tällöin pajut hyödyntävät veden sisältämät ravinteet kasvaakseen ja tuottaakseen biomassaa, joka voidaan hyödyntää biopolttoaineiden valmistukseen asiaan sopivassa laitoksessa. Laitoksesta saatu typpi- ja fosforipitoinen tuhka taas voidaan palauttaa pajupellolle, jossa se toimii uudelleen lannoitteena (Börjesson ja Berndes, 2006).

Pajujen hyödyntämistä jätevesien lisäpuhdistuksessa/jälkikäsittelyssä on ensimmäisen kerran kokeiltu Pohjois-Ruotsissa 90-luvulla, jolloin haluttiin vähentää asutuksen jätevesistä aiheutuvia typpi- ja fosforipäästöjä (Perttu 1999, Börjesson ja Berndes 2006 mukaan). Vuonna 2005 samaa menetelmää hyödynnettiin jo viidellä eri asuinalueella

sekä useammassa muussa Euroopan valtiossa, kuten Puolassa, Tanskassa ja Virossa (Börjesson ja Berndes 2006).

Veden käsittely voidaan toteuttaa eri tavoin. Jätevettä voidaan käyttää joko pelkästään kesäisin kasvukauden aikana, tai jätevesi tämän lisäksi voidaan pumpata talvisin varastoaltaisiin kesän aikana käytettäväksi. Lisäksi eri menetelmät voivat poiketa esimerkiksi kastelutavoiltaan. Vesi voidaan johtaa pajualueelle oja myöten, käyttää tiputus- tai sprinklerikastelua, tai kasvattaa pajuja virtauksen varrella sijaitsevilla puskurivyöhykkeillä. (Börjesson ja Berndes 2006)

Esimerkiksi Ruotsin Enköpingissä jätevedenpuhdistamon lietettä kuivaamalla saatu vesi yhdessä muun jäteveden kanssa johdetaan 76 ha laajuiselle pajupellolle, jota kastellaan noin 120 päivän laajuisen kasvukauden ajan. Kastelussa käytettävästä 200 000 m³ määrästä jätevettä voidaan tällä menetelmällä poistaa noin 30 000 kg typpeä ja 1000 kg fosforia vuodessa, joka on noin 25 % jätevedenpuhdistamon käsiteltävästä tpeestä ja fosforista (Aronsson ja Dimitriou, 2003)

Typen ja fosforin lisäksi pajut kykenevät puhdistamaan jätevedestä myös raskasmetalleja, kuten sinkkiä, kadmiumia, arsenikkia ja lyijyä, joista kahta jälkimmäistä hieman heikommin tuloksin. Vaikka arsenikki ja lyijy ovatkin suhteellisen immobiileja, pajut kykenevät kuitenkin keräämään niitä juuriinsa. Juurakot poistamalla saadaan siis poistettua maaperästä lyijyä ja arsenikkia, mutta biomassan tuotannon kannalta tämä on epäkäytännöllistä, koska juurien poistaminen hidastaa tulevan biomassan tuotantoa. Sinkki ja kadmium sen sijaan päätyvät kasvin lehtiin ja oksiin, jolloin vuosittaisella talteenotolla maaperän sinkki- ja kadmiumpitoisuuksia on mahdollista laskea. (Dickinson ym., 2005; Dickinson ja Pulford, 2005, Tlusto's ym., 2007 mukaan)

3.2 Pajukosteikko talousjätevesien varsinaisena käsittelynä

Pajukosteikkoja voidaan hyödyntää talousjätevesien puhdistamisessa myös pienemmässä mittakaavassa alueilla, joissa asutus on harvaa eikä varsinaisen jätevedenpuhdistamon perustaminen ole taloudellisesti järkevää. Tällaisia alueita ovat harvaan asuttujen alueiden lisäksi myös kesämökkialueet, joilla vuotuinen jäteveden kertymä jää yleensä

kohtalaisen pieneksi. Aiemmin tällaisilla alueilla on hyödynnetty imeytyskaivoja tai jätevesien laskemista vesistöön, mutta kiristyneet ympäristömääräykset ovat muun muassa Tanskassa saaneet viranomaiset tutkimaan muita vaihtoehtoja. Tällaisia ovat esimerkiksi haihdutusta hyödyntävät menetelmät, joihin pajukosteikkojen hyödyntäminenkin kuuluu (Brix ja Arias, 2005). Menetelmän etuina pidetään ympäristöhyötyjen lisäksi matalia kustannuksia. Suurehkon, keskimäärin 8000 € alkuinvestoinnin jälkeen ylläpitokustannukset jäävät normaaleja jätevesimaksuja selvästi matalammiksi, jonka seurauksena systeemi maksaa itsensä nopeasti takaisin (Brix ja Arias, 2011).

Vastaavia kokeiluja on tehty muillakin soveltuvilla kasveilla, kuten järviruo'olla (*Phragmites australis*) ja osmankäämillä (*Typha latifolia*). Viileissä olosuhteissa paju on kuitenkin edellä mainittuja parempi vaihtoehto (Wu ym., 2011), jonka lisäksi paju tuottaa suuret määrät energiantuotantoon hyödynnettäväksi kelpavaa biomassaa (Brix ja Arias, 2005). Esteettisestä näkökulmasta paju on ainakin useimpien kyselyyn osallistuneiden kiinalaisten mielestä vesistökasveja miellyttävämpi vaihtoehto (Wu ym., 2011).

3.3 Kaatopaikkojen suotovesien käsittely

Kaatopaikoilla maa-aines sisältää jätteistä johtuen runsaasti haitallisia yhdisteitä, kuten esimerkiksi suoloja, metalleja, orgaanisia yhdisteitä, halogenoituja orgaanisia yhdisteitä sekä muita, jätteen lajista riippuvia yhdisteitä. (The World Resource Foundation 1996, Williams 2005 mukaan). Nämä yhdisteet voivat huuhtoutua sadeveden mukana, kaatopaikan suotovenä, ympäristöön. Suotoveden koostumus on riippuvainen jätteen tyypistä (kotitalousjäte, teollisuuden jätteet, maatalousjätteet), jätettä sisältävän alueen iästä (kuinka pitkälle jätteiden hajoaminen on edennyt) ja ympäristön olosuhteista (lämpötila ja kosteus). Kotitalousjätteen läpi kulkenut suotovesi sisältää suuret määrät orgaanisia yhdisteitä, kun taas teollisuus- ja ongelmajätteet sisältävät enemmän metalleja. (Williams, 2005). Bakteerien toiminnasta johtuva maatumisen tapahtuu nopeammin kosteissa olosuhteissa (Kjeldsen ym., 2002), minkä lisäksi kemiallisten reaktioiden nopeudet ja hapen liukoisuus veteen kasvavat lämpimämissä olosuhteissa (Kadlec ja Reddy, 2001).

Jätteen hajoaminen kaatopaikoilla voidaan pääasiallisesti jakaa neljään eri vaiheeseen (Christensen ja Kjeldsen 1995, Kjeldsen ym. 2002 mukaan):

1. Aerobinen vaihe, jossa vesi syntyy lähinnä kasan tiivistyessä. Bakteerit kuluttavat aineenvaihdunnallaan hapen, muuttaen sen hiilidioksidiksi (Barlaz ja Ham, 1993, Kjeldsen ym., 2002 mukaan).
2. Anaerobinen happovaihe, jossa jätekasan pH nousee kertyvien happojen vuoksi. Hapot taas edistävät jätteen sisältämien yhdisteiden ja metallien liukenemistä suotoveen (Kjeldsen ym., 2002).
3. Ensimmäinen metanogeeninen vaihe, jossa metallien liukoisuus laskee pH:n noustessa (Christensen ja Kjeldsen 1989; Barlaz ym., 1989; Kjeldsen ym., 2002 mukaan)
4. Vakaa metanogeeninen vaihe, jossa metaanin tuotanto saavuttaa maksiminsa ja tämä jälkeen heikkenee orgaanisten lähtöaineiden kuluessa loppuun (Kjeldsen ym., 2002).

Koska kaatopaikoille lisätään jatkuvasti jätettä, syntyy eri-ikäisiä, eri tasoille hajonneita kerroksia. Tästä johtuen suotovesi voi sisältää happovaiheessa liuenneita metalleja, mutta myös orgaanisia yhdisteitä, kuten karboksyylihappoja ja asetaattia.

Euroopassa kaatopaikkojen suotovedet johdettiin vielä 2000-luvun alkupuolelle asti hyvin usein käsittelemättömänä viemäriin (Williams, 2005), mutta on olemassa myös fysiokemiallisia ja biologisia käsittelytapoja, joiden lisäksi suotovesi voidaan kierrättää uudelleen maa-aineksen läpi tai maa-aines voidaan levittää laajemmalle alalle (Waste management paper 26B 1995, Williams, 2005 mukaan).

Pajuja voidaan hyödyntää kaatopaikkojen suotovesien käsittelyssä joko istuttamalla pajuja maisemoidun jätekasan päälle, jolloin pajujen edesauttama evapotranspiraatio pitää suotoveden muodostumisen matalana, tai vaihtoehtoisesti johtamalla suotovesi kaatopaikan läheisyyteen istutetulle pajukolle, jossa kastelu voidaan toteuttaa tavanomaisin menetelmin. (Dimitriou ym., 2006)

Kaatopaikkavesissä esiintyvät raskasmetallit kuten kadmium, sinkki, lyijy ja elohopea ovat eliöille erittäin myrkyllisiä, ja suurina pitoisuuksina ne aiheuttavat pajussa soluvaurioita sekä vähentävät kasvin lehtivihreän määrää. 500 mg/l pitoisuuksien ei vielä huomattu aiheuttavan näkyviä vaurioita, mutta 1000 mg/l riitti näillä kaikilla heikentämään kasvien kuntoa (Ali ym., 2003). Toisaalta pajuilla voidaan myös poistaa raskasmetalleja, esim. sinkkiä, kadmiumia, lyijyä ja arsenikkia (Tlustos ym., 2006). Kaatopaikkojen suotovesien klooripitoisuus vaihteli tutkimuksen mukaan noin 660 – 4700 mg/l välillä (Williams, 2005), joka vastaa korkeimmillaan noin 130 mmol/l pitoisuutta. Suuri klooripitoisuus voi vaikuttaa negatiivisesti pajujen hyvinvointiin. Kokeissa huomattiin evapotranspiraation heikkenevän huomattavasti klooripitoisuuden noustessa. 200 mmol/l kloridikonsentraatio aiheutti selvää vahinkoa, ja 422 mmol/l riitti tappamaan kasvit. (Stephens, ym., 2000)

3.4 Muu valumavesien käsittely

Vaikka kosteikkoja käytetäänkin pääasiassa yhdyskuntien ja pienemmässä mittakaavassa kotitalouksien jätevesien ja kaatopaikkojen suotovesien käsittelyyn, voidaan menetelmiä hyödyntää myös muihin jätevesityyppeihin. Näihin lukeutuvat muun muassa eläintalouden, teollisuuden, kaivosteollisuuden, kaupunkien sadevalumien, turvetuotannon sekä maatalouden valumien käsittely (Kadlec ja Wallace, 2009).

Kaivosteollisuudessa haluttiin 1980-luvulla etsiä kustannustehokkaampia vaihtoehtoja perinteiselle happamien jätevesien käsittelylle. Hapan, metalleja liuottanut jätevesi oli siihen mennessä käsitelty happamuuden laskemiseksi soodabriketeillä, sammutetulla kalkilla, kalkkikivellä tai natrium hydroksidilla. Sen jälkeen se oli johdettu kosteikolle, jossa kasvatettiin osmankäämiä, jonka lisäksi maaperään sijoitettiin kompostoitua orgaanista materiaalia sekä kalkkia happamuuden laskemiseksi (Wieder, 1989). Pajulla on saatu lupaavia tuloksia metalleja sisältävien jätevesien käsittelyssä (Dickinson ja Pulford, Tlustos ym. 2007 mukaan), ja Itä-Suomen yliopiston tutkimuksen mukaan pajua voidaankin käyttää kaivosvesien puhdistukseen (Itä-Suomen yliopisto, 2014).

Turvetuotannon kuivatusvedet voidaan johtaa pajukosteikolle käsiteltäviksi, kuten Raatteikonsuolla Vapo Oyn 2012 aloittamassa projektissa. Vesi kuljetetaan ja levitetään pajukkoon reiätetyn putken avulla, josta pajut käsittelevät typen ja fosforin ja haihduttavat veden, jonka lisäksi kiintoaine kerääntyy maahan. Lopulta läpi kulkenut, puhtaampi vesi päätyy läheiseen vesistöön. (VTT ym., 2013)

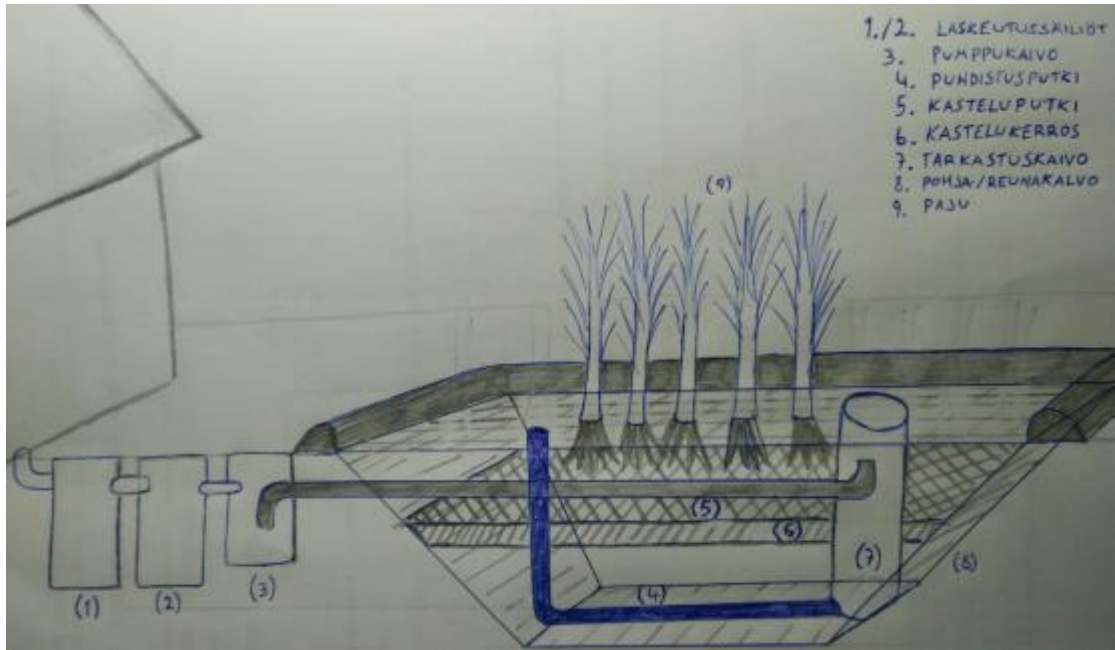
Maatalouden jätevedet sisältävät pelloilta huuhtoutuvia lannoitteita, jonka lisäksi liha- ja maitotiloilla vesi sisältää myös navettojen, karsinoiden, kanaloiden ja muiden vastaavien sisätilojen hyvin typpipitoisia pesuvesiä (Kadlec ja Wallace, 2009). Ympäristöhyötyjen lisäksi pajujen käyttö maatalouden jätevesien puhdistukseen voi olla viljelijälle taloudellisesti kannattavaa, jos pajun tuottama biomassa myydään energiantuotantoon. (Rosenqvist, 1997)

Ruokateollisuuden jätevesien käsittelyssä pajuja ei tiettävästi ole vielä käytetty. Kuitenkin ruokateollisuuden jätevesien typpi- ja fosfaattitasoja sekä biologista että kemiallista hapenkulutusta on kyetty madaltamaan selkeästi, hyödyntäen järviruoko- ja sarakosteikkoja, joille vesi on johdettu maanpinnan alaisella, vaakatasoisella kastelulla (Vrhovšek ym., 1996). Todennäköisesti pajujen käyttö sopisi myös tähän tarkoitukseen.

4 PAJUKOSTEIKKOJEN RAKENNE

Kotitalouksien yhteyteen rakennettava pajusysteemi voidaan toteuttaa joko suljetulla, tai avoimella tavalla. Suljettu tapa voidaan toteuttaa muun muassa kaivamalla pajujen alle ja sivuille muovisuojat, jotka estävät jätevettä läpäisemästä maata ja päätyvästä siten esimerkiksi pohjaveteen liian herkästi vettä läpäisevässä maaperässä. Vastaavasti avointa systeemiä voidaan käyttää maaperän läpäisykyvyn ollessa tarpeeksi alhainen, tai pohjaveden pinnan ollessa matalalla. Pajuja istutetaan noin 150–300 m² alalle asukkaiden lukumäärästä riippuen, yleensä yhden tai kahden eri talouden yhteyteen. (Brix ja arias, 2011)

Tässä pajusysteemiversiossa taloutta kohden tarvitaan lisäksi laskeutussäiliöt, jonka pohjalle suurin osa kiinteästä orgaanisesta aineesta laskeutuu (kuva 1). Säiliö toimii myös talven aikaisena varastona jätevedelle, koska tällöin vettä ei välttämättä voida johtaa pajusysteemiin. Säiliöstä vesi johdetaan maanalaisia putkia pitkin pumpun avulla pajun juurten yläpuolelle, jonka lisäksi juurten alapuolelle voidaan asentaa poistoputki vuosien aikana suolaa keränneen veden poistamiseksi. Vettä voi päästä kertymään liaksi, jos vuotuiset sademäärät ylittävät suunnittelussa hyödynnetyn edellisten vuosien keskiarvon. (Brix ja Arias, 2005) Kylmemmissä olosuhteissa esimerkiksi sahanpurusta koostuva eristyskerros on tarpeellinen putkien jäätyksen estämiseksi. Silloin myös kerroksen alla vesi voi pysyä +6 °C lämpötilassa, jolloin pajun juuret kykenevät vielä keräämään typpeä (Choi ym., 2008, Wu ym., 2011 mukaan).



Kuva 1. Kotitalouden jätevesien käsittely (muokattuna Gregsen ym., 2003, Brix ja Arias 2011 mukaan)

Suurempien jätevesimäärien käsittelyssä pajut istutetaan yleensä kaksoisriveihin, jolloin kasteluputket voidaan sijoittaa suojaan rivien keskelle maanpinnan tasolle (Larsson ym., 2003), ja sato voidaan korjata mekaanisesti rivien ulkopuolelta (Melin ym., 2004). Esimerkiksi Ruotsin Enköpingsissä vesi kerätään väliaikaisesti varastoaltaisiin ennen pelloille johtamista (Larsson ym., 2003). Tiputus- ja sprinklerimenetelmien (Mirck ym., 2005) lisäksi kastelu voidaan toteuttaa myös ojakastelulla, jolloin pajut kasvatetaan noin parin metrin välein kaivettujen kasteluojien välissä (Perttu ja Kowalik, 1997).

Pajuja voidaan hyödyntää puskurivyöhykkeinä pienemmässä mittakaavassa myös esimerkiksi mautilojen tai muiden jätevettä tuottavien laitosten läheisyydessä madaltamaan läheisten vesistöjen typpikuormitusta. Vesistön ja sitä kuormittavan pisteen väliin istutetaan yksi tai useampia vähintään 5 metristä kaistaletta esimerkiksi pajua, jolloin puskurivyöhykkeen kasvit kykenevät hyödyntämään veden mukana tulevan typen ja fosforin, täten madaltaen vesistön vastaanottamaa kuormaa (Perttu ja Kowalik, 1997).

5 PAJUKOSTEIKOLTA SAATUJA VEDENPUHDISTUSTULOKSIA

Pajukosteikoilta saadut puhdistustulokset ovat olleet positiivisia käsittelyn alhaisiin kustannuksiin nähden. Yleensä puhdistuskokeissa on mitattu ainakin typpi- ja fosforitasot, sekä biohajoavan orgaanisen aineksen määrä (Melin ym., 2004). Koska kaatopaikkojen suotovesi, kotitalouksien jätevesi sekä puhdistamoiden jätevesi eroavat toisistaan koostumukseltaan, on näille tehty erikseen kokeita.

Kågerödin jätevedenpuhdistamolla Etelä-Ruotsissa käsitellään noin 1500 henkilön jätevedet ja läheisen maitojauhetehtaan päästöt, jotka varsinaisen käsittelyn jälkeen johdetaan pajukkoon toissijaiseen loppukäsittelyyn. Kokeet aloitettiin 1997 vuonna 11 hehtaarin suuruisella pajukolla, jonne vuosien 1997 ja 2004 välillä johdettiin keskimäärin 72 kg typpeä/ha ja 10 kg fosforia/ha vuodessa. (Melin ym., 2004) Seitsemän vuoden tarkastelun aikana jäteveden typpipitoisuus (N) oli laskenut pajukosteikon vaikutuksen myötä 79 %, ammoniumpitoisuus (NH₄) 92 %, nitraattipitoisuus (NO₃) 76 %, fosforipitoisuus (P) 11 % ja biohajoavan orgaanisen aineksen (BOD) pitoisuus 55 % (taulukko 1) (Melin, ym., 2004).

	N (mg/l)	NH ₄ (mg/l)	NO ₃ (mg/l)	P (mg/l)	BOD (mg/l)
1997	8,2	2,6	5,0	0,053	2,9
2004	1,7	0,21	1,2	0,047	1,3
Muutos (%)	79	92	76	11	55

Taulukko 1. Kågerödin puhdistustuloksia. 1997 vuonna tulokset ovat jätevedenpuhdistamolta ulos tulevia pitoisuuksia ilman kosteikkoa. Vuoden 2004 tulokset ovat jätevedenpuhdistamolta pajukosteikon jälkeen mitattuja ulos virtaavan veden pitoisuuksia. (muokattuna Melin, ym., 2004 mukaan)

Puolassa tehdyissä kokeissa mitattiin yhdeksän eri kotitalouden jätevesien typpi- ja fosforimäärää, joista typpeä oli keskimäärin 20 kg ja fosforia 3,2 kg vuotta kohden. Pajut kykenivät poistamaan keskimäärin noin 70 % tästä typestä ja 95 % fosforista. (Obarska-Pempkowiak ja Kolecka, 2007)

Ljubljanan yliopiston tekemissä kokeissa mitattiin kaatopaikan suotovesiä vuosina 2004 – 2006, jolloin kuukausittainen suotoveden valuma oli keskimäärin 400 m³. Suotovedestä mitattiin useiden eri ravinteiden, raskasmetallien ja yhdisteiden pitoisuudet pajukosteikkoa ennen ja kosteikon läpäisyn jälkeen. Kloridi-ionien konsentraatio jätevedessä oli noin 960 mg/l, ammonium-ionien 327 mg/l, typen 400 mg/l, natrium-ionien 600 mg/l, kalium-ionien 600mg/l ja fosforin 2,4 mg/l. Klooripitoisuus vastaa konsentraatiota 27 mmol/l, joka jää hyvin kauas pajuille haitallisesta 200 mmol/l pitoisuudesta. Kosteikkokäsittelyn jälkeen kloridi-ioneista oli poistunut noin 17 %, ammonium-ioneista 42 %, typestä 35 %, natrium-ioneista 20 %, kalium-ioneista 15 %, magnesium-ioneista 18 % ja fosforista 38 %. Suurista suolakonsentraatioista huolimatta kasteluvesi ei aikaansaanut viljelymaan liiallista suolaantumista. (Zupancic-Justin ja Zupancic, 2009)

Turvetuotantoalueen valumavesiä käsittelevällä Raatteikonsuolla pajukosteikko onnistui pidättämään typestä ja fosforista noin 56 % ja kiintoaineesta 80 %. Tämän lisäksi 52 % kosteikkoon pumpatusta vedestä joko haihtui, imeytyi maaperään tai tuli pajujen hyödyntämäksi. (Forestenergy2020, 2015)

6 YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET

Pajukosteikkoja on menestyksekkäästi onnistuttu hyödyntämään useisiin eri jätevesityyppeihin, joihin lukeutuvat muun muassa kaatopaikkojen suotovedet, yksittäisten, viemäriverkon ulkopuolisten asuntojen ja suurempien puhdistamoiden jätevedet, sekä maatilojen, kaivosten ja turvetuotantoalueiden valumavedet. Nopeakasvuisuutensa vuoksi paju soveltuu erinomaisesti biomassan tuotantoon, jolloin normaalisti vesistöjä kuormittavat ja rehevöittävät yhdisteet, kuten typpi ja fosfori voidaan käyttää hyödyksi energiantuotantoon. Luonnollisen nopeakasvuisuutensa ja sitkeytensä lisäksi pajun vahva taipumus risteytyä tekee siitä houkuttelevan ja helposti jalostettavan hyötykasvin, jota voitaneen kehittää esimerkiksi Suomessa entistä paremmin pakkasta kestäväään suuntaan.

7 LÄHTEET

Ali, M.B., Vajpayee, P., Tripathi, R.D., Rai, U.N., Singh, S.N., Singh, S.P., 2003. Phytoremediation of Lead, Nickel, and Copper by *Salix acmophylla* Boiss.: Role of Antioxidant Enzymes and Antioxidant Substances. *Environmental contamination and toxicology*, 70, 462-469.

Amofah, L.R., Mattson, J. ja Hedström, A., 2012. Willow bed fertigated with domestic wastewater to recover nutrients in subarctic climates. *Ecological Engineering*, 47, 174–181

Brigs, H. ja Arias, C., 2005. Danish Guidelines for Small-Scale Constructed Wetland System for Onsite Treatment of Domestic Sewage. *Water Science & Technology*, 51, 1–9

Brigs, H. ja Arias, C., 2011. Use of willows in evapotranspirative systems for onsite wastewater management – theory and experiences from Denmark. „STREPOW“, International Workshop, Andrevlje-Novi Sad, Serbia 23-24 maaliskuuta 2011

Börjesson, P. ja Berndes, G., 2006. The prospects of willow plantations for wastewater treatment in Sweden. *Biomass & bioenergy*, 30, 428–438

Cambours, M.A., Nejad, P., Granhall, U. ja Ramstedt, M., 2005. Frost-related dieback of willows. Comparison of epiphytically and endophytically isolated bacteria from different *Salix* clones, with emphasis on ice nucleation activity, pathogenic properties and seasonal variation. *Biomass and bioenergy*, 28, 15-27

Dimitriou, I. ja Aronsson, P., 2003. Wastewater phytoremediation treatment systems in Sweden using short rotation willow coppice. *Short rotation crops for bioenergy*, New Zealand 2003

Dimitriou, I., Aronsson, P. ja Weih, M., 2006. Stress tolerance of five willow clones after irrigation with different amounts of landfill leachate. *Bioresource technology*, 97, 150-157.

Elowson, S., 1999. Willow as a vegetation filter for cleaning of polluted drainage water from agricultural land. *Biomass and bioenergy*, 16, 281-290

Forestenergy 2020, 2015. Pajun kilpailukyky energiakäytössä paranee, jos sitä voidaan hyödyntää myös erilaisten vesien puhdistukseen. Saatavissa: <http://www.forestenergy2020.org/fi/uutiskirjeet/uutiskirje-1-15/paju/:icmsmode/clear>

Itä-Suomen yliopisto, 2014. Willow trees are cost-efficient cleaners of contaminated soil. Saatavissa: www.sciencedaily.com/releases/2014/12/141212084952.htm

Kadlec, R.H. ja Reddy, K.R., 2001. Temperature effects in treatment wetlands. *Water environment research*, 73, 543-557

Kadlec, Wallace, 2009. *Treatment wetlands*. 2.p. Boca Raton: Taylor & Francis group.

Kjeldsen, P., Barlaz, M.A., Rooker, A.P., Baun, A., Ledin, A. ja Christensen, T.H., 2002. Present and long-term composition of MSW landfill leachate: A review. *Critical reviews in environmental science and technology*, 32:4, 297-3362002

Larsson, S., Weibull, S., Cuignet, C., Clause, P., Jacobsson, I., Aronsson, P., Perttu, K., Rosenquist, H., Dawson, M., Wilson, F., Backlund, A., Mavrogianopoulos, G., Riddelblack, D., Carlander, A., Stenstroem, T. A., Hasselgren, K., 2003. Short-rotation Willow Biomass Plantations Irrigated and Fertilised with Wastewaters. *Sustainable Urban Renewal and Wastewater Treatment*, 37, 12

Melin, G., Aronsson, P., Hasselgren, K., 2004. Recycling of wastewater and sludge in salix plantations. Lund, Ruotsi: Lindoff communications.

Mirck, J., Isebrands, J.G., Verwijst, T. ja Ledin, S., 2005. Development of short-rotation willow coppice systems for environmental purposes in Sweden. *Biomass and bioenergy*, 28, 219-228

Mäkinen, Y., Laine, U. ja Kalela, A., 1994. Pohjolan kasvit 1. Helsinki: Tammi.

Obarska-Pempkowiak, H. Ja Koleccka, K., 2007. Experiences of *salix viminalis* application to water and sewage treatment. *Ecohydrology & hydrobiology*, 7, 235-241

Perttu, K.L. ja Kowalik, P.J., 1997. *Salix* vegetation filters for purification of waters and soils. *Biomass and bioenergy*, 12, 9-19

Piispa, M., Piispa, R., Saarinen, J., Korhonen T-T. ja Savela, M., 2009. Pajunviljelyopas. Suomen energiapaju Oy.

Rikkinen, J., 2010. Puut ja pensaat Suomen luonnossa. Helsinki: Otava.

Rosenkranz, T., 2013. Phytoremediation of landfill leachate by irrigation to willow short-rotation coppice. Diplomityö. Swedish university of agricultural sciences.

Rosenqvist, H., Aronsson, P., Hasselgren, K. ja Perttu, K., 1997. Economics of using municipal wastewater irrigation of willow coppice crops. *Biomass and bioenergy*, 12, 1-8

Stephens, W., Tyrrel, S.F. ja Tiberghien, J.-E., 2000. Irrigating short rotation coppice with landfill leachate: constraints to productivity due to chloride. *Bioresource technology*, 75, 227-229

Tlustořs, P., Száková, J., Vyslouřilová, M., Pavlíková, D., Weger, J. ja Javorská, H., 2007. Variation in the uptake of arsenic, cadmium, lead, and zinc by different species of willows *Salix* spp. grown in contaminated soils. *Central european journal of biology*, 2, 254-275

VTT, Itä-Suomen yliopisto, Äänekosken ammatillisen koulutuksen kuntayhtymä, 2013. Energiapajun kestävä tuotanto ja käyttö. Saatavissa: www.forestenergy2020.org/openfile/184

Vrhovsêk, D., Kukanja, V. ja Bulk, C., 1996. Constructed wetland (CW) for industrial waste water treatment. *Water research*, 30, 2287-2292

Vuokko, S.(toim.), 1996. Suomen luonto – kasvit. 6.p. Porvoo: WSOY.

Väre, H. ja Laine, J., 2014. Suokasvio. Porvoo: Metsäkustannus Oy.

Väre, H., Ulvinen, T., Vilpa, E. Ja Kalleinen, L., 2005. Oulun kasvit – Piimäperältä Pilpasuolle. Oulu: Oulun seudun ympäristövirasto.

Water environment federation, 1996. Clean water for today: what is wastewater treatment? Saatavissa: <http://www.nj.gov/dep/seeds/docs/CWT.pdf>

Wéry, N., Monteil, C., Pourcher, A-M. Ja Godon, J-J., 2009. Human specific fecal bacteria in wastewater treatment plant effluents. *Water research*, 44, 1873-1883

Williams, P.T., 2005. Waste treatment and disposal. Second edition. The Atrium, Southern Gate, Chichester, West Sussex PO19 8SQ, England: John Wiley & Sons Ltd.

Wu, S., Austin, D., Liu, L. Ja Dong, R., 2011. Performance of integrated household constructed wetland for domestic wastewater treatment in rural areas. *Ecological Engineering*, 37, 948-954

Zupancic-Justin, M. Ja Zupancic, M., 2009. Combined purification and reuse of landfill leachate by constructed wetland and irrigation of grass and willows. *Desalination*, 246, 157-168