



TAMPEREEN  
AMMATTIKORKEAKOULU

# PAJUPUHDISTAMO KIINTEISTÖJEN JÄTEVESIRATKAISUNA

Hannu Onkamo

Opinnäytetyö  
Huhtikuu 2016  
Talotekniikan koulutusohjelma  
LVI-tekniikka



## TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu  
Talotekniikan koulutusohjelma  
LVI-tekniikka

ONKAMO, HANNU:  
Pajupuhdistamo kiinteistöjen jätevesiratkaisuna

Opinnäytetyö 56 sivua  
Huhtikuu 2016

---

Tämä opinnäytetyö tehtiin toimeksiantona Insinööritoimisto Leo Maaskola Oy:lle. Työn tavoitteena oli tutkia suljetun pajupuhdistamon tehokkuutta jätevesien puhdistamisessa jätevesiasetuksen 209/2011 vaatimusten mukaisesti ja esittää tietoja järjestelmän toteuttamisesta. Työssä vertailtiin suljetun pajupuhdistamon ja muiden jätevesiratkaisujen puhdistustehokkuuksia, ylläpitoa ja kustannuksia erityisesti kannattavuusnäkökulmasta. Lisäksi työssä käsiteltiin pajun soveltuvuutta energiantuotantoon.

Suljettu pajupuhdistamo on Tanskassa vuonna 1996 kehitetty juurakkopuhdistamo, jossa kaikki jätevedet haihdutetaan vesitiiviissä altaassa pajujen sitomiskykyä hyödyntäen. Tanskassa on rakennettu yli 4000 suljettua pajupuhdistamoa, kun taas Suomessa niitä on rakennettu vuodesta 2011 lähtien viisi kappaletta Inkoon seudulla. Suomessa on tutkittu jonkin verran avoimia pajupuhdistamoita ja energiapajuviljelmää jätevesien puhdistamisessa jo 80-luvulta asti ja niiden tehokkuus on todettu hyväksi. Tanskassa suoritettujen paju- ja maaperäanalyysien perusteella suljettu pajupuhdistamo täyttää Suomen jätevesiasetustakin huomattavasti tiukemmat puhdistusvaatimukset. Suomessa suljetun pajupuhdistamon tehokkuutta ei ole kyetty mittaamaan, koska puhdistamosta ei ole ulosvirtausta, eikä näyteanalyysille ole saatu rahoitusta.

VTT:n suorittamien polttokokeiden perusteella pajuhake vastaa ominaisuuksiltaan metsähaketta, ja se soveltuu seospolttoaineeksi kaukolämmöntuotantoon tai CHP-laitosten yhdistettyyn sähkön- ja lämmöntuotantoon. Suomessa rakennetut suljetut pajupuhdistamot ovat kuitenkin pinta-alaltaan vielä niin pieniä, että energiantuotanto ei niillä ole kannattavaa, vaan bioenergiaa tuotetaan hehtaariuokan energiapajuviljelmillä. Näitä pajuviljelmää voidaan hyödyntää erilaisten jätevesien käsittelyssä, jolloin saadaan yhdistettyä vesien puhdistuminen, suuremmat satomäärät ja alentuneet lannoitekustannukset.

Jätevesiratkaisujen vertailu osoitti, että suljettu pajupuhdistamo on varteenotettava vaihtoehto kaikkien jätevesien käsittelylle puhdistustehokkuuden, ympäristönsuojelun, positiivisen energiataseen ja edullisen ylläpidon kannalta. Suljetun pajupuhdistamon kannattavuutta heikentää tilantarve ja kertainvestointi, joka on yhdelle taloudelle noin 12 500 euroa, mutta keskitetyn pajupuhdistamon rakentaminen tulee edullisemmaksi taloutta kohti. Lisäksi pajupuhdistamon yli 50 vuoden elinkaaren aikana on mahdollista saavuttaa merkittäviä säästöjä käyttökustannuksissa.

---

Asiasanat: paju, jätevesiasetus, bioenergia, fotosynteesi, phytoremediaatio

## ABSTRACT

Tampereen ammattikorkeakoulu  
Tampere University of Applied Sciences  
Degree Programme in Building Services Engineering  
HVAC Services

ONKAMO, HANNU:  
Willow Facility as a Wastewater Treatment Solution

Bachelor's thesis 56 pages  
April 2016

---

This thesis was commissioned by Insinööritoimisto Leo Maaskola Oy. The goal of this paper was to survey the efficiency of a Zero Discharge Willow Facility in wastewater treatment according to the requirements of Finnish sewage regulation 209/2011 and to present information on how to implement the system. In this paper the willow facility and other wastewater treatment systems were compared in terms of treatment efficiency, maintenance and expenses from the point of view of cost-efficiency. Willow's suitability for energy production was also covered.

Zero Discharge Willow Facility is a root zone treatment system developed in Denmark in 1996 where all wastewater is evaporated in a waterproof basin by utilizing the absorptivity of willows. Over 4000 willow facilities have been built in Denmark while in Finland five of these systems have been built in the Inkoo region since 2011. In Finland some open willow systems and willow fields have been surveyed in wastewater treatment since the 1980's and they were found efficient. According to the willow and soil analyses conducted in Denmark, the zero discharge willow facility fulfills significantly higher wastewater treatment demands than required in the Finnish sewage regulation. It has not been possible to measure the efficiency of a zero discharge willow facility in Finland previously because there is no outflow from the facility and there has been no finance for analysing samples.

The furnace tests performed by VTT Technical Research Centre of Finland show that the properties of a willow wood chip are similar to other wood chips and that willow can be burned in a fuel mix in order to produce energy in district heating systems or in combined heat and power (CHP) plants. However, the surface areas of zero discharge willow facilities built in Finland are so small that energy production with them is not profitable, and thus bioenergy is produced with hectare-size willow fields. These willow fields can be utilised in treating different kinds of wastewaters which results in cleaner waters, higher willow yields and in reduced fertilizer costs.

The comparison of different wastewater treatment systems indicated that the zero discharge willow facility is a potential alternative for treating all wastewaters in terms of treatment efficiency, environmental protection, positive energy balance and low operating costs. The profitability of a willow facility is lowered by space requirement and one-time investment which is around 12 500 euros for a single household, but a joint willow system is cheaper to build per household. Additionally, during the over 50 year life cycle of a willow facility, it is possible to achieve significant savings in operating costs.

---

Key words: willow, sewage regulation, bioenergy, photosynthesis, phytoremediation

## SISÄLLYS

1	JOHDANTO.....	1
2	JÄTEVEDEN KÄSITTELYÄ OHJAAVA LAINSÄÄDÄNTÖ.....	2
2.1	Jätevesiasetus .....	2
2.2	Vesihuoltolaki .....	4
2.3	Ympäristönsuojelulaki .....	4
2.4	Maankäyttö- ja rakennuslaki.....	5
2.5	Terveystieteiden laissa.....	5
2.6	Jätelaki .....	5
3	TALOUSJÄTEVEDEN KOOSTUMUS JA KUORMITUSLUVUT.....	6
4	KOSTEIKKOPUHDISTAMOT .....	8
4.1	Juurakkopuhdistamot.....	8
4.2	Pajupuhdistamot.....	10
4.2.1	Suljettu pajupuhdistamo.....	15
4.2.2	Avoin pajupuhdistamo .....	17
4.2.3	Pajusuodattamo .....	18
4.2.4	Energiapajuviljelmä erilaisten jätevesien ja lietteiden käsittelijänä .....	21
5	PAJUPUHDISTAMON SUUNNITTELU JA MITOITUS .....	25
6	PAJUPUHDISTAMON PERUSTAMINEN JA YLLÄPITO .....	29
6.1	Pajulajikkeet ja niiden ominaisuudet .....	30
6.2	Tuholaiset ja taudit.....	31
6.3	Pajuviljelmän uusiminen ja puhdistamon lopetus .....	31
7	PAJUPUHDISTAMON JA ENERGIAPAJUVILJELMÄN EROT .....	32
8	PAJUN SOVELTUVUUS ENERGIANTUOTANTOON .....	34
8.1	Bioenergiantuotanto pajuilla.....	34
8.2	Pajun poltto-ominaisuudet .....	36
8.3	Tuhkat ja niiden käsittely.....	37
9	PAJUPUHDISTAMON VERTAILU MUIHIN JÄTEVESIRATKAISUIHIN.....	39
9.1	Jätevesiratkaisujen ylläpito .....	40
9.2	Puhdistustehokkuudet .....	41
9.3	Kustannukset ja avustukset.....	42
10	JOHTOPÄÄTÖKSET .....	44
	LÄHTEET.....	46

## LYHENTEET JA TERMIT

Haja-asutusalue	Asemakaava-alueen ulkopuolinen alue
Harmaa vesi	Pesu-, siivous- ja keittiövesi
Musta vesi	WC-jätevesi
Prosessivesi	Vesihuoltolaitoksella esikäsitelty, ravinteita sisältävä jätevesi
Vesihuoltolaitos	Laitos, joka toimittaa talousvettä tai vastaanottaa jätevettä yli 10 m <sup>3</sup> vuorokaudessa ja palvelee yli 50 henkilöä. Jättevettä käsittelevää laitosta kutsutaan myös jätevedenpuhdistamoksi.
Nitrifikaatio	Ammonium-typen hapettuminen nitraatiksi. Nitrifikaatio ei vielä poista typpeä, mutta ehkäisee kuitenkin vesistöjen hapenkulutusta ja vesieliöihin kohdistuvaa vaaraa.
Kemiallinen saostus	Jäteveden fosforin poisto muuttamalla se kiinteään muotoon, jolloin se laskeutuu muun kiinteän aineen mukana. Saostuskemikaaleina voidaan käyttää raudan tai alumiinin yhdisteitä, esimerkiksi polyalumiinikloridia.
BHK <sub>7</sub>	Jätevedessä olevan orgaanisen aineen biologisen hajotuksen aiheuttama hapenkulutuksen määrä seitsemän vuorokauden aikana (engl. BOD <sub>7</sub> - Biological Oxygen Demand).
KHK	Kemiallisten reaktioiden aiheuttama hapenkulutuksen määrä (engl. COD - Chemical Oxygen Demand).
VTT	Valtion teknillinen tutkimuslaitos
MTT	Maa- ja elintarviketalouden tutkimuslaitos

## 1 JOHDANTO

Haja-asutusalueiden jätevesien sisältämä fosfori, typpi ja orgaaninen aines ovat maatalouden ohella merkittäviä tekijöitä vesistöjen rehevöitymiselle. Asuinkiinteistöissä käsitellyt jätevedet kuormittavat ympäristöä suhteellisesti enemmän verrattuna vesihuoltolaitosten prosessivesiin ja pohjavesialueilla sijaitsevat kiinteistöt heikentävät vedenlaatua, jos jäteveden käsittely laiminlyödään. Jätevesiasetuksella 209/2011 pyritään tehostamaan talousjätevesien käsittelyä viemäriverkostojen ulkopuolisilla alueilla (Ympäristöministeriö, 2015, s.9-10).

Tämän opinnäytetyön tilaaja on Insinööritoimisto Leo Maaskola Oy. Työtä lähdettiin tekemään, koska tällä hetkellä jäteveden pajupuhdistamoihin liittyviä tutkimuksia ja toteutuksia on Suomessa vähän. Tavoitteena on selvittää, onko suljettu pajupuhdistamo kannattava investointi muihin jätevesiratkaisuihin verrattuna puhdistustehokkuuden, kustannusten ja ylläpidon kannalta. Työssä esitetään tietoa suljetun pajupuhdistamon suunnittelusta, perustamisesta ja ylläpidosta. Lisäksi työssä käsitellään energiapajujelmän haihdutustehokkuuden hyödyntämistä erilaisten jätevesien ja lietteiden käsittelyssä sekä pajuhakkeen soveltuvuutta lämmitysenergian tuotantoon.

Lähdeaineisto koostuu tutkimuksista, ohjeista ja haastatteluista. Tutkimusongelmana on suljetun pajupuhdistamon puhdistustehokkuuden arviointi. Suljetusta pajupuhdistamosta ei ole ulosvirtausta, joten puhdistustehon mittaaminen perinteisin menetelmin ei ole mahdollista (Suomen ympäristökeskus, 2014). Kaikki jätevedet haihdutetaan pajujen avulla vesitiiviissä altaassa, ja koska jätevesi sijaitsee altaan pohjalla paineen alaisena, niin tyhjennysputkesta otettava näyte ei antaisi luotettavaa mittaustulosta. Paju- ja maaperänäytteiden analyyseille ei myös ole saatu rahoitusta (Pohjonen, 2016). Tällä hetkellä suljetun pajupuhdistamon tehokkuutta voidaan arvioida Tanskassa tehtyjen tutkimusten ja avoimen rakenteen pajupuhdistamoilla suoritetujen mittausten perusteella.

Tämä opinnäytetyö tarjoaa tietoa haja-asutusalueiden jätevesien käsittelystä uudistuneen jätevesiasetuksen vaatimusten mukaisesti ja esittelee suljetun pajupuhdistamon, joka on varteenotettava vaihtoehto kaikkien jätevesien käsittelylle. Työ palvelee vesihuollon suunnittelijoita, urakoitsijoita ja jätevesiratkaisuista kiinnostuneita.

## 2 JÄTEVEDEN KÄSITTELYÄ OHJAAVA LAINSÄÄDÄNTÖ

Haja-asutusalueen jätevesiasioihin vaikuttavia lakeja, asetuksia ja määräyksiä on Suomessa useita. Nämä säädökset koskevat jätevesijärjestelmien rakentamista, kunnossapitoa, vesistöjen suojelua ja ympäristölle haitallisten päästöjen alentamista. Tässä luvussa on esitetty oleellimmat haja-asutusalueen jäteveden käsittelyä koskevat säädökset.

Jäteveden käsittelyä koskevien lakien ja asetusten keskeisin asia on, että suurin vastuu jätevesiasioista on kiinteistön omistajalla. Suomen vuonna 2000 uudistettu perustuslaki korostaa, että yksilöllä on vastuu ympäristöasioista erityisesti haja-asutusalueilla. Pykälän 20 mukaan ”vastuu luonnosta ja sen monimuotoisuudesta, ympäristöstä ja kulttuuri-perinnöstä kuuluu kaikille” (Suomen perustuslaki 731/1999). Jätevesi ei siis saa heikentää pinta- ja pohjavesien laatua sekä aiheuttaa haittaa ympäristölle.

Euroopan parlamentin ja neuvoston vuonna 2000 annetulla direktiivillä yhteisön vesipolitiikan puitteista on yritetty parantaa pinta- ja pohjavesien laatua Euroopan unionin valtioissa vuoteen 2015 mennessä (Vesipuitedirektiivi 2000/60/EY). Direktiivin raameissa pysyminen vaatii jäteveden käsittelyn kehittämistä uusissa ja vanhoissa kiinteistöissä. Direktiiviä tukee laki vesien- ja merenhoidon järjestämisestä (1299/2004).

### 2.1 Jätevesiasetus

Haja-asutusalueiden jätevesiasetus 209/2011, eli valtioneuvoston asetus talousjätevesien käsittelystä viemäriverkostojen ulkopuolisilla alueilla, tuli voimaan vuonna 2004 ja sen tarkoituksena on vähentää talousjätevesien päästöjen päätymistä ympäristöön sekä suojella vesistöjä ja pohjavesialueita. Jätevesiasetusta noudatetaan jätevesijärjestelmien rakentamisessa, jätevedenkäsittelyssä ja viemäroinnissä haja-asutusalueella, jossa ei ole mahdollisuutta liittyä kunnalliseen viemäriverkkoon (Valtioneuvoston asetus 209/2011).

Maaliskuussa 2015 valtioneuvosto hyväksyi siirtymäajan pidentämisen 15.3.2018 asti jätevesijärjestelmien parannustoimenpiteille. Huhtikuussa 2016 ympäristöministeriö teki uuden lakiesityksen, jonka tavoitteena on kohtuullistaa sääntelyä ja jätevesiremonttien aikataulua (Rakentaja.fi, 2015). Käsittelyn lakiesitystä myöhemmin tässä luvussa.

Jätevesiasetuksen mukaan kuntien määrittämällä pilaantumisherkillä alueilla talousjätevedet on puhdistettava siten, että kuormitus vähenee orgaaniselle aineelle 90 %, kokonaisfosforille 85 % ja kokonaistypelle 40 % verrattuna kohteen kuormitusluvun avulla määritettyyn käsittelemättömän talousjäteveden päästöihin. Erikseen määritetyillä lievennetyillä alueilla vähimmäisvaatimukset puhdistustasolle ovat vastaavasti 80 %, 70 % ja 30 %. Lievennettyä jätevesien puhdistusvaatimusta voidaan käyttää vain tietyissä kiinteistöissä ympäristönsuojelulain mukaan. Kunnat voivat määritellä puhdistusvaatimusten tason (Valtioneuvoston asetus 209/2011).

Kunnallisen viemäriverkoston ulkopuolella sijaitsevien kiinteistöjen tulee tehdä jätevesijärjestelmistään selvitys, jolla voidaan arvioida jäteveden ympäristökuormitus. Selvitys on tehtävä asukkaan tai omistajan iästä riippumatta ja vaikka kiinteistöllä olisi vain kuivakäymälä. Selvitys tulee säilyttää kiinteistöllä ja pyydettyäessä esittää viranomaiselle. Asetuksessa määritellään myös jätevesijärjestelmän suunnittelu, rakentaminen sekä käyttö- ja huolto-ohjeet. Jätevesijärjestelmään tulee suunnitella tarpeelliset varo- ja hälytyslaitteet (Valtioneuvoston asetus 209/2011).

Huhtikuussa 2016 ympäristöministeriö ehdotti lievennyksiä jätevesiasetukseen, joka koskee ennen vuotta 2004 rakennettuja asuinkiinteistöjä. Asetuksen muutoksen ja lausunnolla olevan lainmuutoksen on tarkoitus tulla voimaan 1.1.2017. Vesistöjen ja pohjavesialueiden lähellä sijaitsevien kiinteistöjen jätevesijärjestelmät tulisi kunnostaa ensisijaisesti kuntien määräysten ja aikataulun mukaisesti. Noin 200 kuntaa on jo määritellyt alueilleen vaadittavan puhdistustason ja aikataulun vaatimusten täyttämiseksi. Määräyksiä ei vielä ole annettu 100 kunnassa, joissa vesistöjen lähellä sijaitsevien kiinteistöjen tulisi täyttää puhdistusvaatimukset 31.10.2019 mennessä, jos kiinteistöt sijaitsevat alle 100 metrin päässä vesistöstä. Kunta voi myöntää poikkeuksen, jos jätevesien määrä on vähäinen ja kustannukset ovat kohtuuttomat (Ympäristöministeriö, 2016).

Ehdotuksen mukaan muilla kuivan maan alueilla sijaitsevien kiinteistöjen jätevesijärjestelmät tulisi kunnostaa perustason puhdistusvaatimuksen mukaiseksi vasta suurempien remonttien, kuten vesikäymälän rakentamisen, talousvesijärjestelmän uusimisen tai rakennuksen rakentamiseen verrattavissa olevan korjaus- tai muutostyön yhteydessä. Kuivan maan kiinteistöiksi lasketaan talot, jotka sijaitsevat yli 100 metrin päässä rannasta, mutta joillakin kunnilla saattaa olla omia säännöksiä. Hallitus aikoo lieventää määräaikaisen poikkeusluvan saamista kuivan maan kiinteistöille (Ympäristöministeriö, 2016).



Uudistetun jätevesiasetuksen mukaan haja-asutusalueen kiinteistössä vakituisesti asuvat omistajat, jotka ovat syntyneet ennen 9.3.1943, ovat vapautettuja asetuksen puhdistusvaatimusten noudattamisesta. Kiinteistön jätevesijärjestelmää ei siis tarvitse kunnostaa asetuksen mukaiseksi, jos haja-asutusalueen kiinteistössä vakituisesti asuva kiinteistönomistaja on täyttänyt 68 vuotta ennen 9.3.2011. Jätevesijärjestelmä tulee vain pitää käyttökuntoisena ja korjata tarvittaessa (Rakentaja.fi, 2015).

Jos kiinteistö vaihtaa omistajaa ja kiinteistö pysyy asuinkäytössä, niin jätevesien puhdistus on korjattava jätevesiasetuksen ja kunnan vaatimusten mukaiseksi. Ikärajoitus ei koske vapaa-ajan asuntoja. Poikkeussäännöksiä voidaan soveltaa myös pitkäaikaisen sairauden tai työttömyyden elämäntilanteisiin. Lisäksi ympäristöministeriön työryhmä on ottanut kantaa jätevesijärjestelmän hankinnan kuluttajansuojaan ja oikeusturvaan, koska monet kiinteistönomistajat ovat jo uusineet järjestelmänsä (Rakentaja, 2015).

## **2.2 Vesihuoltolaki**

Vesihuoltolain 119/2001 tarkoituksena on turvata kiinteistöille hyvälaatuinen talousvesi sekä ympäristönsuojelun kannalta asianmukainen viemärointi. Kiinteistönomistajat vastaavat kiinteistöjensä vesihuollosta lainmukaisesti. Kunnan vesihuoltoalueella sijaitsevien kiinteistöjen tulee liittyä vesijohtoon tai viemäriin, erityistapauksia lukuun ottamatta. Vesihuoltolakia valvoo alueellinen ympäristökeskus ja kunnan ympäristönsuojeluviranomainen. Kuntien tulee turvata vesihuoltopalvelujen saatavuus, jos suuret asukasjoukot tai terveydelliset ja ympäristönsuojelulliset syyt sitä vaativat (Vesihuoltolaki 119/2001).

## **2.3 Ympäristönsuojelulaki**

Ympäristönsuojelulaissa 527/2014 on pykälä, jotka liittyvät jätevesien käsittelyyn haja-asutusalueilla. Pykälän 16 maaperän pilaamiskiellon mukaan maaperään ei saa jättää tai päästää jätteitä niin, että ne voisivat aiheuttaa haittaa maaperälle, ihmisten terveydelle tai ympäristölle. Pykälässä 17 on vastaavasti määritelty pohjaveden pilaamiskielto, jonka mukaan jätevesi ei saa päätyä ympäristöön ja pilata pohjaveden laatua (Ympäristönsuojelulaki 527/2014).

Pykälä 155 käsittelee jätevesien yleistä puhdistamisvelvollisuutta. Vaikka kiinteistöä ei ole liitetty viemäriverkostoon, eikä kiinteistön toiminta vaadi ympäristölupaa, niin jätevedet täytyy puhdistaa ja johtaa siten, ettei niistä ole ympäristölle haittaa. Puhdistetut talousjätevedet voidaan johtaa maahan, vesistöön, ojaan, tekolammikkoon tai noroon. Ympäristölle vaarattomat ja vähäiset jätevedet, pois lukien vesikäymälän vedet, voidaan johtaa puhdistamattomana maahan (Ympäristönsuojelulaki 527/2014).

Pykälän 156 mukaan jätevesien käsittelyjärjestelmä tulee suunnitella, rakentaa ja ylläpitää siten, että järjestelmällä voidaan saavuttaa jätevesiasetuksessa 209/2011 määritetyt käsittelemättömän jäteveden puhdistusvaatimukset orgaaniselle aineelle, fosforille ja typelle (Ympäristönsuojelulaki 527/2014).

#### **2.4 Maankäyttö- ja rakennuslaki**

Maankäyttö- ja rakennuslaissa (132/1999) käsitellään jätevesijärjestelmien rakentamista ja ylläpitoa. Pykälän 117 i mukaan rakennuksella on oltava käyttö- ja huolto-ohje, joka koskee myös jätevesijärjestelmiä. Pykälä 135 antaa edellytykset rakennusluvalle asemakaava-alueella ja pykälä 136 rakennusluvan edellytykset asemakaava-alueen ulkopuolella. Rakentaminen täytyy toteuttaa niin, ettei ympäristölle aiheudu haittaa vedensaannista ja jätevesistä. Pykälä 166 edellyttää rakennuksen ja ympäristön kunnossapitoa, joka koskee myös pihakaivoa. Jos kyseinen pihakaivo poistetaan käytöstä, niin pykälän 117 d mukaan siitä ei saa muodostua turvallisuusriskiä.

#### **2.5 Terveydensuojelulaki**

Terveydensuojelulain 763/1994 pykälän 22 mukaan jäteveden käsittelyjärjestelmä ja viemärointi on suunniteltava, sijoitettava, rakennettava ja kunnossapidettävä siten, ettei niistä aiheudu terveyshaittaa (Terveydensuojelulaki 763/1994).

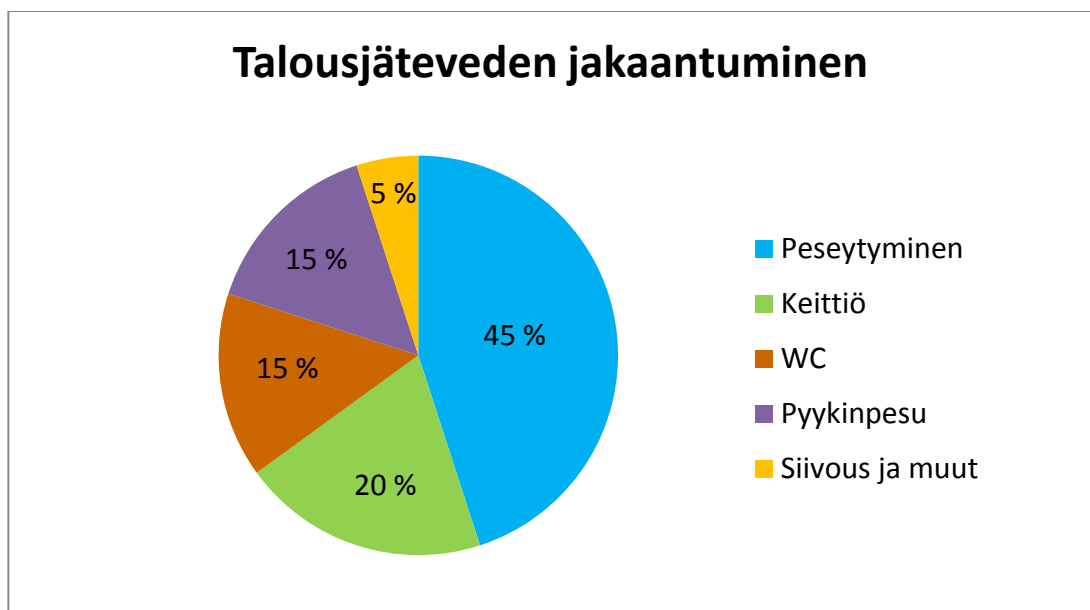
#### **2.6 Jätelaki**

Jätelain (646/2011) mukaan saostus- ja umpisäiliölietteet ovat yhdyskuntajätettä, jotka luovutetaan pykälässä 29 tarkoitetulle vastaanottajalle. Käymälälietteiden ravinteet tulisi kuitenkin ensisijaisesti kierrättää asianmukaisen käsittelyn, kuten kompostoinnin, jälkeen ennen kuin lietteet muuttuvat jätteeksi (Särkelä, Lahti & Haapala, 2013, s.6).

### 3 TALOUSJÄTEVEDEN KOOSTUMUS JA KUORMITUSLUVUT

Talousjätevedellä tarkoitetaan jätevettä, joka johdetaan asuntojen, toimistojen, liikerkennusten ja laitosten vesikäymälöistä, keittiöistä, pesutiloista ja niitä vastaavista tiloista ja laitteista. Talousjätevedellä tarkoitetaan myös ominaisuuksiltaan ja koostumukseltaan vastaavia karjatilojen maito huoneiden tai muun elinkeinotoiminnan jätevettä. Maito huonejätevesi on laadultaan kuitenkin erilaisempaa kuin asumajätevesi, koska maito huoneen aiheuttama jätevesikuormitus muodostuu pääosin maidosta ja käytetyistä pesuaineista (Kujala-Räty ym. 2008, s.62-64).

Yhden henkilön oletettu vedenkulutus vuorokaudessa on 150 litraa vettä, joka johdetaan jäteveden käsittelyjärjestelmään. Kuviossa 1 on esitettyä kotitalouden jätevettä tuottavien lähteiden keskimääräiset osuudet prosentteina. Kotitalouden jätevettä syntyy peseytymisessä, keittiössä, vessassa, pyykinpesussa ja muissa lähteissä, kuten siivouksessa (Kujala-Räty ym. 2008, s.58).



KUVIO 1: Talousjäteveden jakaantuminen, muokattu (Kujala-Räty ym. 2008, s.58)

Nämä jätevesijakeet sisältävät vaihtelevia määriä orgaanista ainesta, fosforia, typpeä, mikrobeja sekä kemikaaleja ja lääkeainejäämiä, jotka kuormittavat ympäristöä. Orgaanisen aineen määrä jätevedessä mitataan biologisena hapenkulutuksen määränä ja ilmaistaan suomeksi yksiköllä BHK<sub>7</sub> tai englanniksi BOD<sub>7</sub>. Orgaanisen aineen, typen ja fosforin määrä ilmoitetaan milligrammoina litrassa, mg/l (Kujala-Räty ym. 2008, s.58).

Haja-asutuksen kuormitusluku muodostuu yhden asukkaan käsittelemättömien jätevesien keskimääräisestä kuormituksesta grammoina vuorokaudessa, g/p/d. Kuormitusluvun arvo yksi tarkoittaa vuorokausikuormitusta, jonka orgaanisen aineen määrä seitsemän vuorokauden biologisena hapenkulutuksena on 50 g/p/d, kokonaisfosforin määrä on 2,2 g/p/d ja kokonaistypen määrä on 14 g/p/d (Valtioneuvoston asetus 209/2011).

Kuormitusluvut lasketaan kertomalla ominaiskuormitukset kiinteistön mitoittavalla asukasmäärällä kaavojen 1 ja 2 mukaisesti. Taulukossa 1 on esitettyä ominaiskuormitukset prosentteina ja pitoisuuksina orgaanisen aineen, fosforin ja typen määrälle ulosteessa, virtsassa ja muissa lähteissä. Muita lähteitä ovat esimerkiksi ruoka-aineet, pesuaineet, paperi ja oksennus. Ympäristökuormitus lasketaan eri kuormituslukujen summana (Valtioneuvoston asetus 209/2011). Esimerkkilaskelma on esitettyä taulukossa 2.

$$\text{Kuormitusluku} = \text{ominaiskuormitus} \cdot \text{mitoittava asukasmäärä} \quad (1)$$

$$\text{Mitoittava asukasmäärä} = \frac{\text{huoneiston pinta-ala m}^2}{30 \text{ m}^2} \quad (2)$$

Asukasmäärä mitoitetaan huoneiston pinta-alan mukaan, koska kohteen asukasmäärä voi muuttua ja jätevesijärjestelmän on oltava tarpeeksi suuri pinta-alaan nähden. Jätevesijärjestelmä mitoitetaan kuitenkin vähintään viidelle henkilölle (Valtioneuvoston asetus 209/2011).

TAULUKKO 1: Ominaiskuormitukset (Kujala-Räty ym. 2008, s.59)

Kuormituslähde	Orgaaninen aine [BHK <sub>7</sub> ]		Kokonaisfosfori [P]		Kokonaistyyppi [N]	
	g/p/d	%	g/p/d	%	g/p/d	%
Uloste	15	30	0,6	30	1,5	10
Virtsa	5	10	1,2	50	11,5	80
Muu lähde	30	60	0,4	20	1	10
<b>Yhteensä</b>	<b>50</b>	<b>100</b>	<b>2,2</b>	<b>100</b>	<b>14</b>	<b>100</b>

TAULUKKO 2: Jätevesien kuormituslaskelma (Valtioneuvoston asetus 209, 2011)

Kuormitus- ja puhdistustaso	Orgaaninen aine [BHK <sub>7</sub> ]		Kokonaisfosfori [P]		Kokonaistyyppi [N]	
	g/p/d	%	g/p/d	%	g/p/d	%
5 henkilöä	250	100	11	100	70	100
Vähimmäisvaatimus	-200	80	-7,7	70	-21	30
Ympäristökuormitus	50	20	3,3	30	49	70

## 4 KOSTEIKKOPUHDISTAMOT

Kosteikkopuhdistamoissa vesiä puhdistetaan ilmaversoisten kasvien ja maaperän avulla. Kosteikkopuhdistamot voivat olla joko luonnollisia tai keinotekoisia ja ne voidaan jakaa kolmeen ryhmään (Kallio & Santala, 2002, s.73):

- 1) juurakkopuhdistamot, joissa vesi virtaa maan alla vaak- tai pystysuoraisesti
- 2) kosteikkopuhdistamot, joissa vesi virtaa sekä maan pinnalla että pinnan alla
- 3) puhdistamot, joissa vesi virtaa suurelta osin maan pinnalla.

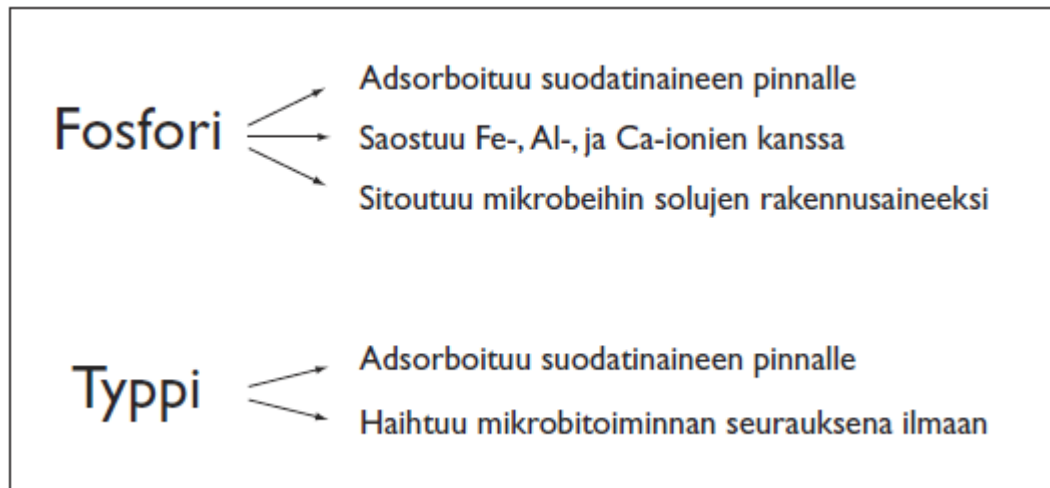
Tässä työssä käsittelen juurakkopuhdistamoista laajimmin vain pajupuhdistamoita. Juurakkopuhdistamot ovat Suomen olosuhteissa parhaat mahdolliset menetelmät, koska veden virratessa maan alla jääytymisestä ei aiheudu ongelmia. Puhdistamo, jossa vesi virtaa suurelta osin maan pinnalla, ei voida käyttää Suomessa ympärivuotisesti. Lämpimissä maissa käytetään enemmän juurakkopuhdistamoita, joissa veden virtaus tapahtuu maaperässä vaakasuoraisesti (Kallio & Santala, 2002, s.73). Eri ratkaisut riippuvat ilmastosta sekä jäteveden laadusta ja määrästä (CEN/TR 12566-5, 2008, s.14).

### 4.1 Juurakkopuhdistamot

Juurakkopuhdistamo on keinotekoinen allas, johon johdetaan saostussäiliössä esikäsitellyä jätevettä. Esikäsitellyn tarkoituksena on laskeuttaa jätevedestä kiintoaine, joka tukkii jakoputkia ja heikentää maaperän ilmanvaihtoa (Tritonet Oy, 2004, s.104). Altaan maaperä voi olla luonnollista, paikalle tuotua tai niiden yhdistelmä. Altaan pinnalle voidaan istuttaa kosteikkokasveja tai runsaasti haihduttavia puuvartisista kasvilajeja, kuten pajuja. Juurakkopuhdistamoissa käytetään yleensä järviruokoa (LVI 23-10540, 2013, s.24). Järviruoko ja helvet eivät sido fosforia yhtä tehokkaasti kuin paju, joten niihin perustuva puhdistamo vaatii kemiallisen saostuksen (Lynch, 2016).

Juurakkopuhdistamo voidaan käyttää jäteveden käsittelyyn kohteissa, joissa imeytys maahan tai maasuodattamon rakentaminen ei ole mahdollista vettä johtavan maaperän tai riittämättömän purkupaikan takia. Juurakkopuhdistamo vaatii tasaisen jäteveden virtauksen, jolla ehkäistään kasvien kuivumista ja juurakon jääytymistä. Puhdistettu jätevesi voidaan johtaa purkupaikkaan tai haihduttaa kokonaan vesitiiviissä altaassa (Ahola, 2012, s.8).

Juurakkopuhdistamossa jäteveden puhdistuminen tapahtuu maasuodatuksen tavoin maaineeseen sitoutumalla sekä hyödyntämällä maamikrobeja orgaanisen aineen hajottamiseen ja typen poistoon kaasuna. Kuvassa 1 on esitettyä erilaisia fosforin ja typen sitoutumisprosesseja jäteveden puhdistuksessa. Juurakkopuhdistamon kasvillisuus käyttää myös jäteveden ravinteita kasvuunsa juurien mikrobitoiminnan avulla (Nyholm, 2004, s.9).



KUVA 1: Fosforin ja typen sitoutuminen (Nyholm, 2004, s.9)

Viljelykasvit varastoivat auringon säteilyenergiaa kemialliseen muotoon yhteyttämisen eli fotosynteesin avulla. Vihreiden viljelykasvien soluissa on viherhiukkasia, eli kloroplasteja, jotka sisältävät auringon valoa vastaanottavia väriaineita, kuten lehtivihreää. Fotosynteesissä lehtivihreä tuottaa ilmakehän hiilidioksidin, juurilla saadun veden ja auringon säteilyenergian avulla sokeria, eli glukoosia. Reaktiossa ilmaan vapautuu myös happea (Koponen, 2015).

Lyhytkiertoisten viljelykasvien hyödyntämiseen maaperän, ilman ja veden saasteiden puhdistamiseen on kehitetty oppi nimeltään phytoremediaatio (engl. phytoremediation, phyto = kasvi, remedium = palauttaa tasapainoon). Phytoremediaatiossa ravinnerikkaat jätevedet, kaatopaikkojen suotovedet, turvesoiden hienojakoinen humus, raskasmetallit ja muut päästöt sidotaan kasveihin, joten kyseessä on haitta-ainesten tasapainottavasta sieppauksesta. Lyhytkiertoviljelyn (SRC, short rotation coppice) pajuviilelmä on todettu olevan kustannustehokkaampi vaihtoehto ravinteiden, polttoaineiden ja haitallisten raskasmetallien, kuten kadmiumin, sitomisessa nopeasti kasvavaan biomassaan kuin tavalliset jäteveden puhdistusprosessit (Dimitriou & Aronsson, 2005, s. 47 & 50).

## 4.2 Pajupuhdistamot

Seuraavaksi esittelen Myttäälän, Vesilahden ja Marttilan pajupuhdistamot, jotka ovat tekniikaltaan erilaisempia kuin tanskalaisen Peder S. Gregersenin kehittämät suljetut ja avoimet pajupuhdistamot. Pajupuhdistamojen jälkeen käsittelen energiapajuviljelmien hyödyntämistä erilaisten jätevesien ja lietteiden pidättämisessä.

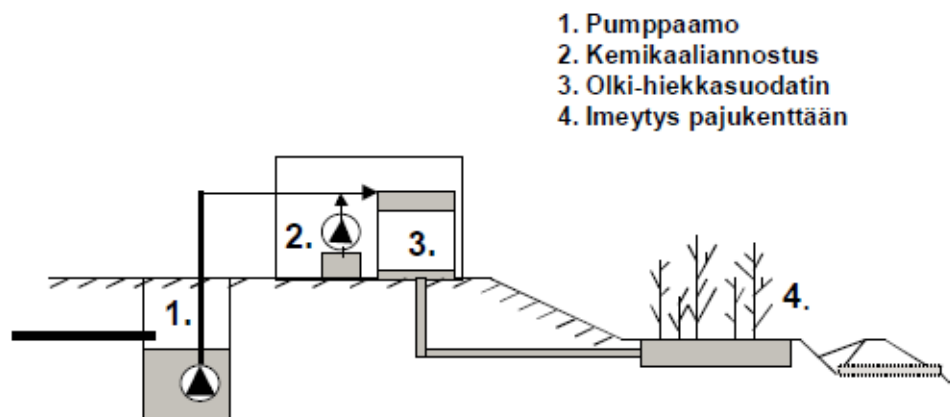
Suomen ensimmäinen jäteveden pajupuhdistamo, joka oli tutkimuksellisen seurannan piirissä, perustettiin vuonna 1977 Pälkäneelle Myttäälän kartanoon, jossa MTT tutki jätevesien imeyttämistä pajuviiljelmään. Pajupuhdistamo mitoitettiin 18 henkilölle ympärivuotiseen käyttöön ja vedenkulutus oli 200 m<sup>3</sup> kuukaudessa. Jäteveden kiintoaineet laskeutettiin saostuskaivossa, josta jätevesi johdettiin painovoimaisesti salaojaputkilla 0,3 hehtaarin pajuviiljelmään. Kaivo tyhjennettiin kiintoaineesta kahdesti vuodessa. Viljelmään istutettiin koripajua (*Salix viminalis*) ja vesipajua (*S. aquatica*). Talvi ei vaurioittanut pajuja (Takala, 1985, s.1-11). Viljelämä on esitettyinä kuvassa 2.

Vuonna 1982 imeytysojien alta ja sivuista otettiin maanäytteet, joiden mukaan maaperään ei ollut kertynyt jäteveden sisältämiä orgaanisia aineksia, vaan ne olivat haihtuneet ja maaperä oli pysynyt puhtaana. Imeytysputkien alapuolisessa kerroksessa jäteveden sisältämä typpi hävisi pajujen ravinnoksi, haihtumalla ammoniakkinä ja osaksi nitrifikaatio-denitrifikaatio-prosessin kautta typpikaasuina (Takala, 1985, s.7-8). Vuonna 2005 Myttäälän kartano yksityistettiin. Kun vierailin kartanolla maaliskuussa 2016, tonilla asui kolme henkilöä ja vedenkulutus oli alle 20 m<sup>3</sup> kuukaudessa. Pajupuhdistamo oli käytössä, mutta viljelmän putkiston epäiltiin olevan huonossa kunnossa. Talonmies korjaa pajut moottorisahalla ja hakeyrittäjä hakee pajut ilmaiseksi.

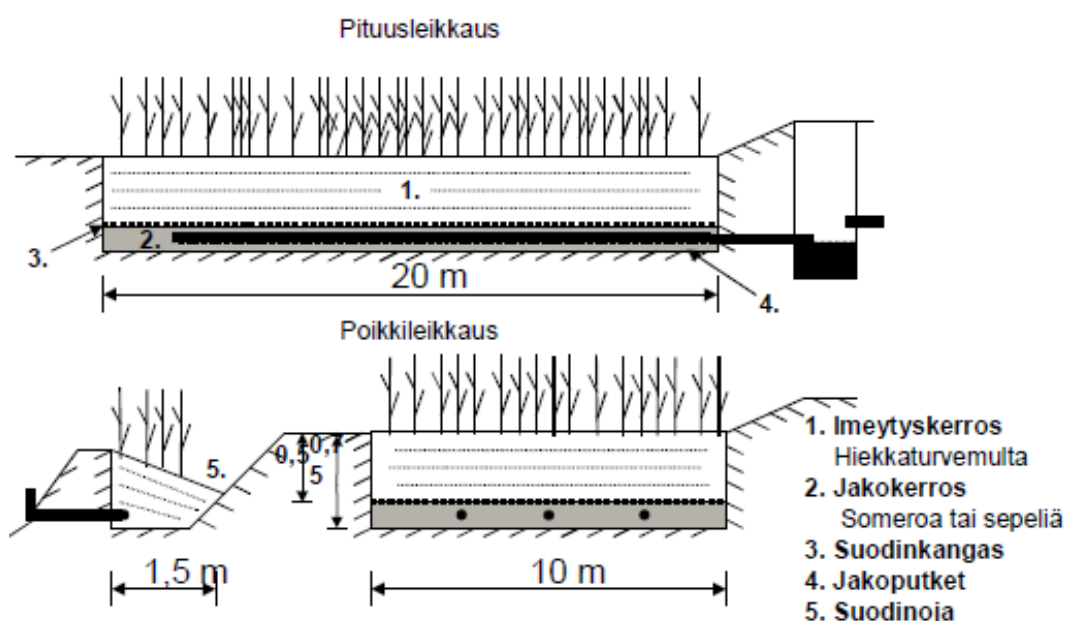


KUVA 2: Myttäälän kartanon pajuviiljelämä ja sijainti kartalla (Google Maps, 2015)

Vuonna 2001 Vesilahdelle perustettiin pajupuhdistamo, jolla tutkittiin kemiallisesti esikäsittelyä maitohuone- ja asumajätevesien puhdistamista. Puhdistamo on esitettyä kuvassa 3 sekä sen pituus- ja poikkileikkaukset kuvassa 4. Kenttään istutettiin koripajuja (*Salix viminalis*) 1-2 pistokasta per neliometri ja ylivuoto järjestettiin suodinojan kautta. Jätevedet esikäsiteltiin rautasulfaattiliuoksella, jotta kiintoaineet eivät tukkineet järjestelmää. Käsittelyn jälkeen jätevesi johdettiin olki-hiekkasuodattimen kautta pajukenttään. Pajupuhdistamon teho oli kemialliselle hapenkulutukselle 92 %, kokonaistypelle 77 % ja kokonaisfosforille 97 % (Närvänen & Jansson, 2002, s.114-115). Järjestelmän kustannukset olivat yhteensä noin 6220 euroa, sisältäen suunnittelun, rakentamisen ja viemäroinnin muutokustannukset (Kallio & Santala, 2002, s.69).



KUVA 3: Maitohuone- ja asumajätevesien pajupuhdistamo (Närvänen, 2002, s.113)

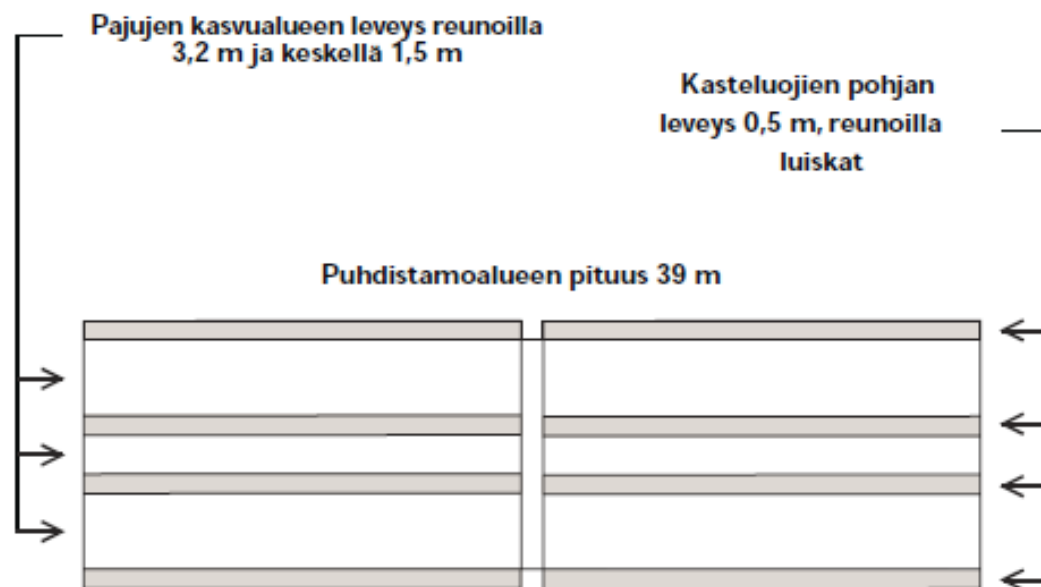


KUVA 4: Pituus- ja poikkileikkauspiirroksat pajukentästä (Närvänen, 2002, s.114)



Vuonna 2001 tamperelainen insinööritoimisto Tritonet Oy oli toteuttanut maitotilan jätevesien käsittelyyn soveltuvan pajupuhdistamon Mäntsälän Marttilaan. Järjestelmän kasvatusaltaan rakenne on tiivis ilman purkuputkea ja pesuvedet johdetaan erilliseen suureen varastokaivoon, joka toimii kiintoaineiden erottajana ja jätevesien varastona kasvukauden ulkopuolella. Jätevesi siirretään kaivosta lietevaunun ja kasteluojaston avulla pajuviljelmään (Tritonet Oy, 2004, s.104). Korjatut pajut haketetaan pääasiassa energiakäyttöön tai käytetään pistokkaina ja korikäsitöissä (Turun Sanomat, 2007).

Maatilalla vettä johtamattoman savimaaperän ansiosta pajujen kastelu voidaan suorittaa seuraamalla kasteluojaston vedenpinnan korkeutta, joka laskee kun pajut haihduttavat vettä. Pajupuhdistamon pinta-ala on 490 m<sup>2</sup> ja istutettujen pajujen määrä on noin tuhat kappaletta. Pajuviljelmä on 39 m pitkä ja 12,5 m leveä. Jos kasteluojien väliä olisi kasvatettu, niin tasainen kastelu olisi vaikeutunut. Puhdistamon rakenne ja päämitat ovat esitettynä kuvassa 5 (Tritonet Oy, 2004, s.104).



KUVA 5: Maitotilan pajupuhdistamon rakenne ja mitat (Tritonet Oy, 2004, s.104)

Marttilan pajupuhdistamon puhdistustulos oli vesistökuormituksen vähentämisen kannalta täydellinen, mutta epäorgaaniset yhdisteet ja pajuilta mahdollisesti käyttämättä jääneet ravinteet kertyivät puhdistamoalueen maaperään. Puhdistamon pinta-ala olisi pitänyt mitoittaa ravinnekuormituksen perusteella, jolloin varastoitumiselta olisi vältytty (Tritonet Oy, 2004, s.106). Ympäristökeskuksen rahoittaman seurantatutkimuksen mukaan fosforia ei imeytynyt maaperään (Turun Sanomat, 2007).

Tanskalainen Peder S. Gregersen on kehittänyt pajupuhdistamoita työskennellessään projektipäällikkönä Esbjergin yliopistossa vuosina 1996-2000. Vuosina 1997-1999 paikalliset ympäristöviranomaiset myönsivät rakentamisluvat kahdeksalle suljetulle pajupuhdistamolle. Vuonna 1999 Tanskan ympäristöministeriö hyväksyi suljetut pajupuhdistamot lainsäädäntöön. Vuodesta 2000 lähtien Gregersen jatkoi kehitystyötä perustamalla Center for Recirkuleringin. Gregersen on avustanut pajupuhdistamo-projekteissa Suomessa, Norjassa, Ruotsissa, Saksassa ja Kiinassa (Gregersen, 2015).

Gregersen on kehittänyt kolme pajupuhdistamoa: suljetun pajupuhdistamon, avoimen pajupuhdistamon ja paju-suodattamon. Suljettu pajupuhdistamo on täysin vesitiivis, kun taas avoin pajupuhdistamo ja paju-suodattamo ovat imeytyskentän kaltaisia, pohjasta avoimia käsittelyjärjestelmiä. Pajupuhdistamo kuuluu paikalla rakennettaviin kasvipuhdistamoihin, joiden toimivuuden testaukseen ei ole olemassa CE-testausstandardia, eikä CE-merkintää tarvita (Suomen ympäristökeskus, 2014).

Pajupuhdistamot soveltuvat asuin-, maatalous- ja teollisuusjätevesien puhdistamiseen, koska pajut sitovat tehokkaasti orgaanista ainesta, fosforia, typpeä ja raskasmetalleja. Suljetut pajupuhdistamot voivat olla yhden talouden tai 2-80 talouden puhdistamoita. Tanskassa Dyssekilden kylässä (kuva 6) on 73 talouden keskitetty pajupuhdistamo, jossa käsitellään vuodessa 6000 m<sup>3</sup> jätevettä. Pajualtaiden pinta-ala on yhteensä 7000 m<sup>2</sup> ja korjatut pajut käytetään seospolttoaineena. Tanskassa on toteutettu myös 80 talouden pajupuhdistamo, joka on tällä hetkellä maailman suurin (Lynch, 2016).



KUVA 6: Dyssekilden kylän pajupuhdistamo (L&G Pajupuhdistamo Oy, 2013, s.22)

Vuoden 2011 lopussa Paul Lynch perusti L&G Pajupuhdistamo Oy:n yhteistyössä pajupuhdistamoita kehittäneen Peder S. Gregersenin kanssa Inkooseen. Gregersen asuu Tanskassa ja toimii pajupuhdistamojen suunnittelijana. Lynch toimittaa Gregersenille tiedot asiakkaan kohteesta ja Gregersen mitoittaa pajupuhdistamon kehittämällään ohjelmalla. Lynch teettää pajupuhdistamon piirustukset suunnittelutoimistossa, hyväksyttää dokumentit viranomaisilla ja rakentaa puhdistamon kaivuuyrityksen kanssa. Lynchillä on myös toinen yritys Inkoossa: vuonna 2009 perustettu ekologiseen rakentamiseen perustuva The Natural Building Company Oy (Lynch, 2016).

Tanskassa on toteutettu yli 4000 suljettua pajupuhdistamo, kun taas Suomessa on rakennettu Uudenmaan alueella viisi suljettua pajupuhdistamo, joista yksi on Inkoon Päivölässä sijaitseva viiden kotitalouden ja hevostallin keskitetty puhdistamo. Puhdistamoaltaat jaettiin kolmeen osaan, joista kaksi pienempää ovat kooltaan 8 x 30 metriä ja suurempi 8 x 60 metriä. Suuremman altaan rakennusvaiheet maaliskuussa 2013 on esitettyä kuvassa 7. Jätevesi pumpataan altaisiin vuorotellen ja korjatut pajut poltetaan muiden puupolttoaineiden kanssa tai haketetaan hevostallin pohjamateriaaliksi (Lynch, 2016).



KUVA 7: Pajualtaan kaivuu, vuoraus ja täyttö (L&G Pajupuhdistamo Oy, 2013)

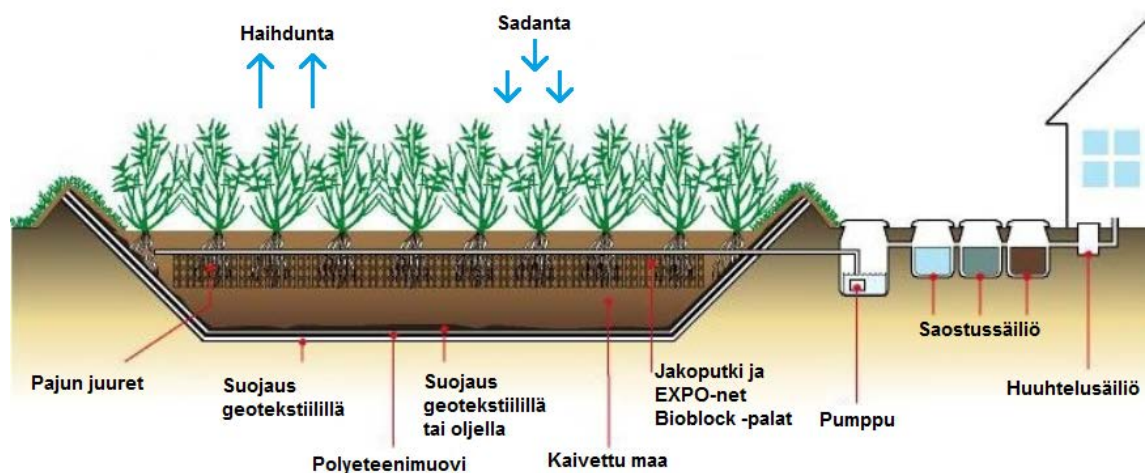
Lynch on rakentanut suljetun pajupuhdistamon myös Åminneforsin golfkentälle, jossa puhdistamo käsittelee ruohonleikkuukoneiden öljyt ja leikkujätteet. Pienimmän suljetun pajupuhdistamon, 4 x 8 metriä, Lynch on rakentanut Karjaassa sijaitsevalle yhden hengen toimistokiinteistölle. Loput kaksi pajupuhdistamo Lynch on rakentanut Siuntioon ja omalle talolleen Inkooseen. Lynchin pajupuhdistamon allaskoko on 6 x 28 metriä ja se on mitoitettu viiden hengen kotitaloudelle. Inkoon viranomaiset ovat positiivisesti mukana pajupuhdistamojen toteuttamisessa (Lynch, 2016).

#### 4.2.1 Suljettu pajupuhdistamo

Suljettu pajupuhdistamo (engl. Zero Discharge Willow Facility) soveltuu kotitalouksien ympärivuotiseen jätevesien käsittelyyn erityisesti pinta- ja pohjavesialueiden läheisyydessä, koska puhdistamoallas rakennetaan vesitiiviiksi ja puhdistamosta ei ole ulosvirtausta. Jätevesi haihdutetaan altaassa pajujen sitomiskykyä hyödyntäen (Center for Recirkulering, 2010). Rakenne on esitettyä kuvassa 8 ja tarkemmin luvussa 5.

Pajupuhdistamoissa kotitalouden mustat ja harmaat jätevedet johdetaan kaksi- tai kolmiosastoiseen saostussäiliöön, jossa rasva ja kiintoaineet laskeutetaan. Säiliö tyhjenetään kerran vuodessa. Saostussäiliöstä jätevesi virtaa pumppusäiliöön, josta jätevesi pumpataan putken kautta altaaseen pajujen haihdutettavaksi. Painovoimaista jäteveden johtamista altaaseen ei suositella, koska tällöin jätevesi ei levittäydy tasaisesti. Pumpun 30 kWh vuosikulutus kustantaa vuodessa noin 30 euroa ja pumppu voi olla aurinkokennokenkäkäyttöinen. Pumppusäiliössä on tarpeeksi tilaa jätevedelle sähkökatkoksen varalta ja tarvittaessa pumppu voidaan varustaa hälyttimellä (Center for Recirkulering, 2010).

Ravinteet, raskasmetallit ja hiilidioksidi imeytyvät pajujen varsiin ja lehtiin tuottaen noin 8-10 tonnia kuiva-ainetta hehtaaria kohti. Pajupuhdistamo on positiivisen energiataseen jätevesiratkaisu ja se voidaan kierrättää kokonaan käytön jälkeen (Center for Recirkulering, 2010). Pajupuhdistamot täyttävät Tanskassa asetetut puhdistusvaatimukset 95 % orgaaniselle aineelle, 90 % fosforille ja 90 % typelle (Brix & Arias, 2005, s.7).



KUVA 8: Suljettu pajupuhdistamo, muokattu (Center for Recirkulering, 2010)

Kuten muissa kiinteistökohtaisissa jätevesiratkaisuissa, myös pajupuhdistamon käytössä suosituksena on, ettei taloudessa käytetä voimakkaita puhdistusaineita. Tällöin haitalliset vierasaineet eivät heikennä maaperän kuntoa. Jos pajupuhdistamoa käytetään meijerin jätevesien puhdistamiseen, niin suolavesi tulee eristää erityisesti juuston tuotannossa, koska liiallinen suola on myrkyllistä pajuille ja maaperälle. Ksenobioottisilla aineilla on kuitenkin rajattomasti aikaa hajota pajupuhdistamossa. Altaan bakteerikanta on riippuvainen sadantamäärästä ja se vaihtelee alueilla, joissa on kosteudelle hyvät olosuhteet. Sade luo bakteereille hyviä liikkumisolosuhteita, joissa ksenobioottiset aineet haajoavat hormoneiksi (Center for Recirkulering, 2010).

Pajupuhdistamoon istutetaan uusia, vastuskykyisiä ja nopeasti kasvavia *Salix*-klooneja, jotka haihduttavat vettä tehokkaasti ja sitovat suuria määriä ravinteita, kuten fosforia ja typpeä. Pajujen juuristo kestää myös pitkäaikaista hapettomuutta. Pajupuhdistamossa tulee käyttää ainakin kolmea pajukloonaa eri vastustuskyvyillä, jotta kasvitaudeilta vältytään. Jätevesianalyysi on yksi tapa löytää kolme käytettävää pajukloonaa (Center for Recirkulering, 2010). Suljetuissa pajupuhdistamoissa viljellään nykyisin Karin, Klara ja Gudrun -lajikkeita. Käsittelen pajulajikkeita tarkemmin luvuissa 6.1 ja 6.2.

Pajun biomassaa voidaan kuivattuna polttaa energiaksi joko runkoina tai hakkeena, jonka lisäksi pajuja voidaan käyttää viherrakentamisessa, käsityömateriaalina, uusina pistokkaina ja jatkojalostuksen raaka-aineena (Heino & Hytönen, 2015, s.6). Jos pajupuhdistamoa käytetään teollisen jäteveden tai saastuneen maaperän puhdistamiseen ja pajut poltetaan, niin tuhkan raskasmetallisältö tulee huomioida lannoitekäytössä. Tanskan ympäristöministeriön riskiarvioinnin mukaan talousjäteveden käsitelleen pajupuhdistamon pajut voidaan polttaa ja tuhkat käyttää lannoitteena ilman riskejä. Pajupuhdistamon maaperä ei myöskään tule ylittämään viljelysmaalle asetettuja raskasmetallien raja-arvoja yli 265 vuoteen (Gregersen, 2008, s.14).

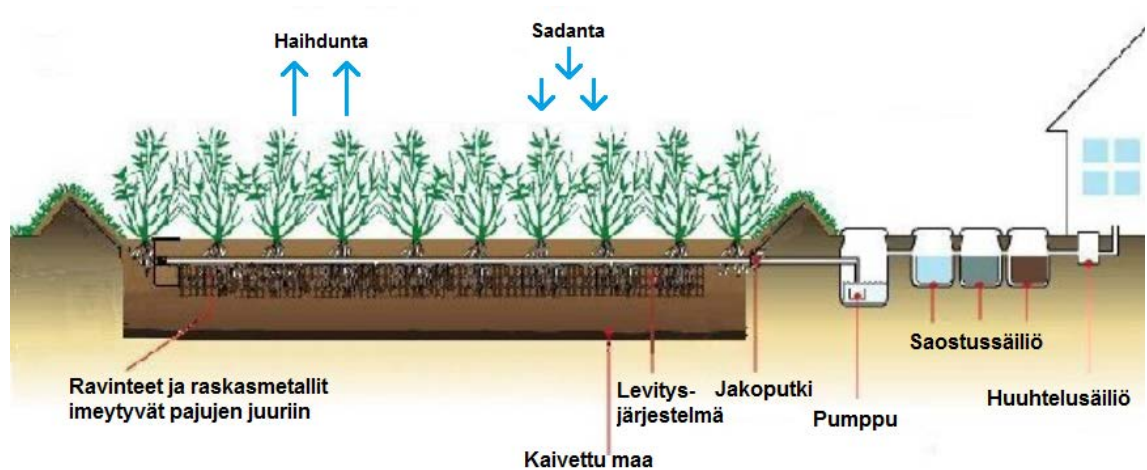
Voimalaitoksissa yksi menetelmä poistaa raskasmetalleja tuhkasta on ottaa voimalaitoksen piipussa talteen raskasmetallia sisältävä lentotuhka ja kierrättää lannoituskäyttöön soveltuva pohjatuhka pajuviiljelmällä. Lentotuhka talletetaan joko kaatopaikalla tai käytetään esimerkiksi asfaltoinnin ja betonin täyteaineena. Lentotuhka voidaan käsitellä myös elektrokineettisellä prosessilla, jossa pelkästään raskasmetallit talletetaan ja käsitelty tuhka käytetään pajuviiljelmien lannoitteena (Center for Recirkulering, 2010).

## 4.2.2 Avoin pajupuhdistamo

Jätevesiratkaisuna avointa pajupuhdistamoa (engl. Open Willow Facility) voidaan käyttää alueilla, jotka eivät sijaitse vesistöjen lähetyvillä ja joissa savinen maaperä estää veden virtaamisen. Pajupuhdistamot suojelevat maaperää, koska ne luovat negatiivisen vesitaseen alueilla, joissa sataa enintään 1400mm vuodessa (Center for Recirkulering, 2010). Avoimen pajupuhdistamon rakenne on esitettyä kuvassa 9.

Tanskalaiset mittaukset ovat osoittaneet, että avoin pajupuhdistamo on maasuodattamoa huomattavasti tehokkaampi järjestelmä, koska avoimen pajupuhdistamon alue on tarpeeksi suuri suodattamaan fosforin, typen ja kaliumin pajujen varsiin ja lehdistöön. Jäljelle jäävä typpitaso pajujuuriston alla on suurellakin jäteveden typpikuormituksella samantasoinen kuin luonnonmukaisilla alueilla (Center for Recirkulering, 2010).

Avoin pajupuhdistamo toimii samalla periaatteella kuin suljettu pajupuhdistamo, mutta avoin ratkaisu ei mahdollisesti täytä tulevaisuudessa tiukentuvia vaatimuksia, koska veden virtaamisriski maaperään on suurempi. Kaikki pajupuhdistamot käsittelevät jätevesiä kuitenkin yhtä tehokkaasti. Oikein toteutettuna pajupuhdistamoina on helppo ylläpitää, mutta avoinkin pajupuhdistamo tulee mitoittaa ja suunnitella huolellisesti, jotta hajuhaitoilta ja jäteveden tulvimiselta vältytään (Center for Recirkulering, 2010).



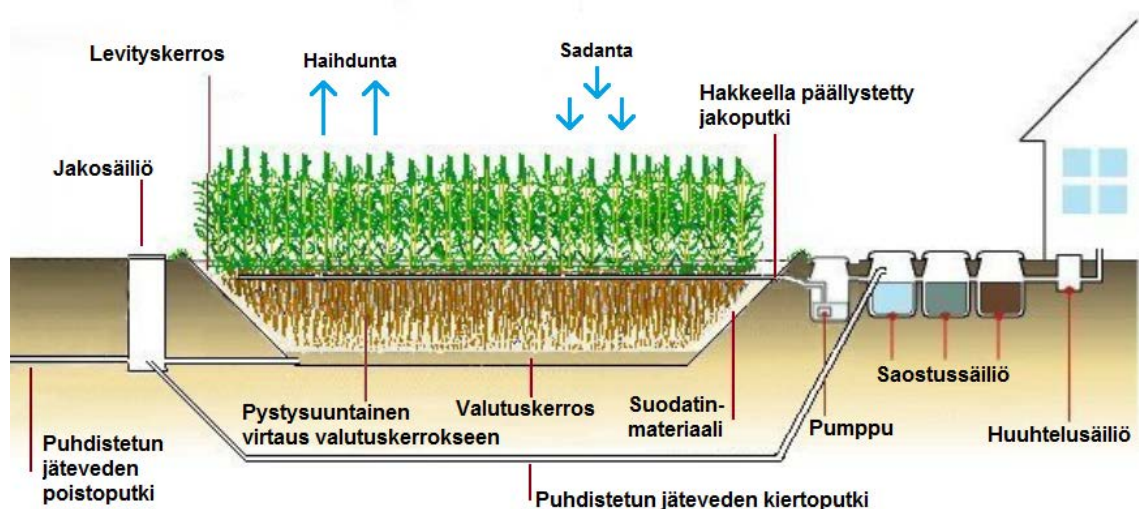
KUVA 9: Avoin pajupuhdistamo, muokattu (Center for Recirkulering, 2010)

### 4.2.3 Pajusuodattamo

Pajusuodattamot (engl. Willow Vegetation Filters) voivat olla myös järviruokoon perustuvia juurakkopuhdistamoja (engl. Constructed Wetlands). Koska järviruoko ei kykene haihduttamaan tehokkaasti fosforia, niin suodattamoihin istutetaan joskus sen sijaan pajuja. Tanskassa talousveden laatuun liittyvistä määräyksistä johtuen avoimen rakenteen pajusuodattamoa ei voi käyttää talousjätevesien puhdistamiseen pohjavesialueilla. Viranomaisten luvalla pajusuodattamoa voidaan kuitenkin käyttää maatalouden valumavesien-, lietelannan ja teollisuusjätevesien käsittelyssä (Gregersen, 2015).

Kuvassa 10 esitetty puhdistetun jäteveden kiertoon perustuva suodattamo voidaan rakentaa kiinteistöön, jossa tontin alue on rajallinen. Kustannukset voivat olla tosin korkeammat lisäteknikasta johtuen. Jos tontin alue on tarpeeksi laaja, niin suuremman suodattamon rakentaminen voi tulla edullisemmaksi (Center for Recirkulering, 2010).

Professori Hans Brix ja Carlos A. Arias ovat tutkineet kuvan 10 mukaisen järviruo'olla varustetun suodattamon toimintaa ja heidän tulosten mukaan suodattamo täytti Tanskan ympäristöministeriön asettamat jäteveden puhdistusvaatimukset 95 % orgaaniselle aineelle ja 90 % nitrifikaatiolle. Jotta fosforin 90 % puhdistusvaatimus saavutetaan, niin saostussäiliöön voidaan lisätä fosforin kemiallisen saostuksen aiheuttavaa polyalumiinikloridia (Brix & Arias, 2005, s.491). Tästä syystä suodattamoissa käytetään joskus pajuja, jolloin myös fosforin 90 % puhdistusvaatimus täyttyy (Gregersen, 2015).



KUVA 10: Pajusuodattamo, muokattu (Center for Recirkulering, 2010)

Pajusuodattamo on toimintaperiaatteeltaan erilaisempi, koska avoimessa ja suljetussa pajupuhdistamossa ei ole puhdistetun jäteveden kierto- ja poistoputkea. Tästä syystä pajusuodattamoita hyödynnetään myös tekojärvien vesien käsittelyssä, jolloin puhdistettu vesi voidaan palauttaa järveen. Tanskassa Givskudin eläintarhassa on 12 vuotta käytössä ollut 3,2 hehtaarin pajusuodattamo, jossa käsitellään 10 000 m<sup>3</sup> eläinten jätevesiä, päälystettyjen teiden pintavesiä ja kompostoitua lietettä (Gregersen, 2015).

Pajusuodattamossa yhden tai useamman kotitalouden kaikki jätevedet johdetaan saostussäiliöön, jossa kiintoaineet ja rasva laskeutetaan, etteivät ne pääse vahingoittamaan pumppua, levityskerrosta ja suodattamon pintaa. Saostussäiliöstä laskeutettu jätevesi johdetaan pumppuun, joka levittää jäteveden jakoputkien kautta suodattamon pinnalle useasti päivässä. Jotta levitysjärjestelmällä olisi tarpeeksi painetta ja jäteveden puhdistusprosessi saataisiin hyödynnettyä tehokkaimmin suodattamon pinnalla, niin levitys täytyy toteuttaa pumpulla tai venttiilillä, joka aukeaa kun tietty määrä jätevettä on kerääntynyt pumppusäiliöön (Center for Recirkulering, 2010).

Suodattamon aktiivinen osa on bakteerikanta, joka toimii hiekan ja pajujen juuriston seassa. Bakteerikanta toimii monimutkaisessa prosessissa, jossa monien muuttujien, kuten jäteveden virtauksen, hapen, lämpötilan, pH:n sekä kuivumiseen ja palauttamiseen kuluneiden aikojen tulee täytyä. Bakteerikannan tulee olla toimintakykyinen jäteveden typen poistolle ja siirrolle vapaaksi typeksi ilmakehään, jossa vapaata typpeä on 80 %. Muiden bakteerien täytyy pystyä hajottamaan aineita, jotka mitataan BHK<sub>7</sub> ja KHK -yhdisteinä (Center for Recirkulering, 2010)

Järviruokoon perustuvan suodattamon heikkona puolena on, että herkille alueille ei ole sallittua johtaa poistoputken kautta järviruoko-suodattamon menetelmillä puhdistettua vettä ympäristölle asetetuista fosforirajoituksista johtuen. Tästä syystä suodattamoissa käytetään joskus pajua ylimääräisen fosforin sitomiseen. Herkillä alueilla järviruoko-suodattamon jakosäiliön jälkeen on tarpeellista asentaa kalkkituotteella varustettu säiliö, jotta ylimääräinen fosfori saadaan sidottua. Toinen tapa fosforin sitomiseen on kemiallinen saostus, joka toteutetaan laittamalla saostussäiliöön alumiinituotetta, kuten polyalumiinikloridia. Kun saostussäiliö tyhjennetään kerran vuodessa, niin alumiinituotteen sidottu fosfori sekä saostussäiliön rasva ja kiintoaineet kuljetetaan kunnalliseen jätevedenpuhdistamoon (Center for Recirkulering, 2010).



Jotta suodattamojärjestelmästä saadaan pienikokoinen, niin puhdistetun jäteveden poistoputki jaetaan jakosäiliössä, josta puolet puhdistetusta vedestä virtaa takaisin pumppusäiliöön tai saostussäiliöön. Tällä tavalla jätevesi läpäisee suodatusaltaan optimaalisen bakteerikasvuston kahteen kertaan. Jos korkeuseroista johtuen puhdistettu jätevesi ei pysty virtaamaan painovoimaisesti takaisin pumppusäiliöön tai saostussäiliöön, niin puhdistettu jätevesi tarvitsee toisen pumpun voittaakseen korkeuseron. Muissa tapauksissa korkeustaso voidaan tehdä optimaaliseksi, jotta puhdistettu jätevesi pääsee kiertämään jakosäiliön kautta painovoimaisesti takaisin pumppusäiliöön tai saostussäiliöön (Center for Recirkulering, 2010).

Pajusuodattamot soveltuvat myös teollisen jäteveden käsittelyyn. Kuvassa 11 on esitettyä toinen puolikas pajusuodattamosta, joka käsittelee Tanskassa Vemmelevissä sijaitsevan laitoksen prosessivesiä raskasmetalleista, öljystä ja muista epäpuhtauksista ennen kuin vesi käytetään uudelleen laitoksessa. Pajusuodattamon avulla laitos on säästänyt kymmenkertaisen määrän käyttövettä. Pajusuodattamo on kustannustehokas ratkaisu ja täyttää Tanskan korkeat jäteveden puhdistusvaatimukset ennen kuin käsitelty jätevesi johdetaan purkupaikkaan tai käytetään uudelleen (Gregersen, 2015).



KUVA 11: Teollisen jäteveden pajusuodattamo (Center for Recirkulering, 2010)

#### 4.2.4 Energiapajuviljelmä erilaisten jätevesien ja lietteiden käsittelijänä

Energiapajuviljelmillä on todettu olevan hyödyllisiä ominaisuuksia vesihuoltolaitosten prosessivesien, kaatopaikkojen suotovesien ja turvetuotantoalueiden valumavesien puhdistamisessa. Ravinnepitoisten vesien ja lietteiden käsittely pajuviljelmässä edistää sadon kasvua, vesien puhdistumista ja keinolannoitteiden vähentämistä. Kastelemalla pajuviljelmää vesihuoltolaitoksen prosessivedellä, saadaan ravinteet hyödynnettyä sen sijaan, että ne johdetaan vesistöön. Jos pajuviljelmällä korvataan puhdistusprosesseja, niin vedenkäsittely tulee myös edullisemmaksi (Börjesson & Berndes, 2006, s.430-431).

Kesällä 2016 Kuusamon jätevedenpuhdistamolla aloitetaan Oulun yliopiston hanke, jonka tavoitteena on tutkia eri pajulajikkeiden toimintaa pohjoisissa olosuhteissa, kun viljelmään johdetaan prosessivettä ja raskasmetallia sisältäviä hulevesiä. Viljelmään istutetaan esimerkiksi Karinia, Klaraa, Gudrunia sekä muutama kappale uutta ja talvenkestävää Winter-lajiketta (Pohjonen, 2016).

Vuonna 2014 perustettu Pajupojat Oy on kehittänyt Kasvattamo- ja Puhdistamokonseptit, joita tutkitaan ja pilotoidaan Ympäristöministeriön RAKI-ohjelmassa (Ravinteiden kierrätyksen edistämistä ja Saaristomeren tilan parantamista koskeva ohjelma) vuoden 2016 aikana. Kasvattamo-konseptissa ylimääräisillä ravinteilla tuotettu hiilipitoinen pajubiomassa kierrätetään maahan tai jatkojalostetaan muun muassa biohiileksi. Puhdistamokonseptissa pajuun perustuvat hake- ja biohiilifiltterit yhdessä pajuviljelmän kanssa sitovat veden ravinteita. Pajupojat Oy:n (2016) tavoitteena on perustaa muita pajuviljelmiä yhteensä 150 hehtaarin alueella kevään 2016 aikana.

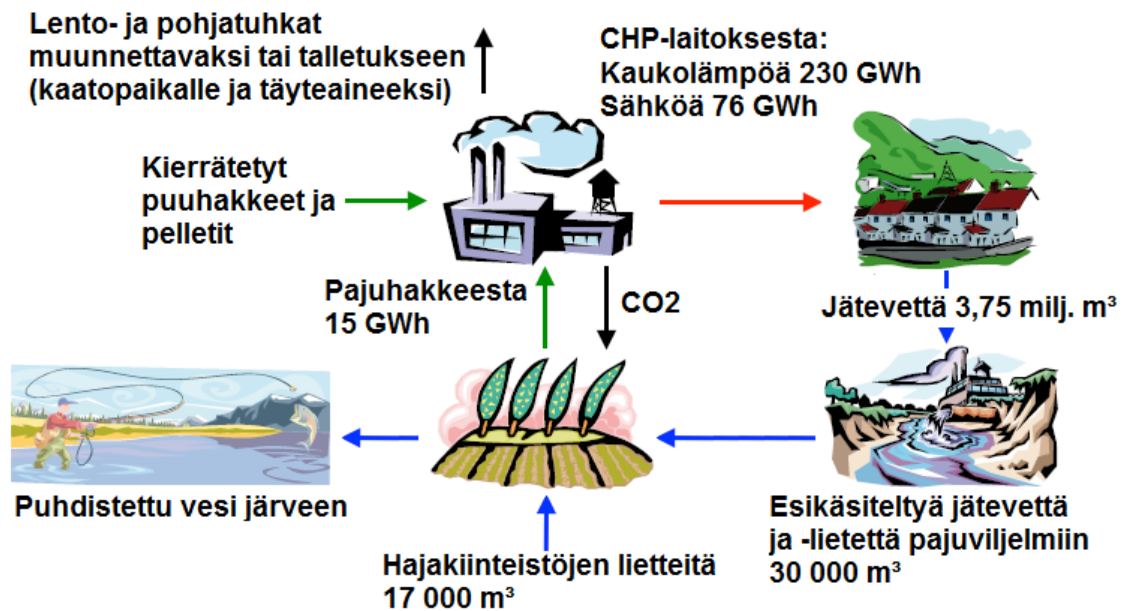
Vuonna 2014 Biodiili Oy kehitti konseptin, jonka avulla Jyväskylän Mustankorkea Oy:n jätteenkäsittelylaitoksen haitalliset suotovedet haihdutetaan pajuviljelmillä ja jätevedenpuhdistamolle johdettava vesimäärä vähentyy. Pajuja kasvatetaan suljetuilla kaatopaikka-alueilla hyödyntäen komposteista, voimalaitostuhkasta ja kierrätysmaaineksista valmistettuja kasvualustoja sekä suotovesikastelua. Keväällä 2014 pajua istutettiin 3 hehtaaria ja kesällä 2015 pajua istutettiin 4,5 hehtaaria lisää. Korjatut pajut tuottavat Keljonlahden CHP-laitoksessa 500-700 MWh energiaa vuodessa, jonka lisäksi murskattua pajua käytetään kompostointiaineena kaatopaikan kompostointilaitoksessa (Mustankorkea, 2015, s.8-9). Ruotsissakin 20 kohteessa hyödynnetään pajuviljelmiä kaatopaikkojen suotovesien haihduttamisessa (Dimitriou & Aronsson, 2005, s.49).

VTT:n koordinoimassa Energiapajun kestävä tuotanto ja käyttö -projektissa tutkittiin pajun soveltuvuutta Vapo Oy:n Raatteikonsuon turvetuotantoalueen valumavesien puhdistamisessa. Raatteikonsuon 1,3 hehtaarin pajuviiljelmä perustettiin keväällä 2012 ja viiljelmään istutettiin siperianpajua (*Salix schwerinii*). Valumavedet pumpataan laskeutusaltaan kautta rei'itettyä putkea pitkin pajukentälle, jossa pajut sitovat turveveden sisältämiä ravinteita ja kiintoaine pidättyy maaperään. Puhdistettu vesi kulkeutuu viiljelmän alapuolella olevan mittapadon kautta vesistöön (ForestEnergy2020, 2015). Kesällä 2013 suoritettujen mittausten mukaan viiljelmä pidätti fosforia 99-100 %, typpeä 90-99 % ja kiintoainetta 22-38 % (Niemi, 2014, s.32). Kesällä 2014 viiljelmä pidätti fosforia ja typpeä 55-58 % ja kiintoainetta 80 % (ForestEnergy2020, 2015). Pajuviiljelmä oli Niemen (2014, s.31) vertailun perusteella pintavalutuskentän ja maaperäimeytyksen kanssa parhaimmat turvetuotantoalueiden valumavesien puhdistusmenetelmät.

Energiapajun kestävä tuotanto ja käyttö -projektissa tutkittiin myös pajuviiljelmän soveltuvuutta Outokummun jätevedenpuhdistamon prosessivesien puhdistamisessa. Jätevedenpuhdistamolla ongelmana oli puhdistetun jäteveden sisältämä runsas typen ja fosforin määrä. Outokummun 0,3 hehtaarin pajuviiljelmä perustettiin vuoden 2012 kesällä jätevedenpuhdistamon viereen. Ennen kuin siperianpajut (*Salix schwerinii*) istutettiin, niin rivien alle laitettiin muovi torjumaan rikkaruohojen kasvua. Prosessivesi pumpattiin 800 mm runkoputkea pitkin, josta haarautui 40 mm jakoputket pajurivien läpi. Jakoputkissa on 2 metrin välein reikiä, joilla varmistetaan veden tasainen jakautuminen (Leinonen & Villa, 2013, s.2). Kesällä 2013 suoritettujen mittausten mukaan viiljelmä pidätti tyypestä 97 - 99 %, fosforista 96 - 99 % ja kiintoaineesta 97 %. Vuonna 2013 satomäärän kasvu oli myös 8,8 t/ha, kun taas läheisellä Siikasalmen pajuviiljelmällä, jota ei kasteltu prosessivesillä, oli vain 1,66 t/ha (Niemi, 2014, s.29).

Ruotsalaisten tutkimusten mukaan pajuviiljelmällä voidaan korvata kemiallisia puhdistusprosesseja, kun viiljelmään johdetaan käsittelemätöntä jätevettä. Tällaisia puhdistusprosesseja ovat typen denitrifikaatio-nitrifikaatio-prosessi ja fosforin kemiallinen saostus. Börjessonin tutkimuksen (1999, s.145) mukaan pajuviiljelmän teho käsittelemättömän jäteveden puhdistamisessa oli tyypelle ja fosforille 75 - 95 %, kun viiljelmää kasteltiin 500 - 1000 mm/ha vuodessa. Dimitrioun ja Aronssonin tutkimuksen (2010, s.166) mukaan pajuviiljelmän teho käsittelemättömien jätevesien puhdistamisessa oli tyypelle 96 % ja fosforille 94 %. Suomessa jätevedenpuhdistamojen keskimääräinen puhdistustehokkuus on tyypelle 56 % ja fosforille 96 % (Vesilaitosyhdistys, 2013).

Ruotsissa Enköpingin kaupunki tunnetaan konseptistaan, jossa jätevedenpuhdistamo, CHP-laitos ja pajuviiljelijät toimivat yhteistyössä. Enköping-konsepti on esitettyä kuvassa 12. Jätevedenpuhdistamo maksaa pajuviiljelijöille lietteiden käsittelystä ja voimalaitos ostaa tuotetut pajuviiljelijä markkinahintaan. 1000 hehtaarin pajuviiljelijä lannoitetaan touko-syyskuun aikana jätevedenpuhdistamon lietteellä ja pajut haketetaan kolmen vuoden välein sähkö- ja kaukolämpöenergiaksi. Jätevedenpuhdistamolla on myös 75 hehtaarin pajuviiljelijä, jossa käsitellään puhdistamon prosessivedet (Dimitriou & Aronsson, 2005, s.48) Aikaisemmin pajuviiljelijä voitiin lannoittaa tuhkan ja lietteen seoksella, mutta nykyään se ei enää ole mahdollista, koska kierrätyspuun lisääntynyt poltto kasvattaa tuhkan raskasmetallipitoisuutta (Linköping University, 2014, s.4).



KUVA 12: Enköping-konseptin prosessi, muokattu (Linköping University, 2014, s.2)

Tämän prosessin ansiosta Enköpingin jätevedenpuhdistamon 25 % typpeä sisältävää prosessivettä ei tarvitse johtaa vesistöön, vaan ylimääräiset ravinteet saadaan hyödynnettyä pajuviiljelijä satomäärien kasvattamisessa ja kaupungin voimalaitos saa nopeasti kasvavaa, hiilidioksidineutraalia polttoainetta. Pajuviiljelijä lannoituskulut myös laskevat, kun pajuviiljelijä lannoitetaan prosessivesillä ja -lietteillä (Börjesson & Berndes, 2006, s.436). Ruotsissa 80 - 90 % pajuviiljelijä lannoitetaan erilaisilla jätevesillä tai tuhkan ja lietteen seoksilla (Dimitriou & Aronsson, 2010, s.161). Ruotsissa on 30 pajuviiljelijä jätevedenpuhdistamojen yhteydessä. Enköpingissä jätevedenpuhdistamon viereisellä 75 hehtaarin pajuviiljelijällä saadaan prosessivedestä poistettua 11 000 kg typpeä ja 200 kg fosforia vuodessa (Leinonen & Villa, 2013, s.2).

Pajun soveltuvuutta jätevesien puhdistamiseen on tutkittu myös eräässä projektissa, jossa viljelmiä perustettiin Ruotsiin, Irlantiin, Ranskaan ja Kreikkaan. Tutkimuksen mukaan raskasmetallit ja jätevesien ravinteet eivät aiheuttaneet riskiä pohjaveden ja maaperän saastumiselle, vaikka ravinteiden määrät ylittivät joissakin tapauksissa pajuviljelmien ravinnetarpeet. Riskinä nähtiin kuitenkin patogeeneit, jotka voivat kulkeutua aerosolien tai pinta- ja pohjavesien mukana (Larsson ym. 2003, s.9-10).

Aerosolien ehkäisyksi suositellaan joko matalapaineisia sadettajia tai veden levittämistä maanpinnalla. Jätevesikastelua tulisi välttää savimailla ja korkean pohjaveden alueilla. Jäteveden käsittelyllä, kuten laskeutuksella ja biologisella prosessilla, voidaan vähentää patogeeneiden määrää ja leviämiskätkiä (Larsson ym. 2003, s.9-10). Pajuviljelmiä pidättää ravinteita parhaiten kasvukauden aikana, joten talvella jätevettä ei voi johtaa kasvuston pinnalle. Talvella jätevesi voidaan varastoida altaisiin ja kasvukaudella johtaa taas pajuviljelmään (Dimitriou & Aronsson, 2005, s.48). Suljettuun pajupuhdistamoon voidaan johtaa jätevettä talvellakin ja patogeeneit hajoavat BIO-BLOK -paloista koostuvassa ja korakenteessa ja maaperässä (Lynch & Gregersen, 2013, s. 8-10)

Jätevedenpuhdistamon, umpi- tai saostussäiliön lietettä voidaan käyttää pajuviljelmien lannoitteena, jos kunnan jätehuoltomääräykset ja riskit huomioidaan sekä lietteet esikäsitellään. Lietteen ravinteet suositellaan hyödynnettäväksi kiinteistössä kompostoinnin jälkeen, koska lietteen kuljetus jätevedenpuhdistamolle kuormittaa ympäristöä ja laitoksen puhdistusprosesseja. Lannoitteena käytetty jätevesiliete parantaa myös maaperän rakennetta ja pidätyskykyä (Särkelä, Lahti & Haapala, 2013, s.6-7). Kalkkistabilointia ei suositella tehtäväksi saostussäiliössä, koska kalkki voi tuhota puhdistusprosessille tärkeät mikrobit (LVI 23-10540, 2013, s.13). Ruokakasvien kohdalla lietteen lannoitekäytölle on olemassa vaativia määräyksiä, jotka ovat esitettyinä lannoitevalmistelaisissa (539/2006) ja nitraattiasetuksessa (1261/2015). Pajuviljelmien kohdalla määräykset eivät ole yhtä vaativia. Ruotsalaisten tutkimusten mukaan liete ei merkittävästi lisää maaperän raskasmetallipitoisuutta (Berndes & Börjesson, 2007, s.6).

Poltetun pajuhakkeen tuhkat voidaan hyödyntää lannoitteena pajuviljelmällä, jos tuhkan raskasmetallipitoisuudet eivät ylitä tämän työn luvussa 8.3 mainittuja pitoisuuksia. Pajutuhka sisältää kalsiumia, joten erillistä kalkitsemista ei välttämättä tarvita pellolla. Myös pajuhaketta voidaan käyttää kuivikkeena lannan mukana peltojen lannoituksessa. Paras lannoite on tuhkan ja lietelannan yhdistelmä (Leinonen & Villa, 2013, s.2).

## 5 PAJUPUHDISTAMON SUUNNITTELU JA MITOITUS

Suljetun pajupuhdistamon tehokkuuden kannalta paras sijainti on aurinkoinen ja tuulinen alue. Lämmin ja tuulinen paikka edistää pajujen kasvamista ja haihduttamista, jolloin jäteveden ravinteetkin imeytyvät parhaiten. Pajupuhdistamon voi perustaa metsän viereen, jos metsä sijaitsee puhdistamon pohjoispuolella, eikä aiheuta varjostusta. Pajujen ääntä eristävän vaikutuksen ansiosta puhdistamo voidaan perustaa myös maantien viereen. Puhdistamo ei suositella perustettavaksi saviselle maaperälle, jossa pohjaveden pinta on korkealla, koska rakentaminen hankaloituu veden virratessa altaaseen (Lynch, 2016). Turvaetäisyydet ovat esitettyinä taulukossa 3.

TAULUKKO 3: Suljetun pajupuhdistamon turvaetäisyydet (Gregersen, 2008, s.1)

Yhden kotitalouden pohjavesikaivon	15 metriä
2-10 kotitalouden pohjavesikaivon	30 metriä
Yli 10 kotitalouden pohjavesikaivon	50 metriä
Jokiin, järviin ja salaojiin	5 metriä
Kiinteistön rajaan	0 - 2,5 metriä
Pohjaveteen	0

Suljetun pajupuhdistamon allaskoon mitoittamiseen ei ole mahdollista esittää ohjetta, koska Gregersen laskee allaskoon kehittämällään ohjelmalla, jota hän ei halua julkaista liikesalaisuudesta johtuen. Tästä syystä suljetun pajupuhdistamon toteuttamista suunnittelevan tulisi ottaa yhteyttä L&G Pajupuhdistamo Oy:n Paul Lynchiin tai Peder Gregerseniin. Sain kuitenkin luvan esittää suunnitteluun ja mitoitukseen vaikuttavia asioita. Jokaisen pajupuhdistamon suunnittelu ja mitoitus on yksilöllistä, eikä tietyn pajupuhdistamon tietoja saa käyttää toisessa kohteessa. Tarkka mitoitus on tärkeää, jotta kuivumiselta ja ylivuodoilta vältytään (Gregersen, 2015).

Pajupuhdistamon allaskoon mitoituksessa huomioidaan kiinteistön vuosittaisen vedenkulutuksen lisäksi alueen keskimääräinen sadanta ja haihdunta. Altaan reunavallit estävät pintavalunnan altaaseen. Pajut haihduttavat vettä jonkin verran talvella, koska lämmin jätevesi sulattaa juuristoaluetta. Talvella altaaseen varastoitu jäte- ja sadevesi haihtuu kevästä lähtien. Pajuviljelmässä voidaan kasvattaa muita kasvi- ja puulajeja, mutta nekin otetaan huomioon mitoituksessa, ettei pajujen toimintakyky heikkene (Lynch, 2016).

Asukasmäärään perustuvat jäteveden kuormitusluvut, joita käsittelen luvussa 3, otetaan huomioon mitoituksessa, koska jätevesijärjestelmän tulee poistaa ravinnekuormitukset jätevesiasetuksen (209/2011) tai kunnan vaatimusten mukaisesti. Asetuksen mukaan jätevesijärjestelmä mitoitetaan vähintään viidelle henkilölle. Nykyisin käytettävät pajulajikkeet sitovat ensimmäisen ja toisen vuoden aikana tehokkaasti typpeä ja fosforia. Kolmannesta vuodesta eteenpäin ravinteiden poisto ja pajujen kasvu kaksinkertaistuvat (Gregersen, 2008, s.3) Pajupuhdistamossa orgaaninen aines hajoaa maaperän makro- ja mikro-organismien, bakteerien sekä sienten avulla. Pajujen juuristo imee hajotetut ravinteet (Ahola, 2012, s.10).

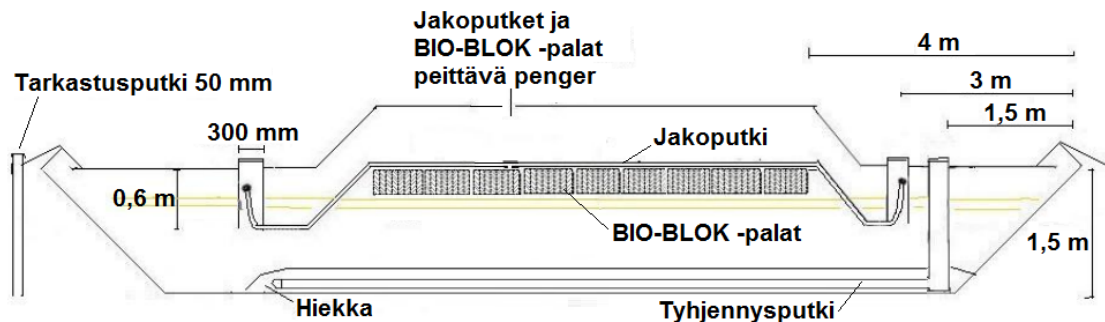
Tanskassa puhdistamoaltaita on rakennettu 48 - 480 m<sup>2</sup> kokoluokissa. Tanskassa yhden kotitalouden suljettu pajupuhdistamo on kuitenkin harvoin suurempi kuin 240 m<sup>2</sup>. Yleisen rakennusmenetelmän mukaan puhdistamoallas rakennetaan 8 metriä leveäksi, 1,5 metriä syväksi ja tarvittaessa niin pitkäksi kuin mahdollista. Reunavallit tulee rakentaa 45 asteen kulmaan (Center for Recirkulering, 2010).

Uudella rakennusmenetelmällä (kuvat 13 ja 14) allaskokoa on saatu pienennettyä 6 metriä leveäksi, kun altaan pinta-alasta peitetään 63 %. 6-8 metrin leveys on optimaalinen mitta kuudelle pajurivistölle ja keskiakselin imeytysjärjestelmälle. Lynchin pajupuhdistamo Inkoossa on kooltaan 6 x 28 metriä eli 168 m<sup>2</sup>. Ensimmäisenä vuonna puhdistamo peitetään muovilla (kuva 15), koska nuoret pajut eivät kykene sitomaan suurinta osaa sademäärästä ja sadevesi saadaan ohjattua kasvualustan ohi tyhjennysputkiin. Toisena vuonna muovi poistetaan, jolloin rikkakasvit eivät ole enää haitaksi ja pajut sitovat vettä tehokkaammin (Lynch, 2016).

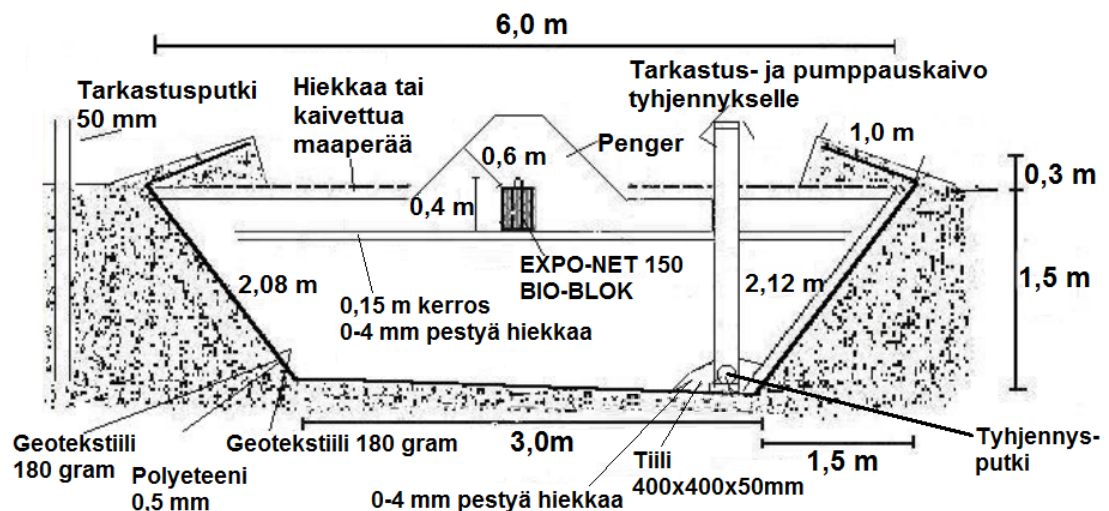
Usean kotitalouden keskitetyssä pajupuhdistamossa allaskoko pienenee kotitaloutta kohden. Jos puhdistamoaltaita rakennetaan useampi, kuten usean kotitalouden keskitetyssä ratkaisussa tehdään, niin altaiden välille tulee jättää vähintään 5 metrin väli, jotta ilma virtaa paremmin ja pajut haihduttavat vettä tehokkaammin. Tällöin myös huolto ja pajujen korjuu on helpompaa altaiden välissä. Puhdistamoaltaiden koko tulee olla sama tai kaksinkertainen toisiinsa nähden, jotta vedenjakelu eri altaiden kesken olisi tasaista. Jokaiselle altaalle tarvitaan yksi pumppusäiliö (Lynch, 2016).

Ennen rakentamista tulee varmistaa, ettei pinta- ja pohjavesi aiheuta ongelmia altaan rakennustöille ja että maaperä on vaakatasoinen. Veden virtaus maassa voidaan varmistaa 1,5 metriä syvällä kaivuulla, joka jätetään auki 48 tunnin ajaksi. Altaan kaivuussa osa maaperästä tulee jättää syrjään reunavalleja varten. Jos maa on savi- tai lietepitoista, niin sekaan tarvitaan pestyä hiekkaa, jotta ravinteet levittäytyvät pajuille, eikä jätevesi nouse pinnalle. Terävät kivet tulee poistaa altaan reunoilta tai peittää 50 mm paksulla hiekkakerroksella. Geotekstiili ja polyeteenikalvo voidaan tarvittaessa kiinnittää 10 mm terästapeilla maanpinnalla (Gregersen, 2008, s.8-9).

Uudella rakennusmenetelmällä (kuvat 13 ja 14) suljetun pajupuhdistamon allaskokoa ja talven aikaista varastointitilaa jäte- ja sadevesille on saatu pienennettyä. Vaihtoehtoisessa ratkaisussa altaasta rakennetaan 6 metriä leveä ja vuorauksena käytetään 10 metriä leveää geotekstiili- ja polyeteenikalvoa. Toisena vuonna ylimääräiset metrin levyiset kalvot taitetaan altaan reunojen yli 20 asteen kulmassa, jolloin vain 63 % pinta-alasta jää sadevedelle alttiiksi. Pajujen haihdutuskyky pysyy samana (Gregersen, 2015). Seuraavissa kuvissa esitetyt tiedot ovat vain viitteellisiä.



KUVA 13: Uusi rakennusmenetelmä, muokattu (L&G Pajupuhdistamo Oy, 2013, s.19)



KUVA 14: Rakenne toisena vuonna, muokattu (L&G Pajupuhdistamo Oy, 2013, s.14)



Altaan täytön aikana maaperää ei tule tiivistää raskaalla kalustolla, koska maaperän tilavuuden tulee pysyä hyvänä. Täyttö aloitetaan altaan keskeltä kohti reunoja. Metrin korkeudelle asetetaan kuvan 14 mukaisesti noin 0,1 metriä paksu hiekkakerros. Jäteveden levitysjärjestelmä asetetaan pajukentän keskelle hiekkakerroksen päälle 4 metrin etäisyydelle altaan päädyistä (Gregersen, 2008, s.10).

Jäteveden levitysjärjestelmä, joka koostuu jakoputkesta ja BIO-BLOK -paloista, peitetään penkereen alle 0,6 metrin syvyyteen. Levitysjärjestelmän päälle ei saa istuttaa pajuja. Kaivetusta maaperästä tehty pengerrus estää jäteveden hajun leviämisen ja imeytysputken jäätyksen. Sadevesi työntää jäteveden paineen alaiseksi altaan pohjalle ja bakteerit hajottavat patogeeneja BIO-BLOK -paloissa ja maaperässä (Lynch, 2016).

Altaan pinta tulee täyttää pohjamaalla, jossa ei ole rikkaruohon siemeniä. Levitysjärjestelmän peittävä 0,6 metriä korkea pengerrus tulee olla 1 metriä pidempi kummassakin päädyssä. Levitysjärjestelmän peitossa käytetään ruohoa kasvattavaa pintamaata, joka estää penkereen eroosion. Altaan reunojen kalvot taitetaan kuvan 14 mukaisesti yli 20 asteen kulmassa. Talvella rakennettu allas peitetään 8 metriä leveällä muovikatteella, joka poistetaan keväällä ennen istutuksia (Gregersen, 2008, s.11).

Kuvassa 15 on esitettyä Lynchin suljettu pajupuhdistamo Inkoossa. Allas on peitetty ensimmäiseksi vuodeksi muovilla, jotta sadevesi ei täytä allasta ja rikkaruohot torjutaan. Vuonna 2013 pajupuhdistamossa mitattiin vuoden ikäisellä Klara-pajulajikkeella Suomen puumaisten kasvilajien toinen pituusennätys, 460 cm (Pohjonen, 2016, s.82).



KUVA 15: Peitetty allas (Lynch, 2012) ja altaan kaksivuotiaat pajut (Pohjonen, 2014)

## 6 PAJUPUHDISTAMON PERUSTAMINEN JA YLLÄPITO

Keväällä maan sulettua pajupistokkaat istutetaan puhdistamoaltaan pinnalle ja jätevesi johdetaan altaaseen. Aikaisemmin 20 cm pituisia pistokkaita istutettiin 10 - 15 cm syvyyteen, mutta Lynch ja Gregersen ovat todenneet, että 1 m pituiset pistokkaat ovat immuunimpia rikkakasveille. Ensimmäisenä vuonna tulee huolehtia kerran kuussa, että pumppu ja saostussäiliö toimivat, rikkakasvit torjutaan, pistokkaat juurtuvat ja pajut ovat noin 2 m pitkiä elokuun puoliväliin mennessä. Vedenpinta tulee tarkistaa tarkastuskaivojen kautta: jos korkeus on 0,1 m lähempänä maanpinnasta, niin vettä täytyy pumpata pois tyhjennysputken kautta. Ensimmäisenä vuonna pajut voidaan istuttaa muovikatteen läpi, jolloin rikkaruohot kuolevat (Lynch, 2016).

Ensimmäisen vuoden jälkeen ennen roudan sulamista pajujen varret leikataan 15 cm mittaisiksi ja muovikate poistetaan. Pajut haihduttavat ja kasvavat nopeasti sekä varjostavat rikkakasveja. Altaan vieressä kasvavaa heinikkoa voidaan leikata tarpeen mukaan. Pumpun ja saostussäiliön toimintaa tulee tarkkailla ja säiliö tyhjentää kiintoaineksesta keväisin. Tyhjennyksen jälkeen säiliö huuhdellaan vedellä ja vesi pumpataan putkien ja avattujen kansien läpi. Liete kuljetetaan vesihuoltolaitokselle tai se käytetään kompostoituna lannoitteena pajuviljelmällä. Altaan tarkastuskaivon ja -putken kautta voidaan valvoa altaan vedenpinnan tasoa. Jos altaaseen kertyy liikaa suolaa, niin allas tyhjenetään tai pestään pumppaamalla vettä tarkastuskaivon ja -putken kautta (Lynch, 2016).

Kolmannesta vuodesta eteenpäin puhdistamoaltaaseen istutetut pajut leikataan keväisin, koska uusi kasvusto haihduttaa ja sitoo parhaiten. Leikkaamiseen on kolme eri tapaa (Ahola, 2012, s.10):

- 1) 1/3 pajuista poistetaan vuosittain eli kolmivuotiset pajunvesat leikataan noin 10cm korkeudelta alas talvella. Kasvu pysyy tehokkaana ja isot versot haihduttavat tehokkaasti keväällä lehtien puhjettua.
- 2) Kaikki pajut leikataan kerralla vuosittain, joka toinen tai joka kolmas vuosi.
- 3) Kolmen vuoden kierrossa ensimmäisenä vuonna leikataan puolet pajuista, toisena vuonna leikataan ensimmäisenä vuonna leikkaamatta jääneet ja kolmantena vuonna ei leikata. Neljäntenä vuonna kierros aloitetaan alusta.

## 6.1 Pajulajikkeet ja niiden ominaisuudet

Pajukasvien heimoon (*Salicaceae*) kuuluu Suomessa vain kaksi sukulaista, pajut (*Salix*) sekä haavat ja poppelit (*Populus*). Maailmalla pajujen suvussa on noin 450 kaksikotista varpu-, pensas- tai puumaista lajia. Suomessa erilaisia pajulajeja kasvaa 26 lajia ja jos alalajit ja risteymät lasketaan mukaan, niin määräksi saadaan 50 (Luontoportti, 2016). Tästä määrästä on valikoitu puolenkymmentä lajia, jotka ominaisuuksiltaan ja kasvunopeudeltaan sopivat hakepajun viljelyyn (Suomen Energiapaju Oy, 2009, s.3).

Tärkeitä pajulajeja ovat ainakin koripaju (*Salix viminalis*), vannepaju (*S. dasyclados* tai *S. gmelinii*), siperianpaju (*S. schwerinii*), vesipaju (*S. aquatica*) ja mustuvapaju (*S. myrsinifolia*). Näiden lajien risteytyksiä on tehty 1970-luvulta lähtien ja nykyään pajua viljellään parhailla hybridilajikkeilla. Jalostuksella parannetaan lajien talvenkestävyyttä sekä vastustuskykyä taudeille ja tuholaisille (Suomen Energiapaju Oy, 2009, s.3). Etelä- ja Keski-Suomeen sekä hallanaroille alueille suositellaan Karin (*Salix*-hybridi), Klara (*Salix*-hybridi) ja Gudrun (*S. gmelinii*) -lajikkeita (Pohjonen, 2016, s.82).

Aikaisemmin Tanskassa viljeltiin pajupuhdistamoissa Bjørn, Jorr ja Tora -lajikkeita, mutta nykyään ne on korvattu Karin, Klara ja Gudrun -lajikkeilla (Lynch, 2016). Karin ja Klara ovat talvenkestäviä, vastustuskykyisiä ja nopeakasvuisia. Gudrun on talvenkestävä, mutta ruosteenarempi. Karin on Jorrin ja Toran sukulainen, kun taas Klara on Bjørnin ja Jorrin sukulainen (Pohjonen, 2016, s.75 & 79). Taulukossa 4 on esitettyä kolmen pajukloonin tuottama biomassassa sekä ravinne- ja raskasmetallisisältö suljetussa pajupuhdistamossa kahden kasvukauden jälkeen.

TAULUKKO 4: Sisältö kahden kasvukauden jälkeen (Gregersen & Brix, 2001, s.410)

	"BJØRN"			"JORR"			"TORA"		
	Varsi	Lehdet	Yhteensä	Varsi	Lehdet	Yhteensä	Varsi	Lehdet	Yhteensä
<b>Biomassa (tonnia k-a/ha)</b>	9,4	1,4	<b>10,8</b>	10	2,1	<b>12,1</b>	10,1	1,5	<b>11,6</b>
<b>Ravinteet (kg/ha)</b>									
N - typpi	120	50	<b>170</b>	102	68	<b>170</b>	89	48	<b>137</b>
P - fosfori	26	7	<b>33</b>	27	11	<b>38</b>	26	4	<b>30</b>
K - kalium	85	62	<b>147</b>	121	92	<b>213</b>	123	75	<b>198</b>
<b>Raskasmetallit (g/ha)</b>									
Cd - kadmium	1,7	0,2	<b>1,9</b>	3,6	0,3	<b>3,9</b>	3,4	0,3	<b>3,7</b>
Pb - lyijy	0,4	0,3	<b>0,7</b>	0,5	0,7	<b>1,2</b>	-	0,4	-
Zn - sinkki	201	25	<b>226</b>	206	49	<b>255</b>	253	32	<b>285</b>
Cu - kupari	15	3	<b>18</b>	23	6	<b>29</b>	15,6	4,4	<b>20</b>
Ni - nikkeli	1,9	0,1	<b>2</b>	1,6	0,3	<b>1,9</b>	1,3	0,1	<b>1,4</b>
Cr - kromi	7,7	0,6	<b>8,3</b>	19,6	1,3	<b>20,9</b>	9,3	0,6	<b>9,9</b>
Hg - elohopea	0,2	0,1	<b>0,3</b>	0,2	0,2	<b>0,4</b>	0,2	0,1	<b>0,3</b>

## 6.2 Tuholaiset ja taudit

Pahimmat energiapajuviljelmiin kohdistuneet tuhot ovat johtuneet hallasta tai kylmän tuhoista talvella. Typpilannoitus heikentää kylmänkestävyyttä, joten typpilannoitusta ei tulisi lisätä kesäkuun jälkeen (Pohjonen, 2016) Pajujen hallan- ja talvenkestävyyttä on parannettu jalostuksilla. 1980- ja 1990-luvuilla Keski-Ruotsissa viljellyt lajikkeet eivät olleet riittävän kylmänkestäviä ja hallan tuhot olivat viljelmillä yleisiä. Uudet 2000-luvulla viljeltävät lajikkeet, kuten Karin, Klara ja Gudrun, kestävät pakkasta ja viljelyä on voitu levittää pohjoisemmaksi (Suomen Energiapaju Oy, 2009, s.11-12). Energiapajua viljellään myös suomalaisella ”Jyskylä” (*Salix myrsinifolia*), joka on talven- ja ruosteenkestävä sekä riittävän satoisa (Pohjonen, 2016, s.89).

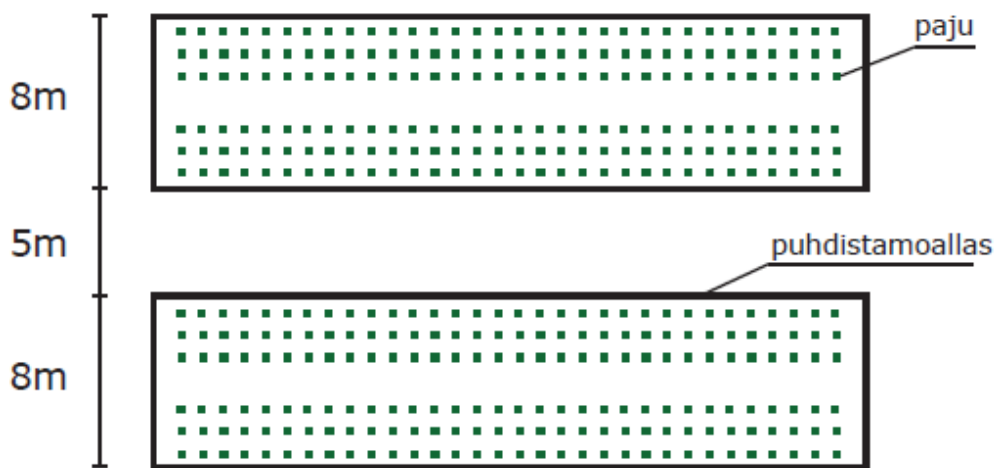
2000-luvulla viljeltävät Karin ja Klara -pajulajikkeet ovat vastustuskykyisiä ruostesienille (esim. *melampsora sp.*) ja pajun eri osia syöville hyönteisille, kuten lehtikuoriaisille. Gudrun on ruosteenarka, mutta vastustuskykyinen lehtikuoriaisille. Kemiaalista torjuntaa ei suositella, koska pajuviljelmät toimivat elinympäristönä linnuille, jotka syövät hyönteisiä. Hirvi saattaa syödä pajuja, jos viljelmä sijaitsee metsän keskellä. Pajujen hirvituhoja on esiintynyt vain pajukon laiteilla. Jyrsijöiden aiheuttamat pajutuhot ovat olleet vähäisiä (Suomen Energiapaju Oy, 2009, s.11-12). Suola ja kloori ovat haitallisia pajuille ja ravinteita hajottaville organismeille, mutta pajupuhdistamoissa näiden aiheuttamia ongelmia ei ole havaittu (Gregersen, 2008, s.14-15).

## 6.3 Pajuviljelmän uusiminen ja puhdistamon lopetus

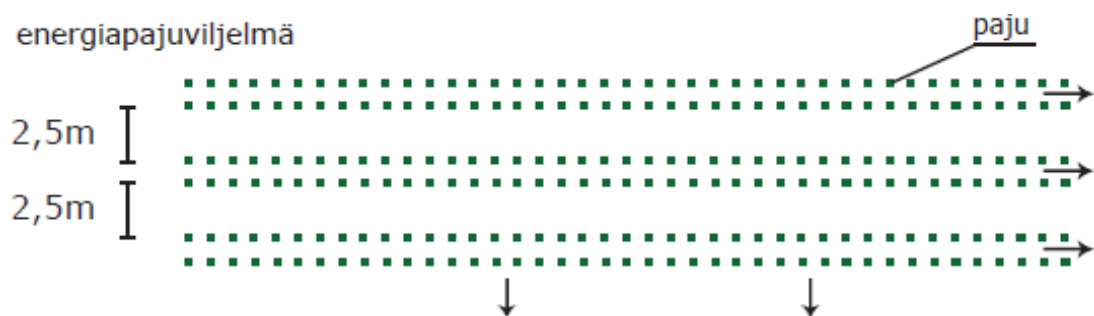
Pajupuhdistamon materiaalit kestävät yli 50 vuotta, mutta pajuviljelmä tulisi uusida 25 vuoden välein istuttamalla uusia pistokkaita vanhojen pajujen väliin huhti-toukokuun aikana ja leikkaamalla vanhat heinäkuussa. Vanhat pajut kuolevat talvella. Kun pajupuhdistamo lopetetaan, niin juurakot voidaan raivata kaivinkoneella ja järjestelmä kiertää kokonaan. Puutarhajyrsimöllä voidaan tappaa pienet pinta-alat, eikä glyfosaattia tarvita. Pajujen leviäminen luontoon ei ole ongelma, kun niitä ei jätetä maatumään. Pajukloonit eivät myöskään voi levitä luontoon siementämällä, koska ne ovat kaksikotisia (Lynch, 2016). Pajupuhdistamoja suuremmilla energiapajuviljelmillä juurakoiden hävittäminen on ongelmallisempaa, jos maaperän haluaa muuttaa vehnämaaksi. Tällöin kannot murskataan traktorijyrsimellä, kesannoidaan ja ruiskautetaan glyfosaatilla (Pohjonen, 2016).

## 7 PAJUPUHDISTAMON JA ENERGIAPAJUVILJELMÄN EROT

Pajupuhdistamon ja energiapajuviljelmän erona ovat niiden istutusperiaate, riviväli ja koko. Pajupuhdistamo on 6 - 8 metriä leveä yksittäinen istutettu allasalue tai ryhmä altaita viiden metrin välein, joiden syvyys on 1,5 metriä. Altaiden pituuden mitoitus riippuu johdettavan jäteveden määrästä, alueen keskimääräisestä sadannasta ja haihdutustasosta. Energiapajuviljelmä sen sijaan on paljon suurempi yhtenäinen peltoalue, jossa pajut istutetaan suoraan maahan joko miestyönä tai istutuskoneella (Ahola, 2012, s.24 & 58). Pajupuhdistamon ja energiapajuviljelmän erot voidaan nähdä kuvista 16 ja 17.



KUVA 16: Kahden altaan istutusperiaate, rivivälit ja koko (Ahola, 2012, s.25)



KUVA 17: Energiapajuviljelmän istutusperiaate, rivivälit ja koko (Ahola, 2012, s.25)

Kuten kuvista voidaan päätellä, kahdelle altaalle jaettu pajupuhdistamo muodostuu pitkistä ja erillisistä kasvustoista, kun taas energiapajuviljelmä on yhtenäinen ja jatkuu nuolien osoittamiin suuntiin niin pitkälle kuin viljelyalaa riittää (Ahola, 2012, s.25).

Pajupuhdistamon ja energiapajuviljelmän erona on myös leikkaamistapa, koska pajupuhdistamossa kasvusto on osittain yleensä 2 - 3 -vuotista. Pinta-alaltaan suuressa pajupuhdistamossa voidaan käyttää energiapajuviljelmän viljelykiertoa, jossa kaikki versot leikataan alas kolmen vuoden välein. Joka kolmas vuosi tehtävää koneellista korjuuta suositaan suurissa energiapajuviljelmissä pienemmän kokonaistyömäärän vuoksi (Aholta, 2012, s.24). Suomessa toteutettujen pajupuhdistamojen pinta-alat ovat kuitenkin vielä niin pieniä, että pajujen korjuu on kannattavampaa suorittaa moottorisahatyönä ja puhdistamon rakennetta ei tulisi tallata raskaalla koneistolla (Pohjonen, 2016).

Ruotsissa, jossa energiapajua viljellään maailmassa eniten, pajut korjataan usein suoraan hakkeeksi hakeharvesteri-korjuukoneilla ja hake poltetaan suoraan korjuun jälkeen tai keinokuivataan. Korjuu suoraan hakkeeksi tuottaa märkää haketta, jota ei voi kuivattaa luonnollisesti ja hakkeen säilyvyys huononee. Ruotsissa käytetään pajun korjuussa jonkin verran myös harvestereita, joilla paju korjataan kokopuuna. Nämä harvesterit ovat joko traktorin perässä vedettäviä tai itsenäisiä koneita. Molemmat korjuumenetelmät vaativat suuren laiteinvestoinnin ja pajuviljelmien korjuualan tulisi olla kyseisillä koneilla 50 - 300 hehtaaria vuodessa, jotta korjuu olisi kannattavaa (Sihvonen, Leinonen & Villa, 2013, s.6).

Suomessa energiapajun viljelyalaa on tällä hetkellä vain noin 100 hehtaaria, joten erikoiskoneiden hankinta ei ole ollut kannattavaa vähäisillä työmäärillä. Energiapajun korjuuseen käytettäviä erikoiskoneita on vuokrattu Suomeen ulkomailta kokeilumielessä. Korjuu on toistaiseksi tehty olemassa olevilla pajuviljelmillä joko miestyönä tai metsäkoneilla (hakkuupäällä varustetulla harvesterilla tai traktorilla). Korjuu miestyönä ja metsäkoneilla on huomattavasti hitaampaa kuin erikoiskoneilla (Sihvonen, Leinonen & Villa, 2013, s.6).

Energiapajun korjuu suoritetaan talvella lehtien pudottua joko kokopuuna, hakkeena tai paaleina. Kokopuuna erikoiskalustolla suoritettavalla korjuulla voidaan tuottaa laadukasta haketta pajujen varastokuivatuksen jälkeen. Kokopuukorjuu on myös edullista, mutta kalliimpaa kuin hakekorjuu. Hakekorjuun huonona puolena on, että tuotettu hake on märkää. Paalikorjuu ei vielä ole yleistynyt. Paalikorjuun etuja ovat helppo käsiteltävyys korjuun jälkeen lähikuljetuksessa ja paalit kuivuvat varastoitaessa (Sihvonen, Leinonen & Villa 2013, s.29 & 67).

## 8 PAJUN SOVELTUVUUS ENERGIAN TUOTANTOON

Paju on lyhytkiertoviljelyn puu, jolla voidaan tuottaa haketta lämpökeskuksiin sekä sähkö- ja kaukolämpölaitoksiin (Suomen Energiapaju Oy, 2009, s.3). Varastossa kuivattuja pajuja voidaan polttaa myös takassa muiden puupolttoaineiden kanssa (Lynch, 2016). Pajuhakkeella voidaan tuottaa pyrolyysin avulla bioöljyä, jolla voidaan korvata polttoöljyä teollisuuden lämpökattiloissa. Bioöljyä jatkojalostamalla saadaan erilaisia kemikaaleja, biodieseliä tai biokaasua (Oasmaa ym. 2009, s.1380).

### 8.1 Bioenergiantuotanto pajuilla

Bioenergiantuotanto on pääasiassa lämmön- tai sähköntuotantoa tai CHP-tuotantoa, eli yhdistettyä sähkön- ja lämmöntuotantoa (Combined Heat and Power). CHP-tuotannossa otetaan talteen sähköntuotannossa syntynyt hukkalämpö, joka syötetään esimerkiksi kaukolämpöverkkoon. Suomessa pajun polttokäytön osuus CHP-tuotannossa on 0-10 % ja kaukolämmöntuotannossa 0 - 100 % (Kärki & Hurskainen, 2015, s.3).

Kaukolämpö on yleisin lämmitysmuoto Suomessa. Kaukolämpö siirretään asiakkaille kaksiputkista verkkoa pitkin. Toisessa putkessa kuuma menovesi vie lämpöä asiakkaille ja toisessa putkessa viileämpi lämpöä luovuttanut vesi palaa kaukolämpölaitokselle. Lämmönsiirto tapahtuu rakennuksen lämmönjakokeskuksessa, jossa lämmönsiirrin erottaa kaukolämpöverkon ja rakennuksen lämmönjakojärjestelmän toisistaan (Motiva, 2015).

Biomassoihin perustuvaa erillistä sähköntuotantoa ei juuri Suomessa ole. Erillinen hajautettu sähköntuotanto perustuu tuuli- aurinko- ja vesivoimalla tuotettuun sähkөөn. Bioenergiantuotannon kustannukset edellyttävät taloudellista tukea ja kivihiilen halpa hinta heikentää biomassojen kilpailukykyä. Biomassoilla tuotetun sähkön kilpailukykyä heikentää myös sähkön halpa markkinahinta. Bioenergiantuotantoa pyritään edistämään syöttötariffilla, verotuksella ja energiatuella. Biomassat ovat paikallisesti kasvatettavia polttoaineita, joten ne soveltuvat erittäin hyvin hajautettuun energiantuotantoon (Moliis, 2015, s.13-14).

Energiantuotanto pajuilla tai muilla biomassoilla ei ole täysin ongelmaton. Koska biomassojen energiatiheys on matala verrattuna fossiilisiin polttoaineisiin ja biomassoilla on korkea irtotiheys, niin kuljetuskustannukset ovat korkeammat. Korkean irtotiheyden takia biomassat vaativat myös paljon varastointitilaa (Moliis, 2015, s.13). Hakkeena korjattua pajua ei myöskään voida varastoida, koska 50 % kostea pajuhake voi homehtua ja syttyä palamaan varastossa. Pajuhake sekoitetaan voimalassa kuivempaan metsähakkeeseen. Kokopuuna korjattua pajua voidaan kuivattaa varastoimalla (Suomen Energiapaju Oy, 2009, s.10).

Ruotsissa pajua on viljelty energiantuotannon polttoaineeksi 1970-luvun öljykriisistä lähtien ja tuotettu pajubiomassa poltetaan CHP-laitoksissa. Paju todettiin jätevesien hyödyntämisessä kustannustehokkaammaksi vaihtoehdoksi kuin muut puulajit ja ympäristöystävälliseksi tavaksi tuottaa hiilidioksidineutraalia polttoainetta, koska paju kuluttaa ilmaan vapautunutta hiilidioksidia (Dimitriou & Aronsson, 2005, s.47). Ruotsissa energiapajua viljellään maailmassa eniten ja viljelyalan arvioidaan olevan yhteensä noin 16 000 hehtaaria, kun taas Suomessa viljelmiä on vain 100 hehtaaria (Pohjonen, 2016).

Tämän työn luvussa 4.2.4 mainitussa Enköpingin konseptissa jätevedenpuhdistamon prosessivesillä ja lietteillä lannoitetut energiapajut poltetaan ENA Energi:n CHP-laitoksessa sähkö- ja kaukolämpöenergiaksi. Arinakattilan kapasiteetti kaukolämmölle on 55 MW ja sähkölle 24 MW, käyttäen pääasiassa puuhaketta polttoaineena. Vuonna 2010 laitos tuotti kaukolämpöä 230 GWh ja sähköä 76 GWh (Linköping University, 2014, s.3). Enköpingissä hakepajun osuus arinakattilan vuotuisesta polttoainekäytöstä on 10 % ja hetkellisesti osuus koko polttoainevirrasta on enintään 15 % (Laitila, ym. 2010, s.72). Enköpingissä pajun seospoltolla muiden puupolttoaineiden kanssa ehkäistään tulipesäriskejä ja raskasmetallia sisältävä lentotuhka viedään kaatopaikalle tai talletetaan asfaltoinnin täyteaineeksi (Hurskainen, ym. 2013, s.10).

Voimalaitoksissa hakepajut voidaan polttaa joko arina- tai leijupetikattiloissa. Arinakattiloissa suurin osa tuhkasta poistuu pohjatuhkana, joka usein soveltuu lannoitekäyttöön. Leijupetikattilassa petimateriaalina käytetään yleensä kvartsihiekkää, joka tuhkaan sekoittuessaan laimentaa ravinne- ja raskasmetallipitoisuuksia. Pajutuhkat, kuten muutkin puutuhkat, sisältävät ravinteita (kaliumia, fosforia ja kalsiumia), joita suositellaan palautettavaksi kiertoon lannoitteena (Hurskainen, ym. 2013 s.10).



## 8.2 Pajun poltto-ominaisuudet

Hakepajun tuotannon energiahyötysuhde on korkeampi muihin bioenergiakasveihin verrattuna. Hakepajun tuotannon energiahyötysuhde eli tuotteen energiasisältö jaettuna tuotantoon kuluneella energialla on lämpö- ja sähkölaitostasolla 20-kertainen. Lyhytkiertopajukolla voidaan korjata haketta 8-10 kuivatonna hehtaaria kohden vuodessa, joka vastaa 4-5 tonnia polttoöljyä (Suomen Energiapaju Oy, 2009, s.3).

Suoraan hakkeeksi korjattu paju on märkää, kosteuspitoisuudeltaan noin 50 %, ja sen varastoiminen on hankalaa. Märkä hake ei kuivu varastossa, vaan homehtuu ja sen energiapitoisuus heikkenee pajun rakenteen heikentyessä. Kokopuuna korjatut pajut voidaan kuivattaa suojatuissa kasoissa, jonka jälkeen haketuksessa saadaan laadukasta polttoainetta ilman koneellista kuivausta (Sihvonen, Leinonen & Villa, 2013, s.67).

Ruotsalaisten tutkimusten mukaan pajun poltto-ominaisuudet vastaavat keskimäärin lehtipuun ominaisuuksia ja pajun kuiva-aineen keskimääräinen tehollinen lämpöarvo on 18,3 MJ/kg, joka on hieman pienempi kuin runkopuun tähdehakkeella. Pajun tuhkapitoisuus on 1,0 % kuiva-aineesta, joka on melkein sama kuin tähdehakkeen 1,3 % (Laitila, ym. 2010, s.71). Arvot vastaavat VTT:n lämpölaitoskokeita, joiden mukaan pajun kuiva-aineen tehollinen lämpöarvo on 18,5 MJ/kg ja tuhkapitoisuus 1,2 - 1,5 %. Metsähakkeen tehollinen lämpöarvo on 19,2 MJ/kg ja tuhkapitoisuus 0,5 - 0,7 % (Kärki & Hurskainen, 2015, s.15).

Ruotsalaisten tutkimusten ja yleisen näkemyksen mukaan paju on perinteisiä puubiomassoja haastavampi polttoaine. Pajun polton riskinä tavanomaisiin puubiomassoihin nähdään korkeammat alkali- ja klooripitoisuudet, joista erityisesti pajukuorten kaliumpitoisuus voi aiheuttaa leijupedin sintrautumista (kalkkikiven muodostumista), likaantumista ja lämmönsiirtopintojen kuumakorroosiota. VTT:n Energiapajun kestävä tuotanto ja käyttö -projektissa suoritettujen polttokokeiden perusteella pajun seospolttu metsähakkeen, turpeen tai kivihiilen kanssa pienillä osuuksilla riittää poistamaan tulipesäris- kit. Tulosten mukaan pajun poltto-ominaisuudet ovat lähempänä metsähaketta kuin pelto- biomassoja ja pajua voidaan polttaa turvallisesti muiden puupolttoaineiden kanssa (Hurskainen, ym. 2013, s.5 & 39).

### 8.3 Tuhkat ja niiden käsittely

Jätelain (646/2011) ja ympäristöhallinnon laatimien jättesuunnitelmien mukaan energi-  
antuotannossa syntyvät tuhkat luokitellaan jätteiksi ja ne tulisi ensisijaisesti hyödyntää  
kierrättämällä, jos se on teknisesti mahdollista ja kierrätys ei aiheuta kohtuuttomia kus-  
tannuksia jätteen muuhun käsittelyyn verrattuna. Jätteen laitospäinen ja ammattimainen  
käsittely vaatii ympäristölupaa. Ilman ympäristölupaa tuhkat voidaan hyödyntää lan-  
noitteena, jos tuhkat täyttävät lannoitevalmistelain (539/2006) ja lannoiteasetusten  
(24/11 ja 11/12) vaatimukset ravinteiden minimipitoisuuksille ja raskasmetallien mak-  
simipitoisuuksille. Metsätaloudessa tuhkalannoitteen tulee sisältää vähintään 2 % fosfo-  
ria ja kaliumia sekä 6 % kalsiumia. Muualla kuin metsätaloudessa käytettävän tuhkan  
tulee sisältää vähintään 10 % kalsiumia. Pajutuhkan hyödyntämisen kannalta ongelmal-  
lisin raskasmetalli voi olla kadmium, jonka maksimipitoisuus metsälannoitteena on 25  
milligrammaa kuiva-ainekilogrammassa (mg/kg) ja muun käytön lannoitteena 2,5  
mg/kg (Hurskainen ym. 2013, s.9-10).

Pajutuhka soveltuu lannoitekäyttöön ravinnepitoisuuksien kannalta, mutta tuhkien kier-  
rätys lannoitteena voi vaikeutua, koska pajut imevät maasta ja vedestä tehokkaasti myös  
raskasmetalleja. Pajuun imeytyneet raskasmetallit tiivistyvät pajun alhaiseen tuhkapitoi-  
suuteen ja lannoitekäytön raja-arvot saattavat ylittyä helposti myös käytettäessä pajua  
seospolttoaineena. Pajun raskasmetallipitoisuudet riippuvat sekä maaperän että käsitel-  
tävän veden laadusta. Tuhkan kemiallisiin ja fysikaalisiin ominaisuuksiin vaikuttavat  
käytetyn polttoaineen lisäksi polttotekniikka ja polton parametrit, kuten lämpötila ja  
ilman syöttö, lisäaineet, kattiloiden kunto ja tuhkan talteenottojärjestelmä. Pajutuhkan  
soveltuvuus lannoitekäyttöön tulee arvioida tuhka-analyysien perusteella. Tuhkalannoit-  
teeseen voi lisätä epäorgaanisia lannoitteita tuhkan käyttökelpoisuuden parantamiseksi  
(Hurskainen ym. 2013, s.9-10).

VTT:n energiapajun polttokokeiden tulosten mukaan tuhkien raskasmetallipitoisuuksiin  
tulisi kiinnittää huomiota suurilla pajun poltto-osuuksilla, jos tuhkia aiotaan käyttää  
lannoitteena. 100 % pajun poltto-osuudelta otetun tuhkanäytteen kadmiumpitoisuus oli  
31 mg/kg, joka ylitti metsälannoitekäytön raja-arvon 25 mg/kg. Kun pajua poltettiin 60  
% osuudella, niin tuhkanäytteen kadmiumpitoisuus oli 18 mg/kg, joka ylitti selkeästi  
muiden käyttökohteiden raja-arvon 2,5 mg/kg (Kärki & Hurskainen, 2015, s.17 ja 19).

Yhtenä esimerkkinä pajun korjuusta, varastoinnista ja polttokäytöstä toimii Suomen Energiapaju Oy:n 0,9 hehtaarin energiapajupelto. Vuoden 2011 talvella kasvusto korjattiin moottorisahatyönä kourakasoihin, johon kului aikaa 28,5 tuntia. Ajon kustannuksia voidaan verrata normaalin hakerangan ajoon. Pajut siirrettiin tienvarsivarastoon kuivumaan ja kesän 2011 aikana varastokasa peitettiin muovilla. Varasto oli tosin alapohjaltaan tiivis ja tästä johtuen pajujen kuivatus ei onnistunut parhaiten. Pajujen kuivatukseen tienvarsivarastossa suositellaan tuulista aluetta (Suomen Energiapaju Oy, 2012).

Tammikuussa 2012 pajut hakettiin rumpuhakurilla ja pajuhaketta saatiin tuotettua 110 hake-m<sup>3</sup>. Normaalisti hakekuutiot muunnettaisiin kiintokuutioiksi jakamalla 2,5, mutta tässä tapauksessa jako olisi antanut liian hyvän kiintokuutiotuloksen (44 k-m<sup>3</sup>). Tavalliseen rankahakkeeseen verrattuna pajuhake sisältää paljon kuorta (Suomen Energiapaju Oy, 2012). Tienvarsivarasto ja pajujen haketus on esitettyä kuvassa 18.



KUVA 18: Pajujen haketus rumpuhakurilla (Suomen Energiapaju Oy, 2012)

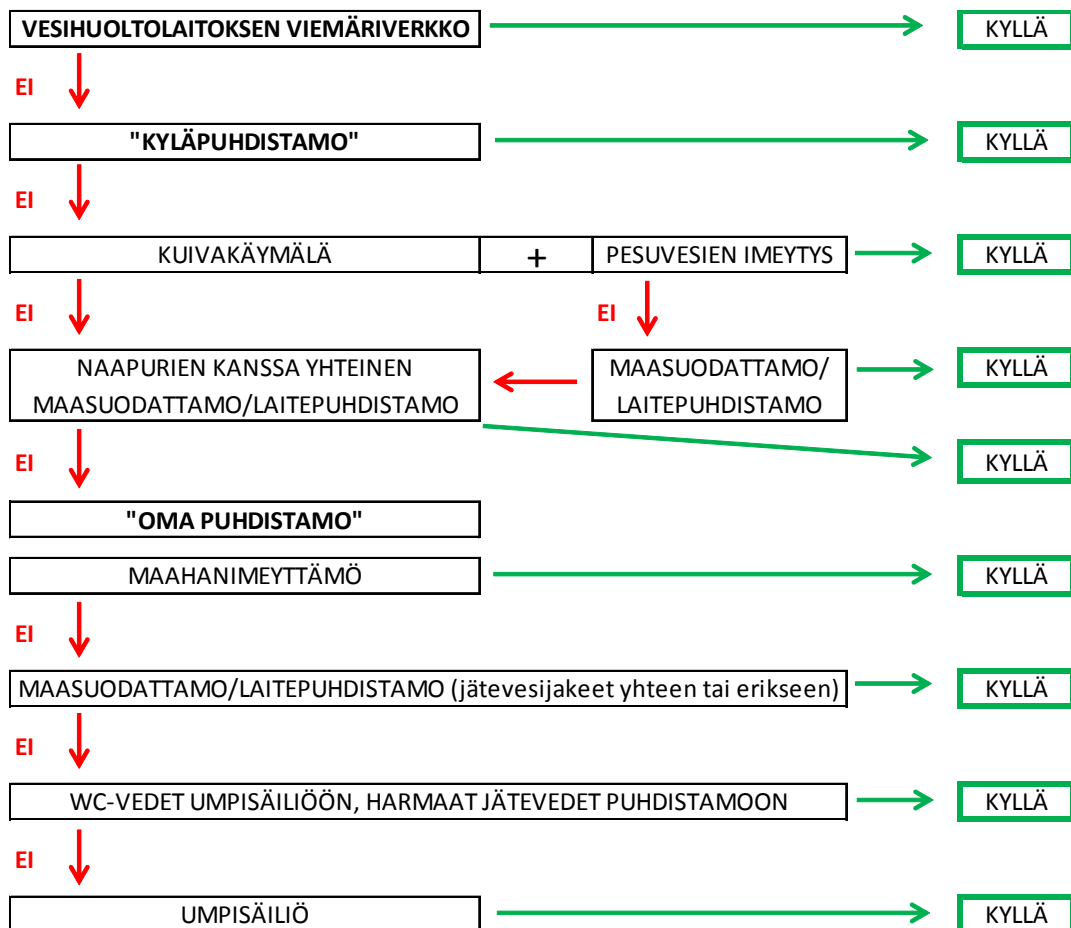
Hake kuljetettiin viereiselle Rahulan Lämmön kaukolämpölaitokselle, jossa hake poltettiin kahdessa 120 kW ja 360 kW hakelämmityskattilassa. Haketta poltettiin keskimäärin 2,20 hake-m<sup>3</sup> yhtä MWh kohti, joten lämmitysenergiaa saatiin tuotettua noin 50 MWh. Erillisen polttoaineen syöttöä kattilaan jouduttiin lisäämään, koska pajuhakkeen lämpösisältö on hieman heikompi kuin tavallisen rankahakkeen. Tuhkaa syntyi enemmän kuin tavallisesta rankahakkeesta ja kattilan tulipintoihin tarttunut lentotuhka lisäsi kattilan nuohouksen tarvetta (Suomen Energiapaju Oy, 2012).

## 9 PAJUPUHDISTAMON VERTAILU MUIHIN JÄTEVESIRATKAISUIHIN

Viemäriverkon ulkopuolisessa jäteveden käsittelyssä vertailukelpoisia ratkaisuja suljetun pajupuhdistamon kanssa ovat maapuhdistamot (maameyttämöt tai -suodattamot), pienpuhdistamot (panos- tai aktiivilietepuhdistamot ja biosuotimet) sekä kaksoisviemärinti (umpisäiliö käymälävesille ja maasuodatus harmaille vesille). Tässä työssä en käsittele loma-asuntoja ja muiden jätevesiratkaisujen ominaisuuksia. Jätevesiratkaisut ovat esitettynä esimerkiksi LVI-ohjeessa ”Haja-asutuksen jätevesien käsittely” (LVI 23-10540, 2013) tai Suomen ympäristökeskuksen puhdistamosivustolla (SYKE, 2015).

Kiinteistönomistaja voi tehdä jätevesiratkaisun valinnan taulukon 5 ja jätevesiasetuksen 209/2011 puhdistusvaatimusten mukaisesti, riippuen siitä, sijaitseeko kiinteistö pilaantumisherkällä vai lievennetyn puhdistusvaatimuksen alueella. Valintaan vaikuttavat myös kunnan vaatimukset, kustannukset, järjestelmän puhdistustehokkuus ja soveltuvuus, asennuksesta ja huollosta aiheutuvat vaivat sekä muut näkökulmat.

TAULUKKO 5: Jätevesiratkaisun valinta, muokattu (Kujala-Räty ym. 2008, s.119)



Vesihuoltolaitoksen viemäriverkkoon liittyminen on pakollista vesihuoltolaitoksen toiminta-alueella, poikkeustapauksia lukuun ottamatta. Liittyminen ei ole pakollista, jos vesihuoltolaitoksen kanssa ei päästä sopimukseen tai jos liittymiskohta sijaitsee liian kaukana tai hankalan esteen takana. Keskitetyn kyläpuhdistamon tai yhteisen puhdistamon toteuttaminen on taloudellisesti kannattavaa, jos kiinteistöt sijaitsevat lähellä toisiinsa ja järjestelmän toteutus- ja huoltokustannukset saadaan jaettua. Ympärivuotisena jätevesiratkaisuna pelkkä umpisäiliö on elinkaarikustannukseltaan kallis, koska sen vuosittaiset tyhjennyskustannukset ovat suuret (Kujala-Räty ym. 2008, s.119-121).

## 9.1 Jätevesiratkaisujen ylläpito

Jätevesiasetuksen (209/2011) mukaan saostussäiliö tulee tyhjentää vähintään kerran vuodessa, jonka lisäksi saostussäiliön rakenteen ja toimivuuden tarkastus tulee tehdä kymmenen vuoden välein. Jätevesijärjestelmässä tulee olla varo- ja hälytyslaitteita, jotka ilmoittavat säiliön täyttymisestä ja muista häiriöistä. Suljetun pajupuhdistamon ylläpitoa käsitellään tarkemmin tämän työn luvussa 6. Tässä työssä vertailtavien jätevesiratkaisujen ylläpitoon vaikuttavat asiat on koottu taulukkoon 6, jonka perusteella pajupuhdistamo ja kaksoisviemärointi näyttävät olevan toimintavarmimmat ratkaisut.

TAULUKKO 6: Jätevesiratkaisujen ylläpito

<b>Suljettu pajupuhdistamo</b> (Suomen ympäristökeskus, 2014)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 1. vuonna kuukausittaisia tarkastustoimenpiteitä</li> <li>- 2. vuodesta eteenpäin keväisin osa pajuista leikataan, saostussäiliö tyhjennetään ja huuhdellaan</li> <li>- pajuviljelmän uusiminen 25 vuoden välein</li> </ul>
<b>Maasuodattamo fosforinpoistolla</b> (LVI 23-10540, 2013, s.24) (Niemi & Myllyvirta, 2008, s.21-22)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Saostussäiliön tyhjennys ja huuhtelu (1-3 kertaa vuodessa)</li> <li>- Imeytysputken ja mahdollisen pumpun hälytyslaitteiden tarkkailu</li> <li>- Saostuskemikaalin lisääminen ja vaihtaminen (toteutuskohtaista)</li> <li>- Toimivuuden tarkkailu (tummaa lietettä purkuputken suulla?)</li> <li>- Tarkastukset ja putkien puhdistus (väh. kerran 10. vuodessa)</li> </ul>
<b>Pienpuhdistamo</b> (LVI 23-10540, 2013, s.27) (Niemi & Myllyvirta, 2008, s.31-32)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Ylijäämälietteen poistaminen säiliöstä (1-3 kertaa vuodessa)</li> <li>- Sähköisten ja mekaanisten osien sekä hälyttimien tarkkailu</li> <li>- Saostuskemikaalien lisäys ja vaihto (väh. 2-3 kertaa vuodessa)</li> <li>- Rakenteiden kunnon ja toimivuuden tarkastus väh. joka 10. vuosi</li> <li>- Jos biosuodin käytössä, jäätymistä tulee seurata talvella</li> </ul>
<b>Kaksoisviemärointi, umpisäiliö ja maasuodattamo</b> (LVI 23-10540, 2013, s.14) (Niemi & Myllyvirta, 2008, s.35)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Umpisäiliön tyhjennys (riippuu koosta ja WC-vedenkulutuksesta)</li> <li>- Säiliön täyttymishälyttimen tarkistus väh. kerran vuodessa</li> <li>- Säiliön tiiviys- ja kelpoisuustarkistus väh. kerran 5. vuodessa</li> <li>- Pintarasvojen poisto maasuodattamon saostussäiliöstä vuosittain</li> <li>- Jos harmaiden vesien maasuodattamo tukkeutuu, se tulee uusida</li> </ul>

## 9.2 Puhdistustehokkuudet

Jätevesien yhteiskäsittelyjärjestelmillä saavutettavia puhdistustuloksia on esitettyä taulukossa 7. Tiedot on kerätty puolueettomista mittauksista ja ne ovat viitteellisiä. Suljetun pajupuhdistamon tehokkuus on mitattu Tanskassa paju- ja maaperänäytteiden avulla (Gregersen & Brix, 2001, s.408). Maahanimeyttämö ei ole mukana tässä vertailussa, koska sen puhdistustehokkuuden arviointi on mahdotonta (Kurki, 2007, s.4). Maasuodattamon ja maahanimeyttämön erona on, että maahanimeyttämössä suodatettu jätevesi kulkeutuu pohjavedeksi, kun taas maasuodattamossa suodatettu jätevesi kerätään kokoomaputkiin ja johdetaan purkupaikkaan (LVI 23-10540, 2013, s.3).

TAULUKKO 7: Jätevesiratkaisujen puhdistustehokkuudet

Kaikkien asuinjätevesien käsittely 2-5 asukasta (90-120 L/asukas/päivä)	Puhdistustehokkuus			
	BHK <sub>7</sub>	Fosfori [P]	Typpi [N]	
Vähimmäisvaatimus	80	70	30	(Asetus 209/2011)
<b>Suljettu pajupuhdistamo</b>	>95	>90	>90	(Brix & Arias, 2005, s.7)
<b>Maasuodattamot fosforinpoistolla</b>				
Uponor maasuodattamo	98	99	42	(Kurki, 2007, s.2)
Pipelife Family Compact (vaakavirta)	93	100	68	(Kurki, 2007, s.2)
IN-DRÄN (vaakavirta)	98	98	36	(Kurki, 2007, s.2)
IN-DRÄN maasuodattamo	95	13	53	(Valonia, 2013, s.2)
<b>Pienpuhdistamot (panos/aktiiviliete)</b>				
Biolan Trio	99	90	59	(Valonia, 2013, s.2)
Uponor Clean 1	97	88	59	(Valonia, 2013, s.2)
Wehoputs 5	98	92	66	(Valonia, 2013, s.2)
Raita multi 12	98	94	53	(Valonia, 2013, s.3)
<b>Pienpuhdistamot (biosuotimet)</b>				
BioRock	91	38	53	(Valonia, 2013, s.3)
Green Rock lisi	94	89	27	(Sipilä ym. 2011, s.2)

Mittaustulosten mukaan maasuodattamoilla ja pienpuhdistamoilla saavutetaan erinomaisia puhdistustuloksia orgaaniselle ainekselle ja fosforille, mutta typen poisto on heikompi. IN-DRÄN-maasuodattamon fosforinpoistotehokkuus oli heikentynyt. Puhdistusteho riippuu olosuhteista sekä järjestelmän käytöstä ja huollosta (Valonia, 2013, s.3). Pajupuhdistamolla saavutetaan erinomaisia puhdistustuloksia, koska pajuilla ja altaan maaperän mikrobeilla on riittävästi aikaa ravinteiden poistolle (Gregersen, 2015).

### 9.3 Kustannukset ja avustukset

Jätevesiratkaisujen kustannukset koostuvat suunnittelusta, materiaaleista, rakentamisesta ja ylläpidosta. Nämä kustannustekijät vaikeuttavat jätevesiratkaisujen vertailua, koska yksittäistapauksissa kustannuksiin vaikuttavat esimerkiksi maaston rakennusolosuhteet sekä paikallinen hintataso rakentamiselle ja huollolle. Taulukossa 8 on koottuna jätevesiratkaisujen viitteelliset kustannukset ja käyttöiät. Tiedot on saatu jätevesioppaasta (2015), Niemen ja Myllyvirran (2008) selvityksestä sekä Lynchiltä (2016). Elinkaarikustannusten ja käytön kannalta suljettu pajupuhdistamo tai kaksoisviemäröinti alipainekäymälällä näyttäisivät olevan järkevimät vaihtoehdot.

TAULUKKO 8: Jätevesiratkaisujen investointi-, käyttö- ja elinkaarikustannukset

Jätevesiratkaisu - 5 hengen talous vedenkulutus 150 litraa/hlö/päivä	Hinta €	Käyttökustannus €/vuosi	Kustannus €/15 vuodessa	Käyttö vuosia
Suljettu pajupuhdistamo	12 500	110 (sähkö + tyhj.)	14 450	yli 50
Maasuodattamo fosforinpoistolla	5000 - 6500	300 (kemik. + tyhj.)	9 500 - 11 000	15 - 25
Pienpuhdistamo	5500 - 8500	750 (kem, säh, huol, tyhj)	16 750 - 19 750	30
Pelkästään 10m <sup>3</sup> umpisäiliö	2500 - 3500	2100 (tyhjennys)	34 000 - 35 000	50
<b>Kaksoisviemäröinnin vaihtoehdot (umpisäiliö/kuivakäymälä + maasuodattamo):</b>				
5 m <sup>3</sup> säiliö (WC-vesi: 6 L/kerta)	5000 - 7000	1050 (tyhjennys)	20 750 - 22 750	50
5 m <sup>3</sup> säiliö (alipaine-WC: 0,6 L/krt)	5000 - 6000	160 (tyhjennys)	7400 - 8400	50
Kompostoivalla suursäiliöllä	4000 - 8000	55 (kuivike + tyhj.)	4800 - 8800	50

Rakennuksen sisälle soveltuvan kuivakäymälän kustannukset vaihtelevat sen mukaan, onko kyseessä noin 500 euron kompostisäiliöllinen istuin vai kellariin asennettava 3500 euron suursäiliö. Käyttökustannukset kuivakäymälän ja harmaiden vesien maasuodattamon erilliskäsittelylle koostuvat mahdollisesta kuivikeaineen hankinnasta ja maasuodattamon saostussäiliön pintarasvojen poistosta. Jos kuivakäymälä on pakastava tai polttava ratkaisu, niin kustannuksissa tulee ottaa huomioon tuulettimen ja käymälän sähkönkulutus, joka voi olla vuodessa merkittävä (Niemi & Myllyvirta, 2008, s.19).

Taulukossa 8 tyhjennyskustannuksen on arvioitu olevan 80 euroa. Jos tyhjennys tilataan vain kompostointia tai maasuodattamon saostussäiliön rasvojen poistoa varten, niin kustannus on noin puolet pienempi (Lynch, 2016). Pajupuhdistamon kehittänyt Gregersen (2015) on luomassa menetelmää, jolla saostussäiliön lietteet saadaan kierrätettyä pajuviiljelmällä, joten tulevaisuudessa on mahdollista säästää tyhjennyskustannuksissa.

Jos jätevesijärjestelmää käyttävään kiinteistöön toimitetaan vesihuoltolaitoksen käyttövetä, niin kiinteistö säästää jätevesimaksuissa. Esimerkiksi Inkoon kunnassa (2016) jätevesimaksu on 3,6 €/m<sup>3</sup>, joten viiden hengen kotitalous säästää kaavan 4 mukaisesti vuodessa 590 €, kun vedenkulutus on 90 litraa henkilöä kohden päivässä.

$$\text{Vuosisäästö (€)} = \left( \frac{90 \text{ L} \cdot 5 \text{ hlö}}{1000} \right) \text{m}^3 \cdot 3,6 \text{ €} \cdot 365 \text{ d} = 590 \text{ €} \quad (4)$$

Jätevesijärjestelmän kehittäminen naapurien kanssa on taloudellisesti kannattavaa, koska järjestelmän toteutus- ja käyttökustannukset saadaan jaettua. Tämän työn luvussa 4.2 mainittu viiden kotitalouden keskitetty pajupuhdistamo Inkoossa tuli kuitenkin odotettua kalliimmaksi rakentaa, koska kivinen maaperä haittasi kaivuutöitä ja puhdistamoaltaat jouduttiin erottamaan toisistaan. Pajupuhdistamon hinnaksi taloutta kohti tuli noin 12 000 euroa (Lynch, 2016). Gregersenin (2015) mukaan keskitetyn pajupuhdistamon rakentaminen useammalle kuin kahdelle taloudelle säästää usein noin 3000 - 5000 euroa taloutta kohti, jos taloudet sijaitsevat lähempänä kuin 150 metrin etäisyydellä toisistaan.

Jätevesijärjestelmän toteuttamiseen kannattaa hakea avustusta. ELY-keskukset (2015) myöntävät vesihuoltoavustusta yleensä haja-asutusalueen vesihuollon yhteishankkeille, kuten vesiosuuskunnille ja kyläpuhdistamoille. Alueellinen TE-keskus ja paikallinen Leader-ryhmä saattavat myös myöntää avustusta. Lisäksi jotkut kunnat saattavat myöntää avustusta vesihuollon yhteishankkeen suunnittelulle tai rakentamiselle sekä tukea ympäristöystävällisen jätevesiratkaisun toteuttamista. Kotitalousvähennystä myönnetään jätevesijärjestelmän rakennus- ja asennuskustannuksille. Vähennys koskee myös vesiosuuskuntaan liittymisestä aiheutuvia kiinteistökohtaisia kuluja (Jätevesiopus, 2015).

Kotitalousvähennyksen edellytyksenä on, että työ on tilattu yrittäjältä tai yritykseltä ja palkkatyön kustannukset on esitettyinä laskussa. Vähennykseen oikeuttaa jätevesiratkaisun kunnostustyöt sekä uuden jätevesijärjestelmän rakentaminen haja-asutusalueelle. Maksimivähennykseen (kaava 5) oikeuttaa 5555 € hintainen työ. Maksimivähennystä voi saada vuodessa 2400 € yhtä verovelvollista kohden ja puolisoita kohden 4800 € ALV-kelpoisen palkkatyön vähennys on 45 % ja henkilöpalkan vähennys 15 %. Omavastuu on 100 euroa (Verohallinto, 2016).

$$\text{Maksimivähennys (€)} = (5555 \text{ €} \cdot 45 \%) - 100 \text{ €} = 2400 \text{ €} \quad (5)$$



## 10 JOHTOPÄÄTÖKSET

Ympäristönsuojelu ja kasvava energiantarve ovat lisänneet kysyntää ekologisia ratkaisuja kohtaan. Tästä syystä pajupuhdistamo on lupaava ratkaisu, koska pajun kaltaisen monikäyttöisen biomassan tuotannolla saadaan yhdistettyä vesien puhdistuminen ja uusiutuvan energian tuotanto. Haihdutukseen perustuvalla lyhyen kierron pajuviiljelmällä voidaan suojella erityisesti pohjavesialueita ja rantojen suojakaistoja jätevesien ravinnekuormitukselta.

Koska haja-asutusalueiden jätevesiasetus 209/2011 edellyttää tehokkaampaa jätevesien käsittelyä ja monissa kiinteistöissä joudutaan parantamaan jätevesijärjestelmiä, niin investoinnin tulisi olla mahdollisimman houkuttelevaa. Ympäristö- ja energiataloustavoitteisiin voitaisiin vaikuttaa positiivisesti, jos kiinteistönomistajat ja maanviljelijät saataisiin taloudellisilla kannustimilla kiinnostumaan pajupuhdistamojen tai energiapajuviiljelmien perustamisesta.

Tällä hetkellä suljetun pajupuhdistamon taloudellisena houkuttimena toimivat yli 50 vuoden elinkaaren aikana saavutettavat säästöt käyttökustannuksissa. Tulevaisuudessa on mahdollista säästää myös pajupuhdistamon saostussäiliön tyhjennyskustannuksissa, koska pajupuhdistamoita kehittänyt Peder S. Gregersen on luomassa menetelmää, jolla saostussäiliön lietteet saadaan kierrätettyä. Tällöin käyttökustannukseksi jäisi vain pumppun sähkönkulutus, joka on noin 30 euroa vuodessa.

Energiapajun viljely ei ole käynnistynyt Suomessa yhtä hyvin kuin Ruotsissa, jossa viljelmiä on 16 000 hehtaaria verrattuna Suomen 100 hehtaariin. Tähän saattaa olla kannattavuuskysymysten ohella muitakin syitä. Energiapajun viljelyn kannattavuutta voidaan parantaa jätevesien ja lietteiden käsittelyllä, jotka edistävät pajujen kasvua, vesien puhdistumista ja alentavat lannoitekustannuksia. Ruotsalaisten tutkimusten mukaan pajuviiljelmällä saavutettavat säästöt ovat merkittäviä, jos pajuviiljelmällä korvataan kemiallisia puhdistusprosesseja. Energiantuotannon ja vesien puhdistumisen kannalta on kuitenkin tärkeää, että energiapajuviiljelmiä ja jätevetä tuottava alue sijaitsevat pajuhaiketta vastaanottavan lämpölaitoksen läheisyydessä, jolloin pajuhaikkeen kuljetuskustannukset eivät nouse liian korkeiksi.

Pajuilla on monia käyttömahdollisuuksia ja kuivattuja energiapajuja voidaan hakettaa lämpölaitosten tukipolttoaineeksi. Vaikka VTT:n polttokokeiden perusteella energiapaju vastaa poltto-ominaisuuksiltaan metsähaketta, ja se soveltuu seospolttoaineeksi paremmin kuin muut peltobiomassat, niin pajua tulee polttaa pienillä osuuksilla, jolloin tulipesäriskeiltä vältytään ja tuhkat voidaan hyödyntää paremmin lannoitteena. Pajuhakkeen tuotanto talokohtaisilla pajupuhdistamoilla ei kuitenkaan ole taloudellisesti kannattavaa, koska viljelmä-alat ovat vielä pieniä, eikä puhdistamoaltaiden rakennetta tulisi tallata raskaalla koneistolla. Tanskan ympäristöministeriön riskiarvioinnin mukaan talousjäteveden käsitelleet pajut voidaan polttaa lämmitystarpeisiin ja tuhkat käyttää lannoitteena ilman riskejä, jonka lisäksi talousjäteveden käsitelleen pajupuhdistamon maaperä ei tule ylittämään viljelysmaalle asetettuja raskasmetallien raja-arvoja.

Jätevesiratkaisujen vertailun perusteella suljettu pajupuhdistamo ja kaksoisviemäröinti vähävetisellä käymälällä näyttäisivät olevan tehokkaampia, toimintavarmempia, ympäristöystävällisempiä ja elinkaarikustannuksiltaan edullisempia kuin muut jätevesiratkaisut. Fosforinpoistolla tehostetun maasuodattamon ja pienpuhdistamon heikkoutena on, että niiden toiminta vaatii säännöllisiä huoltotoimenpiteitä ja niiden vuosittaiset käyttökustannukset ovat huomattavasti korkeammat. Jos maasuodattamon tai pienpuhdistamon huoltotoimenpiteet laiminlyödään, niin puhdistamaton jätevesi päätyy ympäristöön ja järjestelmien käyttöiät laskevat. Suljetun pajupuhdistamon kannattavuutta sen sijaan heikentää puhdistamoaltaan tilantarve ja järjestelmän kertainvestointi, joka on noin 12 500 euroa yhdelle taloudelle, mutta usean talouden keskitetty pajupuhdistamo tulee rakennus- ja käyttökustannuksiltaan edullisemmaksi. Tästä syystä johtuen suljettu pajupuhdistamo olisi kustannustehokas ratkaisu erityisesti kyläpuhdistamona tai naapurien yhteisenä jätevesijärjestelmänä.

Opinnäytetyön tavoitteet täyttyivät pääosin hyvin, mutta suljetun pajupuhdistamon tarkkaa mitoitusohjetta ei ollut mahdollista esittää, koska suljettu pajupuhdistamo on Peder S. Gregersenin liikesalaisuus, eikä hän ymmärrettävästi halua luovuttaa mitoitusohjelmaansa. Epäilen muutenkin, että siitä olisi kenellekään hyötyä ilman kunnollista valmistusta, koska pajupuhdistamon mitoitus on haastavaa monista parametreista johtuen. Vaikka Suomessa rakennetut pajupuhdistamot ovat toimineet hyvin ja ongelmia ei ole todettu, niin jatkotoimenpiteiden kannalta suosittelen, että pajupuhdistamojen soveltuvuutta ja tehokkuutta pohjoisissa olosuhteissa tutkitaan lisää.

## LÄHTEET

Ahola, M. 2012. Pajupuhdistamo arvokkaassa kulttuurimaisemassa. Diplomityö. Arkkitehtuurin laitos. Aalto-yliopisto. Espoo.

Berndes, G. & Börjesson, P. 2007. Multifunctional bioenergy systems. AGS Pathways report. 27 s. [http://www.energy-pathways.org/pdf/R3\\_multifunctional\\_bioenergy.pdf](http://www.energy-pathways.org/pdf/R3_multifunctional_bioenergy.pdf)

Brix, H. & Arias, C. 2005. Danish Guidelines for Small-Scale Constructed Wetland System for Onsite Treatment of Domestic Sewage. 9 s. [https://www.researchgate.net/profile/Hans\\_Brix/publication/7703806\\_Danish\\_Guidelines\\_for\\_Small-Scale\\_Constructed\\_Wetland\\_System\\_for\\_Onsite\\_Treatment\\_of\\_Domestic\\_Sewage/links/09e4150a40c682cc65000000.pdf?inViewer=0&pdfJsDownload=0&origin=publication\\_detail](https://www.researchgate.net/profile/Hans_Brix/publication/7703806_Danish_Guidelines_for_Small-Scale_Constructed_Wetland_System_for_Onsite_Treatment_of_Domestic_Sewage/links/09e4150a40c682cc65000000.pdf?inViewer=0&pdfJsDownload=0&origin=publication_detail)

Brix, H. & Arias, C. 2005. The use of vertical flow constructed wetlands for on-site treatment of domestic wastewater: New Danish Guidelines. 491-500. [http://mit.biology.au.dk/~biohbn/hansbrix/pdf\\_files/Ecological%20Engineering%2025%20%282005%29%20491-500.pdf](http://mit.biology.au.dk/~biohbn/hansbrix/pdf_files/Ecological%20Engineering%2025%20%282005%29%20491-500.pdf)

Börjesson, P & Berndes, G. 2006: The prospects for willow plantations for wastewater treatment in Sweden, teoksessa: Biomass and Bioenergy, Volume 30. 428-438.

Börjesson, P. 1999. Environmental effects of energy crop cultivation in Sweden: identification and quantification, julkaisussa: Biomass and Bioenergy. Vol. 16. 137-154.

CEN/TR 12566-5. 2008. Small wastewater treatment systems up to 50 PT. Part 5: Pre-treated Effluent Filtration systems. European Committee for Standardization. 37 s.

Center for Recirkulering. 2010. Willow systems. Viitattu 25.11.2015. [http://www.pilerensning.dk/english/index.php?option=com\\_content&view=article&id=53&Itemid=56&lang=en](http://www.pilerensning.dk/english/index.php?option=com_content&view=article&id=53&Itemid=56&lang=en)

Dimitriou, I. & Aronsson, P. 2005. Willows for energy and phytoremediation in Sweden, julkaisussa: Unasyuva - No. 221, Vol. 56 - Poplars and willows. 47 - 50. <ftp://ftp.fao.org/docrep/fao/008/a0026e/a0026e12.pdf>

Dimitriou, I. & Aronsson, P. 2010. Wastewater and Sewage Sludge Application to Willows and Poplars Grown in Lysimeters - Plant Response and Treatment Efficiency, julkaisussa: Biomass and Bioenergy. Vol 35. 161 - 170.

Dimitriou, I. & Rosenqvist, H. 2011. Sewage sludge and wastewater fertilization of Short Rotation Coppice (SRC) for increased bioenergy production - Biological and economical potential, julkaisussa: Biomass and Bioenergy. Vol 35. 835 - 842.

ELY-keskus. 2015. Rahoitus ja avustukset - Ympäristövastuualue. Päivitetty 1.12.2015. Viitattu 17.3.2016. <http://www.ely-keskus.fi/web/ely/rahoitus-ja-avustukset-ymparistovastuualue#2>

ForestEnergy2020. 2015. Pajun kilpailukyky paranee, jos sitä voidaan hyödyntää myös erilaisten vesien puhdistukseen. ForestEnergy2020- uutiskirje 1/2015.  
<http://www.forestenergy2020.org/fi/uutiskirjeet/uutiskirje-1-15/paju:icmsmode/clear>

Google Earth. 2015. Google Earth -näkökuva. Ladattu 24.3.2016.

Gregersen, P. 2008. Center for Recirkulering. Design of zero-discharge willow facility. Report of dimensions and documentation. Julkaisematon mitoituskirjoitus.

Gregersen, P. 2015. Toimitusjohtaja & konsultti. Center for Recirkulering & L&G Pajupuhdistamo Oy. Sähköpostiviesti. Vastaanotettu 19.12.2015.

Gregersen, P. & Brix, H. 2001. Zero-discharge of nutrients and water in a willow dominated constructed wetland. Water Science and Technology Vol 44 No 11-12. IWA Publishing. 407 - 412.

Heino, E. & Hytönen, J. 2015. Suomalainen pajukirjallisuus. Luonnonvarakeskus. Helsinki. 38 s. [https://jukuri.luke.fi/bitstream/handle/10024/519745/luke-luobio\\_57\\_2015.pdf?sequence=1](https://jukuri.luke.fi/bitstream/handle/10024/519745/luke-luobio_57_2015.pdf?sequence=1)

Hurskainen, M., Kärki, J., Korpijärvi, K., Leinonen, A. & Impola, R. 2013. Pajun käyttö polttoaineena kerrosleijukattiloissa. Energiapajun kestävä tuotanto ja käyttö -projekti. VTT. Jyväskylä. 41 s. <http://www.forestenergy2020.org/openfile/194>

Inkoon kunta. 2016. Inkoon vesihuoltolaitoksen taksa.  
[http://www.inkoo.fi/files/1687/INKOON\\_VESI\\_TAKSA\\_1.3.2016\\_alkaen.pdf](http://www.inkoo.fi/files/1687/INKOON_VESI_TAKSA_1.3.2016_alkaen.pdf)

Jätelaki 646/2011. Finlex. Viitattu 3.2.2016.  
<http://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2011/20110646>

Jätevesiasetus pähkinänkuoressa! Rakentaja.fi. Julkaistu 19.4.2015. Viitattu 25.10.2015.  
[http://www.rakentaja.fi/artikkelit/7759/uusi\\_jatevesiasetus.htm](http://www.rakentaja.fi/artikkelit/7759/uusi_jatevesiasetus.htm)

Jätevesiopas. 2015. Jäteveden käsittelyn elinkaarikustannuksista. Suomen Vesiensuojeluyhdistysten Liitto ry. Viitattu 10.4.2016.  
<http://vesiensuojelu.fi/jatevesi/etusivu/jateveden-kasittelyn-kustannuksista/>

Kallio, J. & Santala, E. 2002. Maitohuoneen jätevesien käsittely. Ympäristöopas 91. Suomen ympäristökeskus. Helsinki.  
[https://helda.helsinki.fi/bitstream/handle/10138/41634/Ymp%C3%A4rist%C3%B6opas\\_91.pdf?sequence=1](https://helda.helsinki.fi/bitstream/handle/10138/41634/Ymp%C3%A4rist%C3%B6opas_91.pdf?sequence=1)

Koponen, H. 2015. Yhteyttäminen eli fotosynteesi. Otavan Opisto. Viitattu 21.12.2015.  
[http://opinnot.internetix.fi/fi/muikku2materiaalit/peruskoulu/bi/bi1/02.\\_elaman\\_perusasiat/2.7\\_yhteyttaaminen?C:D=hNyF.g13b&m:selres=hNyF.g13b](http://opinnot.internetix.fi/fi/muikku2materiaalit/peruskoulu/bi/bi1/02._elaman_perusasiat/2.7_yhteyttaaminen?C:D=hNyF.g13b&m:selres=hNyF.g13b)

Kurki, P. 2007. Kiinteistökohtaisten jätevesien käsittelyjärjestelmien toimivuus LokaPuts 2006-2007 -hankkeessa. Suomen Salaojakeskus Oy. 4s.  
<http://www.ymparisto.fi/download/noname/%7B4D46D153-4A42-4E56-9A35-E14B39B0941A%7D/92010>

- Kärki, J. & Hurskainen, M. 2015. VTT. Pajun käyttö energiantuotannossa - tuloksia polttokokeista. Energiapajun kestävä tuotanto ja käyttö -projektin loppuseminaari. Jyväskylä.  
[https://peda.net/poke/projektit/luva\\_hankkeet/energiapaju/seminaari/sm/jk:file/download/f80a0b9584c1a2a8e54e0acb1da8f063d1d5bc53/Janne%20K%C3%A4rki\\_Poltto.pdf](https://peda.net/poke/projektit/luva_hankkeet/energiapaju/seminaari/sm/jk:file/download/f80a0b9584c1a2a8e54e0acb1da8f063d1d5bc53/Janne%20K%C3%A4rki_Poltto.pdf)
- Kujala-Räty, K., Mattila, H. & Santala, E. (toim.) 2008: Haja-asutusalueiden vesihuolto. HAMK. Hämeenlinna. 200 s.
- Laitila, J., Leinonen, A., Flyktman, M., Virkkunen, M. & Asikainen, A. 2010. Metsähakkeen hankinta- ja toimituslogistiikan haasteet ja kehittämistarpeet. VTT. Espoo. 143 s. <http://www.vtt.fi/inf/pdf/tiedotteet/2010/t2564.pdf>
- Laki vesienhoidon ja merenhoidon järjestämisestä 2004/1299. Finlex. Viitattu 24.10.2015. <https://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/2004/20041299>
- Lannoiteasetus 24/11. 2011. Finlex. <http://www.finlex.fi/data/normit/37638-11024fi.pdf>
- Lannoiteasetus 11/12. 2012. Finlex. <http://www.finlex.fi/data/normit/39201-12011fi.pdf>
- Lannoitevalmistelaki 539/2006. Finlex. Viitattu 7.2.2016. <http://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2006/20060539>
- L&G Pajupuhdistamo Oy. 2013. Solberg Joint Willow System. Päivitetty 3.5.2013. Viitattu 13.2.2016. <https://www.facebook.com/media/set/?set=a.368443163259710.1073741825.210651455705549&type=3>
- L&G Pajupuhdistamo Oy. 2013. Wastewater to heat / Jätevedestä energiaa - Pajupuhdistamon periaatteet. [http://www.hajavesi.fi/easydata/customers/hajavesi/files/media/suomenkieliset/dokumentit/tapahtumat/tapahtumat2012/pedergregersen\\_willowfacilities.pdf](http://www.hajavesi.fi/easydata/customers/hajavesi/files/media/suomenkieliset/dokumentit/tapahtumat/tapahtumat2012/pedergregersen_willowfacilities.pdf)
- Larsson, S., ym. 2003. Short-rotation Willow Biomass Plantations Irrigated and Fertilised with Wastewaters. Sustainable Urban Renewal and Wastewater Treatment. No. 37. Danish Environmental Protection Agency. 58 s. <http://www2.mst.dk/udgiv/publications/2003/87-7972-744-1/pdf/87-7972-746-8.pdf>
- Leinonen, A. & Villa, A. 2013. ForestEnergy2020. Energiapajun kestävä tuotanto ja käyttö. <http://www.forestenergy2020.org/openfile/184>
- Linköping University. 2014. Industrial Symbiosis in Enköping. <http://www.industriellekologi.se/documents/Enkoping.pdf>
- LuontoPortti. 2016. Pajukasvit, Salicaceae. Viitattu 17.2.2016. <http://www.luontoportti.com/suomi/fi/puut/?c=Salicaceae>
- LVI 23-10540. 2013. Haja-asutuksen jätevesien käsittely - Rakennustietosäätiö RT LVI-ohjetiedosto. Helsinki. 28 s.
- Lynch, P. 2016. Toimitusjohtaja. L&G Pajupuhdistamo Oy & The Natural Building Company. Haastattelu 5.2.2016.

Maankäyttö- ja rakennuslaki 132/1999. Finlex . Viitattu 30.10.2015.  
<https://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/1999/19990132>

Moliis, S. 2015. Bioenergia - Potentiaali ja kehittämismahdollisuudet Pohjanmaalla. Opinnäytetyö. Vaasan ammattikorkeakoulu.  
[https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/91321/Moliis\\_Sanna.pdf?sequence=1](https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/91321/Moliis_Sanna.pdf?sequence=1)

Motiva. Lämpöä kotiin verkosta. Päivitetty 22.7.2015. Viitattu 31.1.2016.  
[http://www.motiva.fi/rakentaminen/lammitysjarjestelman\\_valinta/lammitysmuodot/kaukolampo/lampoa\\_kotiin\\_verkosta](http://www.motiva.fi/rakentaminen/lammitysjarjestelman_valinta/lammitysmuodot/kaukolampo/lampoa_kotiin_verkosta)

Mustankorkea Oy. 2015. Jätteestä bioenergiaa. <https://www.ely-keskus.fi/documents/10191/9336840/Mustankorkea+Oy+j%C3%A4tteest%C3%A4%20bioenergiaa.pdf/872f474c-232d-47a6-affe-c28d2cc031c4>

Niemi, A. 2014. Energiapajun viljely ja käyttö vesien puhdistuksessa - teknis-taloudellinen tarkastelu. Pro gradu -tutkielma. Bio- ja ympäristötieteiden laitos. Jyväskylän yliopisto.  
<https://jyx.jyu.fi/dspace/bitstream/handle/123456789/44188/URN%3ANBN%3AFi%3AJyu-201409042718.pdf?sequence=1>

Niemi, J. & Myllyvirta, T. 2008. Selvitys eri jätevesijärjestelmien hankkimiskustannuksista, järjestelmän vuotuisen ylläpitoon kohdistuvista kustannuksista ja huoltotarpeesta jätevesiasetuksen tavoitteisiin pääsemiseksi. Itä-Uudenmaan ja Porvoonjoen vesien- ja ilmansuojeluyhdistys r.y. 37 s. <http://www.vesi-ilma.fi/images/pdf/julkaisut/Selvitysjaitevesijarjest.pdf>

Nitraattiasetus 1261/2015. Finlex. Viitattu 27.3.2015.  
<http://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2015/20151261>

Nyholm, A. 2004. Salaojituksen tutkimusyhdistys ry. Haja-asutuksen jätevedet - Jaloittelutarhojen valumavedet - katsaus vuoden 2003 tilanteeseen. Salaojituksen Tukisäätiö. Helsinki. <http://www.salaojayhdistys.fi/pdf/TY26.pdf>

Närvänen, A. & Jansson, H. 2002. Maito huonejätevesien puhdistus kemiallisesti saostamalla ja imeyttämällä pajukenttään, teoksessa: Uusi-Kämpä, J; Yli-Halla, M. & Grék, K. (toim.). Lypsykarjataloudesta tulevan ympäristökuormituksen vähentäminen. MTT. Jokioinen. 107 - 120. <http://www.mtt.fi/met/pdf/met25.pdf>

Pajupojat Oy. 2016. Pajuista. Päivitetty 23.3.2016. Viitattu 4.4.2016.  
<http://www.bluerose.fi/fi/pajuista#>

Pajupojat Oy. 2016. RAKI. Päivitetty 23.3.2016. Viitattu 4.4.2016.  
<http://www.bluerose.fi/fi/raki>

Pohjonen, V. 2016. Metsänhoitotieteen dosentti & hallituksen puheenjohtaja. Helsingin yliopisto & AB ArvoHiili OY, ABAHOY. Haastattelu 24.2.2016.

Pohjonen, V. 2016. Biomassapajun lajit ja lajikkeet Suomessa. AB ArvoHiili OY, ABAHOY.

Pohjonen, V. 2014. Flickr Photostream. Viitattu 4.4.2016.  
<https://www.flickr.com/photos/70341007@N02/page3>

Sihvonen, J., Leinonen, A. & Villa, A. 2013. Pajun korjuu, varastointi ja toimitus laitokselle - tehtäväraportti. Energiapajun kestävä tuotanto ja käyttö -projekti. VTT. Jyväskylä. 81 s. <http://www.forestenergy2020.org/openfile/196>

Sipilä, I., Paavola, T., Lehto, M. & Jauhiainen, P. 2011. Pienpuhdistamovertailun lopputulokset. Suomen ympäristökeskus. 2 s.  
<http://www.ymparisto.fi/download/noname/%7B808F7C7C-F456-4977-9690-BFD0B1DBB620%7D/114330>

Suomen Energiapaju Oy. 2009. Energiapajun viljelyopas. Viitattu 26.1.2016.  
[http://www.suomenenergiapaju.fi/images/Energiapajun\\_viljelyopas\\_2009.pdf](http://www.suomenenergiapaju.fi/images/Energiapajun_viljelyopas_2009.pdf)

Suomen Energiapaju Oy. 2012. Ensimmäinen kokemus pajun korjuusta ja poltosta. Päivitetty 25.3.2012. Viitattu 26.1.2016. <http://www.suomenenergiapaju.fi/>

Suomen perustuslaki 1999/731. Finlex. Viitattu 24.10.2015.  
<https://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/1999/19990731>

Suomen ympäristökeskus SYKE. Jäteveden pajupuhdistamo. Päivitetty 16.12.2014. Viitattu 4.3.2016. [http://www.ymparisto.fi/fi-FI/Rakentaminen/Rakennushanke/Talotekniset\\_jarjestelmat\\_LVI/Kiinteiston\\_jatevesien\\_kasittely/Puhdistamosivusto\\_jatevesien\\_kasittelymenetelmista/Kaikkien\\_jatevesien\\_kasittely/Jateveden\\_pajupuhdistamo](http://www.ymparisto.fi/fi-FI/Rakentaminen/Rakennushanke/Talotekniset_jarjestelmat_LVI/Kiinteiston_jatevesien_kasittely/Puhdistamosivusto_jatevesien_kasittelymenetelmista/Kaikkien_jatevesien_kasittely/Jateveden_pajupuhdistamo)

Suomen ympäristökeskus SYKE. SYKEN puhdistamosivusto. Päivitetty 28.10.2015. Viitattu 12.3.2016. [http://www.ymparisto.fi/fi-FI/Rakentaminen/Rakennushanke/Talotekniset\\_jarjestelmat\\_LVI/Kiinteiston\\_jatevesien\\_kasittely/Puhdistamosivusto\\_jatevesien\\_kasittelymenetelmista](http://www.ymparisto.fi/fi-FI/Rakentaminen/Rakennushanke/Talotekniset_jarjestelmat_LVI/Kiinteiston_jatevesien_kasittely/Puhdistamosivusto_jatevesien_kasittelymenetelmista)

Särkelä, A., Lahti, K. & Haapala, T. 2013. Haja-asutuksesta muodostuvien jätevesilietten paikallinen käsittely osana haja-asutuksen jätevesihuoltoa ja ravinteiden kierrätystä. Vantaanjoen ja Helsingin seudun vesiensuojeluyhdistys ry. 53 s.  
[http://www.vhvsy.fi/files/upload\\_pdf/1564/lieteraportti232013.pdf](http://www.vhvsy.fi/files/upload_pdf/1564/lieteraportti232013.pdf)

Takala, M. 1985. Asumajätevesien imeyttäminen maahan ja energiapajun viljely imeytyskentällä. Maatalouden tutkimuskeskus MTTK. Jokioinen. 110 s.  
[https://jukuri.luke.fi/bitstream/handle/10024/441064/maatut12\\_85.pdf?sequence=1](https://jukuri.luke.fi/bitstream/handle/10024/441064/maatut12_85.pdf?sequence=1)

Terveystensuojelulaki 763/1994. Finlex. Viitattu 30.10.2015.  
<https://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/1994/19940763>

Tritonet Oy. 2004. Pajupuhdistamokohteen esittely ja tulokset, teoksessa: Tuhkanen, T., Aho, J. & Merta, E. 2005. Haja-asutuksen ravinnekuormituksen vähentäminen - Ravinnesampo. Ravinnesampo-projekti. Vaasa. 103 - 106.  
[https://helda.helsinki.fi/bitstream/handle/10138/40686/SY\\_763.pdf?sequence=1](https://helda.helsinki.fi/bitstream/handle/10138/40686/SY_763.pdf?sequence=1)

Turun Sanomat. Koripajut puhdistavat jätevedet luomumaitotilalla. Julkaistu 12.2.2007. Viitattu 27.3.2016.

<http://www.ts.fi/uutiset/kotimaa/1074180053/Koripajut+puhdistavat+jatevedet+luomumaitotilalla>

Valonia. 2013. Minwa hankkeen näytteenottoraportit vuosilta 2009-2010. 3 s.

<http://www.ymparisto.fi/download/noname/%7BAFE6DC95-697C-4E18-9F3D-0BC137B274D8%7D/92032>

Valtioneuvoston asetus talousjätevesien käsittelystä viemäriverkostojen ulkopuolisilla alueilla 209/2011. Finlex. Viitattu 17.11.2015.

<http://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2011/20110209>

Verohallinto. 2016. Kotitalousvähennys. Päivitetty 5.2.2016. Viitattu 17.3.2016.

<http://www.vero.fi/fi-FI/Henkiloasiakkaat/Kotitalousvahennys>

Vesihuoltolaki 119/2001. Finlex. Julkaistu 9.2.2001. Viitattu 25.10.2015.

<http://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2001/20010119>.

Vesilaitosyhdistys. 2013. Jätevesien käsittely. Viitattu 24.3.2016.

[http://www.vvy.fi/vesihuolto\\_linkit\\_lainsaadanto/jatevedet?702\\_o=10](http://www.vvy.fi/vesihuolto_linkit_lainsaadanto/jatevedet?702_o=10)

Vesipuidedirektiivi 2000/60/EY yhteisön vesipolitiikan puitteista. Julkaistu 22.12.2000.

Viitattu 24.10.2015. [http://eur-](http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=CELEX:32000L0060:FI:HTML)

[lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=CELEX:32000L0060:FI:HTML](http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=CELEX:32000L0060:FI:HTML)

Ympäristöministeriö. 2015. Vuoden 2015 hajajätevesityöryhmän raportti. Helsinki.

<http://www.ymparisto.fi/download/noname/%7B886A382D-93C2-48E5-A61E-6862629FE84E%7D/112925>

Ympäristöministeriö. 2016. Ympäristöministeriön ehdotus jätevesisääntelyn kohtuullis-

tamisesta lausunnolle. Julkaistu 27.4.2016. Viitattu 28.4.2016. [http://www.ymparisto.fi/fi-](http://www.ymparisto.fi/fi-FI/Ajankohtaista/Tiedotteet/Ymparistoministerion_ehdotus_jatevesisaa%2838776%29)

[FI/Ajankohtaista/Tiedotteet/Ymparistoministerion\\_ehdotus\\_jatevesisaa%2838776%29](http://www.ymparisto.fi/fi-FI/Ajankohtaista/Tiedotteet/Ymparistoministerion_ehdotus_jatevesisaa%2838776%29)

Ympäristönsuojelulaki 527/2014. Viitattu 26.10.2015.

<http://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2014/20140527>