



SAVONIA

■ OPINNÄYTETYÖ - AMMATTIKORKEAKOULUTUTKINTO
TEKNIIKAN JA LIIKENTEEN ALA

PUTKISELKEYTTIMEN SUUNNITTELU, RAKENTAMINEN JA TESTAUS

SEEWAY- ja MineWaCon-hanke

TEKIJÄ: Janne Huttunen

Koulutusala Tekniikan ja liikenteen ala	
Koulutusohjelma Ympäristötekniikan koulutusohjelma	
Työn tekijä Janne Huttunen	
Työn nimi Putkiselkeyttimen suunnittelu	
Päiväys	27.3.2015
Sivumäärä/Liitteet	69/3
Ohjaajat Pasi Pajula, yliopettaja ja Eero Antikainen, tutkimuspäällikkö	
Toimeksiantaja/ Yhteistyökumppani Savonia-ammattikorkeakoulun Ympäristötekniikan opetus- ja tutkimusyksikkö/ Geologian tutkimuskeskus (GTK)	
Tiivistelmä	
<p>Tämä opinnäytetyö tehtiin osana Seeway- ja MineWaCon -hankkeita, tarkoituksenaan kehittää uudenlainen muovista rakennettu selkeytinjärjestelmä kaivosvesien käsittelyä varten. Opinnäytetyön toimeksiantajana toimi Savonia-ammattikorkeakoulun Ympäristötekniikan opetus- ja tutkimusyksikkö yhteistyössä Geologian tutkimuskeskuksen (GTK) kanssa.</p> <p>Opinnäytetyön alkuun koottiin kirjallisuustutkimuksen pohjalta tietoa erilaisista kiintoaineiden selkeytysratkaisuista. Kaivosvesien kiintoaineiden ominaisuuksien, sekä erilaisista selkeyttimistä kerättyjen tietojen perusteella valittiin parhaiten kohteeseen soveltuva käytössä oleva selkeytinmalli, jonka pohjalta suunniteltiin rakennekuvineen niin sanottu mobiili kallistettava putkiselkeytin. Tämän selkeyttimen tarkoituksena oli poistaa kaivosvesien kiintoaineita ja raskasmetalleja virtaamasta, jonka suuruus on noin 5,0 m³/h. Muita kriteerejä laitteistolle olivat kustannustehokkuus, helppo liikuteltavuus, sekä suhteellisen pieni koko ja paino.</p> <p>Kallistettava putkiselkeytin suunniteltiin osaksi suurempaa, koottavaa pilot-mallin puhdistuskokonaisuutta, johon kuuluvat esiselkeytin, kemiallinen saostusprosessi (pikasekoitus- ja hämmennysallas), pystyselkeytysallas ja varastoallas. Sekoitusaltaat olivat työn alkaessa jo valmiina, joten muut laitteet suunniteltiin ja rakennettiin niiden ympärille. Uutta pilot-laitteistoa testattiin vuoden 2014 aikana yhteensä kolmessa Pohjois- ja Itä-Suomessa sijaitsevassa kaivoksessa. Kallistettua putkiselkeyttintä testattiin viimeisimmässä koeajossa, Yara Oy:n Siilinjärven tehtaalla.</p> <p>Ensimmäisten kallistetulla putkiselkeyttimellä tehtyjen kokeiden myötä saatiin parempi käsitys siitä, kuinka putkiselkeytin toimii käytännössä, ja mitä vahvuuksia ja heikkouksia siinä on verrattuna perinteisiin selkeytysmenetelmiin. Vertailu tehtiin jakamalla kemiallisesti käsitelty kaivosvesi hämmennysaltaan jälkeen sekä putkiselkeyttimelle että perinteiseen pystyselkeytysaltaaseen. Kaikki yhdeksän tehtyä koeajoa poikkesivat toisistaan, muuttujien ollessa selkeyttimelle tuleva virtaama Q (0,8–3,0 m³/h) ja vedenkäsittelykemikaalin annostus (0,25–1,0 kg/m³).</p> <p>Parhaimmillaan kallistettu putkiselkeytin osoittautui 3,30 m/h pintakuorman arvolla tehokkaammaksi menetelmäksi fosforin poiston osalta kuin pystyselkeytin 0,54 m/h pintakuormalla. Teoriassa tämä tarkoittaa sitä, että yhdistettynä optimoituun kemikaaliannosteluun, valmistetulla pilot-mallin putkiselkeyttimellä pystytään käsittelemään yli kuuminkertainen määrä vettä selkeyttimen vesipinta-alaa kohti kuin normaalilla pystyselkeyttimellä. Yhteenvedona voidaan todeta, että vaikka laite vaatii vielä useita koeajoja, muovista rakennettu kallistettu putkiselkeytin pystyy kuitenkin oikein mitoitettuna erottamaan kaivosvesistä tehokkaasti kiintoaineita, ravinteita ja raskasmetalleja.</p>	
Avainsanat selkeytin, kaivosvesi, kiintoaine, erotus, lamelli, putkiselkeytin, pystyselkeytin	

Field of Study Technology, Communication and Transport			
Degree Programme Degree Programme in Environmental Technology			
Author Janne Huttunen			
Title of Thesis Design of an Inclined Tube Clarifier			
Date	27 March 2015	Pages/Appendices	69/3
Supervisors Mr Pasi Pajula, Principal Lecturer and Mr Eero Antikainen, Research Manager			
Client Organisation/ Partners Savonia University of Applied Sciences/ The Geological Survey of Finland (GTK)			
<p>Abstract</p> <p>This thesis was made as a part of Seeway and MineWaCon projects. Their aim is to provide information, new methods and technology on recovery of heavy metals and suspended solids. The objective of this thesis was to design a new type of clarifier from plastic for mine water treatment. The client in this thesis was Savonia University of Applied Sciences with The Geological Survey of Finland as the main partner.</p> <p>The first part of this thesis was to study literature about the removal of suspended solids and heavy metals from mine water and to obtain useful information about different clarifiers. Based on the information collected from literature, the most suitable clarifier type was selected to be the base model for the new prototype of an advanced inclined tube clarifier built almost entirely from plastic. The main purpose of this clarifier was to separate suspended solids and heavy metals from a stream of 5.0 m³/h. Other requirements were that it needed to be cost efficient, easy to move and that it should fit into a small space.</p> <p>The advanced inclined tube clarifier was designed and built as a part of a larger mobile construction which includes a pre-clarifier, rapid and gentle mixing tank, a basic clarifier and a storage tank. The mixing tanks were already built a year before but the rest of the tanks had to be designed and constructed. The new pilot system was tested in 2014 at three different mines located in Eastern and Northern Finland. The advanced inclined tube clarifier was tested at the third site, Yara Ltd. in Siilinjärvi.</p> <p>During the first tests of the advanced inclined tube clarifier a better view and understanding was acquired of how the clarifier works in the field and what benefits and flaws this alternative clarifier brings compared to more standard clarifying methods. The comparison was made by dividing the chemicalized stream from the gentle mixing tank to the regular settling tank and to the advanced inclined tube clarifier. All of the nine tests were conducted with different kinds of setups where variables were the current of the treated water led to the clarifier being between 0.8 and 3.0 m³/h and the dosage of the water treatment chemical being from 0.25 to 1.0 kg/m³.</p> <p>Compared to the regular settling tank with the surface overflow rate being 0.54 m/h, the advanced inclined tube clarifier proved to be more efficient in separating phosphorus from the treated water with a surface overflow rate of 3.30 m/h. Theoretically this means that the advanced inclined tube clarifier can process over six times more water than a regular settling tank with the same area of water surface. Although more tests need to be carried out, the conclusion is that with a proper scaling of water treatment chemicals to the treated water current, the advanced inclined tube clarifier is a well-functioning prototype capable of efficiently removing suspended solids, heavy metals and nutrients from mine waters.</p>			
Keywords Lamella, inclined, tube, clarifier, settler, suspended, solid, counter-flow, separation			

SISÄLTÖ

1	JOHDANTO	6
2	KAIIVOSVESIEN SELKEYTTÄMISMENETELMÄT	8
2.1	Laskeutusallas	8
2.2	Pystyselkeytin.....	9
2.3	Vyöhykeselkeytin.....	10
2.4	Lamelliselkeytin.....	11
2.5	Sykloni.....	14
2.6	Flotaatio.....	15
2.7	Suodatusmenetelmät.....	16
2.8	Yhteenveto yleisimmistä kaivosvesien selkeyttämismenetelmistä.....	18
3	KAIIVOSVESIEN SELKEYTTÄMISEEN VAIKUTTAVAT OMINAISUUDET JA NIIDEN MITTAAMINEN	19
3.1	Erilaiset kaivosvedet	19
3.2	Selkeyttäminen painovoiman avulla	19
3.3	Virtaama, pintakuorma ja erotustehokkuus.....	20
3.4	Selkeytyksessä käytettävät kemikaalit.....	20
3.5	Virtausprofiilin mittaaminen ja havainnointi	21
3.6	Pyörteet.....	21
3.7	Lietekerroksen paksuus.....	22
4	LAMELLISELKEYTIN	23
4.1	Lamelliselkeyttimen toimintaperiaate	23
4.2	Lamellin rakenne ja virtausperiaatteet	26
4.3	Tulo- ja lähtövyöhykkeet.....	28
4.4	Käsiteltävän veden jakaminen selkeyttimeen	28
4.5	Lamellin kallistuskulma	28
4.6	Lamellirakenteiden leveys, pituus, lukumäärä ja etäisyys toisistaan.....	29
4.7	Lietepesän muoto ja lietteenpoistoratkaisut.....	29
5	KALLISTETTAVAN PUTKISELKEYTTIMEN SUUNNITTELU JA RAKENTAMINEN.....	31
5.1	Materiaalit	31
5.2	Virtaama	32
5.3	Käyttötarkoitus	32

5.4	Lamellin ja selkeyttimen rungon suunnittelu	33
5.4.1	3D-suunnittelu.....	33
5.4.2	Lamellipakan ja rungon mitoittaminen laskennallisesti	38
5.5	Selkeyttimen rungon ja lamelliputkien tilaus	42
5.6	Lamellipakan rakentaminen.....	43
5.7	Tukirakenteen suunnittelu ja toimintaperiaate	46
6	MUUN PILOT-LAITTEISTON SUUNNITTELU JA KOKOAMINEN.....	49
6.1	Lähtötiedot.....	49
6.2	Esiselkeytin	49
6.3	Pystyselkeytin.....	50
6.4	Varastoallas.....	50
6.5	Vaihtolava ja layout-suunnittelu	50
6.6	Laitteiston sijoittelu vaihtolavalle ja kuljetusten aikainen sidonta.....	52
7	VALMIS SELKEYTYSPROSESSI	55
7.1	Pilot-laitteiston toimintaperiaate.....	55
7.2	Riskiarviointi ja turvallisuustoimenpiteet.....	57
8	KALLISTETTAVAN PUTKISELKEYTTIMEN TOIMINNAN TESTAUS.....	60
8.1	Kokeiden tarkoitus ja niihin valmistautuminen.....	60
8.2	Koejärjestelyt.....	60
8.3	Tulokset ja niiden analysointi.....	61
9	JOHTOPÄÄTÖKSET	64
	LÄHTEET	68
	LIITE 1: PUTKISELKEYTTIMEN LEIKKAUSKUVAT	
	LIITE 2: PILOT-LAITTEISTON PROSESSIKAAVIO	
	LIITE 3: RAPORTTI YARA OY:N SIILINJÄRVEN LANNOITETEHTAAN KEMIALLISEN VEDENPUHDISTAMON KALKINSYÖTÖN OPTIMOINNISTA	

1 JOHDANTO

Vuonna 2011 Suomessa kaivoslain alaisia kaivoksia oli toiminnassa yhteensä 52 kappaletta, joista 12 oli metallimalmikaivoksia ja 31 teollisuusmineraalikaivoksia. Loput kaivoksista toimivat teollisuuskivilouhoksina muun muassa vuorivillan tuotannon ja vuolukiviteollisuuden parissa. (Aaltonen, Alapassi, Karhula, Karhunen, Korhonen, Loukola-Ruskeeniemi, Nybergh, Peltonen, Uusisuo 2012, 6.) Tämän lisäksi valmisteilla on noin 15 merkittävää hanketta, joilla aiotaan laajentaa olemassa olevaa, sekä käynnistää kokonaan uutta kaivostoimintaa. Näiden hankkeiden kokonaisinvestoinnit ovat arviolta yli neljä miljardia euroa. (Aaltonen ym. 2012, 14.) Kun vuonna 2010 Suomessa toimivien kaivosten liikevaihto oli 1,16 miljardia euroa, odotetaan sen kasvavan vuoteen 2015 mennessä 2,5 miljardiin euroon (Aaltonen ym. 2012, 34). Aaltosen ym. (2012, 34) mukaan kaivostoiminnan kasvun tuotosvaikutuksen kansantaloudessa arvioidaan lisääntyvän vuosikymmenen loppuun mentäessä lisävaikutusten kautta kaikkiaan yli 2,5 miljardilla eurolla vuosittain.

Merkittävimpiä kaivostoimintaa ohjaavia lakeja ovat kaivoslaki, ympäristönsuojelulaki, vesilaki, laki ympäristövaikutusten arviointimenettelystä, luonnonsuojelulaki, sekä maankäyttö- ja rakennuslaki (Aaltonen ym. 2012, 16), jotka määräävät muun muassa kaivosten vesienkäsittelyä koskevista asioista. Lakien ja säädösten kautta ympäristölupahakemuksissa kaivoksille annetaan tiettyjä ohje- ja raja-arvoja, joita kaivosvesienkäsittelyissä tulee noudattaa. Näitä tietyille päästöille annettuja arvoja seurataan mittauksen kautta laskettujen keskiarvojen avulla. Luvat edellyttävät kaivoksia myös raportoimaan akkreditoituissa laboratorioissa mitatuista tuloksista ja ovat näin ollen myös vastuussa, mikäli jonkinlaista vesistöjen pilaantumista pääsee tapahtumaan.

Lainsäädäntö ei ole nykyisin kuitenkaan ainoa asia, joka velvoittaa kaivoksia tarkempaan vesienkäsittelyyn. Muutaman viime vuoden aikana kaivoksilta vesistöihin tapahtuneiden päästöjen vuoksi ihmisten yleinen ympäristökriittisyys on lisääntynyt ja tämä muutos näkyy myös sijoittajien toiminnassa. Vakavat onnettomuudet tai päästöt vesistöön voivat heikentää kyseisen yrityksen imagoa ja aiheuttaa sitä kautta merkittäviä tappioita yritykselle.

Toiminnassa olevien kaivosten vesienkäsittelyn nykytilanne Suomessa ja ulkomailla perustuu pitkälti samaan tekniikkaan, joka on kullakin kaivoksella otettu käytäntöön silloin, kun kaivos on perustettu. Vesienkäsittelymenetelmät voidaan jakaa aktiivisiin ja passiivisiin menetelmiin. Yleisesti ottaen aktiivinen puhdistusprosessi koostuu kaivosveden kemikalointi- ja laskeutusvaiheista. Aluksi kaivoksilta tulevat vedet kerätään yhteen, jonka jälkeen niiden annetaan laskeutua, jolloin puhutaan esiselkeytyksestä. Seuraavassa vaiheessa vedet johdetaan kemikaloinnin läpi, jossa käsiteltävään virtaan syötetään kullekin vesijakeelle sopivaa vedenkäsittelykemikaalia selkeyttämisen tehostamiseksi. Tämän jälkeen käsitelty kaivosvesi johdetaan yleensä uudelleen laskeutumaan suuriin altaisiin, joista vesi lopulta johdetaan läheiseen vesistöön. Passiivisissa vedenkäsittelymenetelmissä kaivosten vedet johdetaan kosteikoille, altaisiin tai uomiin, joissa haitta-aineiden erotus tapahtuu joko kiintoaineiden laskeutuksen ja/tai käsiteltävän veden suotautumisen avulla. Passiivisia menetelmiä käytetään usein käytöstä poistetuissa kaivoksissa.

Vaikka edellä mainitut menetelmät ovatkin toimivia normaaleissa tilanteissa, tarvetta kaivosten vesienkäsittelyn parantamiselle on kuitenkin jatkuvasti. Lupaehtojen kiristyessä vanhoja laskeutusaltaita joudutaan joko suurentamaan tai vastaavasti vedenkäsittelykemikaalien määriä kasvattamaan, mikäli järjestelmiä ei uusita. Viimevuosien aikana tapahtuneet säätilojen muutokset vaikuttavat myös osaltaan siihen, että käsiteltävien kaivosvesien määrät ovat nousseet ajoittain hyvin suuriksi. Koska vedenpuhdistusjärjestelmien kokonaisvaltainen uusiminen on usein hyvin kallista ja aikaa vievää toimintaa, on helpompaa ja halvempaa parannella jo olemassa olevaa puhdistuskapasiteettia. Tällaisia vedenkäsittelyä parantavia lisäratkaisuja ovat muun muassa laskeutusaltaisiin asennettavat lamellipakat, joiden tuoma laskeuttava pinta-ala, ja sitä kautta erotustehokkuus, on yleensä noin 5–10-kertainen verrattuna tilanteeseen, jossa laskeutusaltaassa ei ole lamellia. Käytännössä tämä tarkoittaa myös sitä, että lamelleja käytettäessä selkeytykseen johdettava vesimäärä voidaan kasvattaa 5–10-kertaiseksi verrattuna perinteiseen laskeutuselkeytykseen puhdistustuloksen siitä kärsimättä. Tällä on tietysti suuria kustannusvaikutuksia. Toisaalta lamelleista koituu investointikustannuksia, mutta vastaavasti niistä saatu hyöty on suuri. Lamellien avulla laskeutukseen käytettävien altaiden pinta-alaa saadaan pienennettyä tai altaiden vedenkäsittelykapasiteettia suurennettua.

Kaivosteollisuuden raaka-aineiden hinnat ovat tällä hetkellä hyvin alhaalla. Esimerkiksi kuparin (Cu) hinta on laskenut viimeisen neljän vuoden aikana noin 45 prosenttia (Investing.com 2015). Koska useimmat hyödykkeet, kuten metallit, ovat kuitenkin ehtyviä luonnonvaroja, tulevien vuosien aikana niiden kysynnän ja markkinahintojen odotetaan kasvavan, jonka seurauksena kaivosvesien käsittelyn tarve tulee korostumaan entistä enemmän. Kaivannaisissa tullaan jatkossa hyödyntämään myös entistä pienempiä pitoisuuksia omaavia malmiesiintymiä. Kasvavaa vedenkäsittelyä varten tulee kehittää yksinkertainen, helppotoiminen ja investointi- sekä käyttökustannuksiltaan huokea vesienkäsittelymenetelmä tai -laitteisto, joka soveltuu erilaisille kaivosvesille.

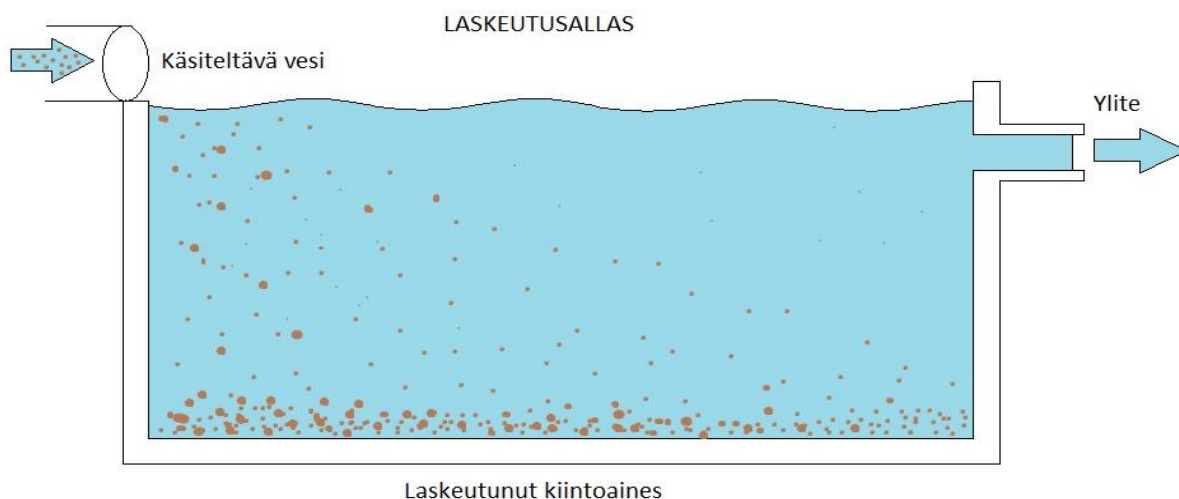
Opinnäytetyössä suunniteltavan laitteiston peruslähtökohta on tarjota testialusta käsittelymenetelmien toimivuuden arvioimiseksi ennen rakennusvaiheen suuria investointeja. Näin saadaan varmuus siitä, että menetelmä toimii myös täyden mittakaavan laitteistoissa. Tätä ajatusta silmälläpitäen alettiin Savonia-ammattikorkeakoulun, Geologian tutkimuskeskuksen (GTK) ja Itä-Suomen Yliopiston (IYF) toimesta, osana Mine Water Control (MineWaCon) ja Smart Mine Water Treatment System (Seeway) -hankkeita, kehittää polyeteenistä (PE) eli muovista valmistettavaa mobiilia pilot-luokan kaivosvesienkäsittelylaitteistoa. Yhtenä osana laitteistoon kuuluu tehostettu selkeytysallas, jonka tarkoituksena on erottaa käsiteltävästä nestevirrasta mahdollisimman paljon kiintoaineita ja raskasmetalleja. Polyeteenin valintaa selkeyttimen rakennusmateriaalina voidaan perustella hinnalla, helpolla työstettävyydellä ja valmiiden suurten sylinterimäisten, myös rakenneteknisesti tarkoitukseen soveltuvien putkituotteiden olemassa ololla, mikä tarjoaa mahdollisuuden kustannustehokkaaseen vedenkäsittelyyn jopa täyden mittakaavan sovelluksissa (Pajula 2015-02-04).

Opinnäytetyön alkuun on koottu kirjallisuudesta tietoa kaivosvesien ja selkeyttimien ominaisuuksista. Tämän jälkeen keskitytään lamelliselkeyttimen suunnitteluun ja rakentamiseen muun pilot-laitteiston ohella. Lopuksi opinnäytetyössä käydään läpi koeajojen suunnitteluun ja toteuttamiseen vaikuttavia tekijöitä, sekä tarkastellaan ja arvioidaan lamelliselkeyttimen koeajoista saatuja tuloksia.

2 KAIVOSVESIEN SELKEYTTÄMISMENETELMÄT

2.1 Laskeutusallas

Selkeytyksellä tarkoitetaan kiinteän tai nestemäisen partikkelin poistamista vedestä painovoiman tai keskipakovoiman avulla (Vesihuolto II: RIL 124-2-2004, 77). Vanhin ja yksinkertaisin kaivosvesien kiintoaineiden selkeytykseen käytetty menetelmä on laskeutusallas (Kuva 1). Laskeutusaltaan kiintoaineen laskeutuksen tehokkuus perustuu yksinkertaisimmillaan vain kahteen muuttujaan: laskeutusaltaan pinta-alaan ja virtaamaan. Kun virtaaman Q arvo jaetaan altaan laskeuttavalla pinta-alalla A , saadaan vastauksena altaan pintakuorman v_{SOR} (surface overflow rate) arvo ($\text{m}^3/\text{m}^2\text{h}$ eli m/h). Teoriassa siis kaikki kiintoainepartikkelit, joiden laskeutumisnopeus on suurempi kuin altaan pintakuorman arvo, laskeutuvat altaan pohjalle ennen kuin ne ehtivät poistua altaasta virtaaman mukana.



Kuva 1 Laskeutusallas (Huttunen 2015-01-07)

Crittenden, Trussell, Hand, Howe ja Tchobanoglous (2012, 669) esittävät, että tyypillinen pintakuorman arvo nelikulmaisille laskeutusaltaille on 1,25–2,5 m/h . Heidän määrittelynsä perustuu Kawamuran (2000) julkaistuun teokseen *Integrated Design and Operation of Water Treatment Facilities*. Sen mukaan perinteiset laskeutusaltat suunnitellaan yleensä 3,0–4,5 m syviksi, altaan syvyyden ja pituuden suhdeluvun ollessa noin 1:15, sekä leveyden ja pituuden suhdeluvun ollessa noin 1:4 (Kawamura 2000, 171).

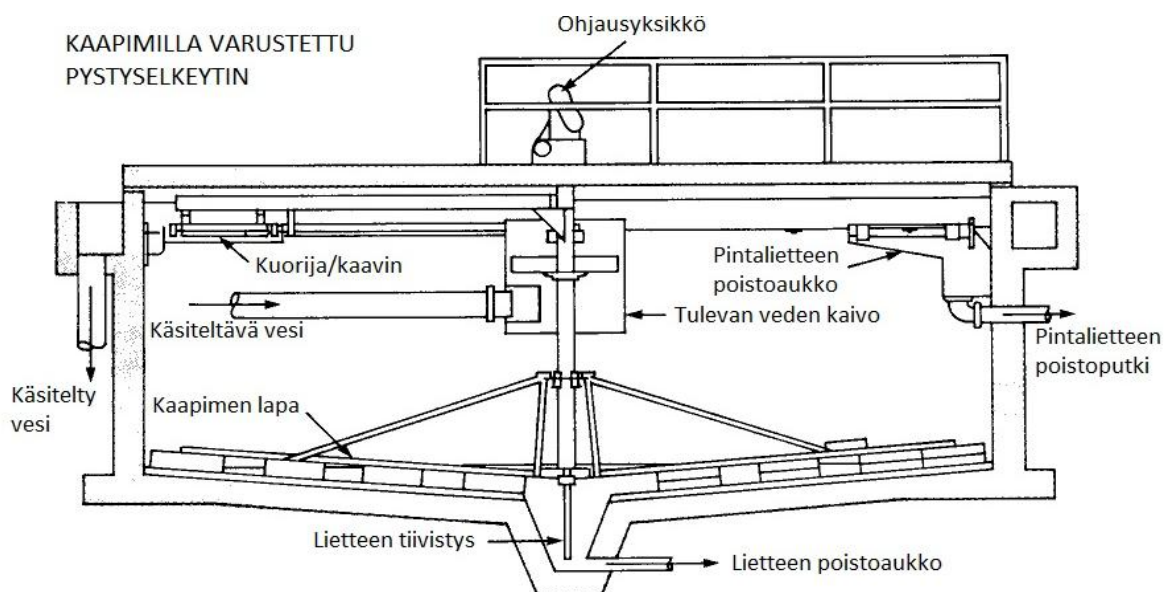
Laskeutusaltaita käytetään usein niiden yksinkertaisen rakenteen ja ylläpidon vuoksi. Niiden muoto ja rakennusmateriaalit vaihtelevat kohteen mukaan – suuresta maahan kaivetusta altaasta tai luonnon lammikosta aina betonista valettuihin nelikulmisiin tai pyöreisiin rakennelmiin. Suurien luonnon altaiden hyvänä puolena ovat pienet investointikustannukset. Altaat soveltuvat parhaiten suurien vesimäärien käsittelyyn, eivätkä ole yhtä vaativia tasaisen virtauksen suhteen. Tällaiset altaat vaativat kuitenkin aika-ajoin lietteen ruoppausta ja korotetut tai rakennetut patoaltaat saattavat vuotaa tai jopa murtua väärin mitoitetuina.

Sisätiloihin rakennetut laskeutusaltaat vaativat puolestaan usein kuljettimen altaan pohjalle, mikä siirtää laskeutuneen kiintoaineen altaan pohjalta erikseen rakennettuun lietteenpoistoaukkoon. Tällaiset kuljettimet ovat kalliita ja toimivat tehokkaasti vain nelikulmaisissa allasrakenteissa. Kulmikkaiden altaiden ongelmana ovat kuitenkin pyörteet, joita syntyy usein altaan seinämien yhtymäkohtien lähelle. Lisäksi nelikulmaiset laskeutusaltaat vaativat paljon pinta-alaa ja ovat sen vuoksi tilan kannalta kustannustehottomia ratkaisuja.

Suurissa, virtaussuunnaltaan vaakasuorissa laskeutusaltaissa ongelmaksi voivat muodostua myös altaassa olevan, sekä sinne tulevan veden lämpötilaerojen aiheuttamat oikovirtaukset. Jos altaaseen tuleva vesi on lämpimämpää kuin siellä oleva vesi, tuleva vesi virtaa suoraan altaan pinnalla kohti altaan loppupäätä. Altaan pohjalle muodostuu näin ollen virtauksellisesti kuollut alue, jossa vesi ei liiku mihinkään. Kun altaan vesi on puolestaan lämpimämpää kuin sinne tuleva vesi, altaan pinnalle syntyy virtauksellisesti kuollut alue veden virratessa altaan pohjalla. Tällaiset oikovirtaukset pienentävät käsiteltävän veden viipymää, nostavat veden virtausnopeuksia ja heikentävät laskeutuksen tehokkuutta. (Vesihuolto II: RIL 124-2-2004, 94–95.)

2.2 Pystyselkeytin

Pystyselkeyttimet (Kuva 2) ovat rakenteeltaan yleensä päältä päin ympyrän muotoisia laskeutusaltaita, joiden laitakorkeus on noin 3,0–3,6 m ja halkaisija tyypillisesti noin 3–50 m (Coleman, Esler, Halladey, Jeyanayagam, McCorquodale, Pettit, Reardon, Richardson, Tekippe, Voutchkov, Wahlberg, Wilson, Zhou 2005, 35,400). Selkeytettävä vesi tuodaan altaaseen joko altaan keskellä olevasta syöttöputkesta, altaan kehältä tai tulovirtaama jaetaan tasaisesti altaaseen erillisen jakoputken avulla, joka kiertää altaan veden pintakerroksessa, kuitenkin pinnan alapuolella, altaan säteen suuntaisesti. Pintakuorman arvo vaihtelee pystyselkeyttimissä normaalisti noin 1,25–1,88 m/h. (Crittenden ym. 2012, 689.)



Kuva 2 Kaapimilla varustettu Dortmund-pystyselkeytin kykenee poistamaan lietettä sekä pinnalta että altaan pohjalta (muokattu lähteestä GC3 Speciality Chemicals, Inc. 2015-01-29).

Pystyselkeyttimien pohja on usein kalteva (1–10 astetta) reunoilta altaan keskelle, jossa lietteenpoistoaukko sijaitsee (Clercq, Kinnear ja Vanrolleghem 2002, 5). Jos altaan pohjan kaltevuus on riittävän suuri, eli yli 50 astetta vaakatasoon nähden, liete valuu altaan pohjaa myöten lietteenpoistoaukkoa kohti painovoiman vaikutuksesta (Vesihuolto II: RIL 124-2-2004, 91). Jyrkästi kalteva pohjarakenne vaatii kuitenkin paljon tilaa pystysuunnassa varsinkin suurissa selkeyttimissä ja siitä syystä altaiden pohjarakenne on usein vain hieman kallellaan altaan keskustaa päin. Tällaisissa ratkaisuissa pystyselkeyttimet tarvitsevat altaan pohjalle kaapimen (Kuva 2), joka pitää altaan pohjalle laskeutuneen kiintoaineen koko ajan pienessä liikkeessä ja siirtää lietettä vähitellen kohti altaan keskellä olevaa lietteenpoistoaukkoa. Toinen vaihtoehto on kerätä laskeutunut liete altaan pohjalta imevän kaapimen avulla (Clercq ym. 2002, 5).

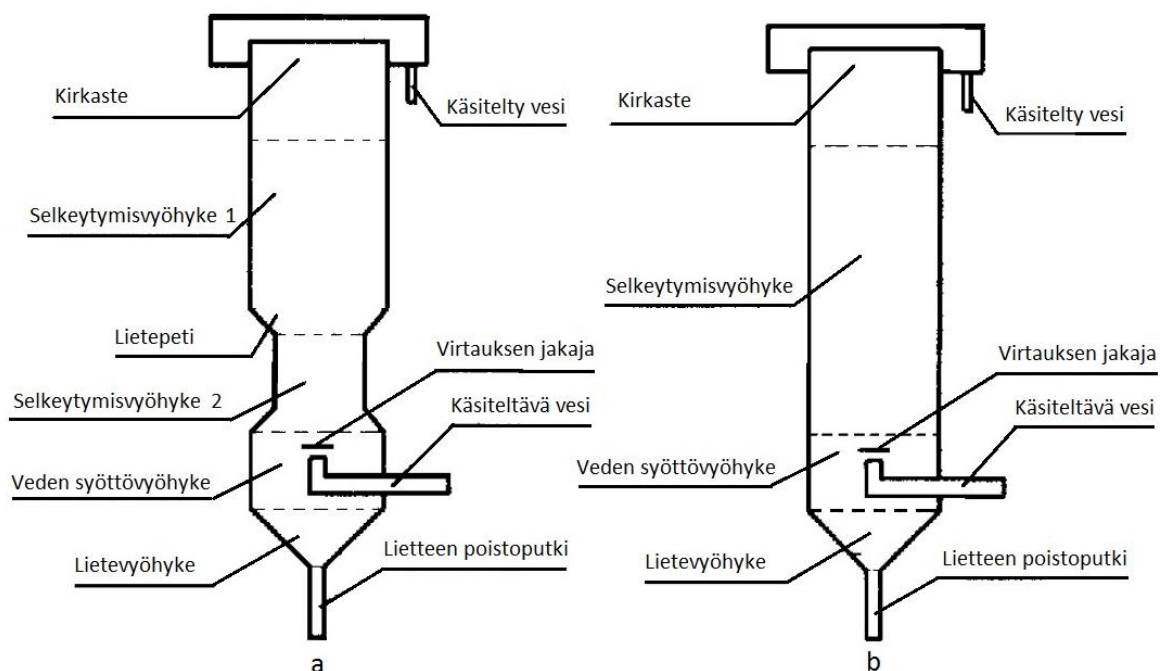
Selkeytynyt vesi poistetaan yleensä altaiden reunoilta ylitteenä. Joissakin malleissa, missä tarkoituksena on poistaa myös kelluvia partikkeleita, selkeytetty vesi poistetaan pystyselkeyttimestä hieman hallitsevan vesipinnan alapuolelta, jolloin vettä kevyemmät partikkelit eivät pääse selkeytyneen veden mukana pois altaasta. Veden pinnalla oleva kuona poistetaan omalla kaapimella erilliseen pintaletteen poistokouruun, joka kiertää altaan yläreunaa sen ulkopuolella.

Pystyselkeyttimet vaativat toimiakseen paljon liikkuvia osia, jotka kuluvat ajan myötä. Samoin laitteita pyörittävät moottorit vaativat valtavasti virtaa tuottaakseen tarvittavia tehoja, esimerkiksi laahaimen jatkuvaan pyörittämiseen. Lisäksi altaat vievät paljon tilaa ja ne joudutaan lähes poikkeuksetta valamaan paikalleen, jonka jälkeen niitä ei voida enää siirtää. Koska pystyselkeyttimiin voidaan asentaa laskeutusta tai flotaatiota edesauttavia komponentteja, soveltuvat ne kuitenkin hyvin erilaisiin käyttökohteisiin. Yleisimpänä kriteerinä tämän tyyppisen laitteen valinnalle ovat kuitenkin tasainen virtaama ja käsiteltävän veden laatu. Tyypillisiä kohteita pystyselkeyttimille ovat esimerkiksi jätevedenkäsittelylaitokset.

2.3 Vyöhykeselkeytin

On olemassa myös kapeampia pystyselkeyttimiä, jotka toimivat vyöhykeselkeyttiminä. Niiden laskeutustehokkuutta pystytään säätämään ja parantamaan esimerkiksi kaventamalla selkeyttimen rungon sisäpuolen ympärystä yhdestä kohtaa. Tämä kavennus tehdään virtaussuunnassa tarkasteltuna veden syöttövyöhykkeen jälkeen, jolloin laskeutusaltaaseen syntyy tämän ”kuristuksen” yläpuolelle erillinen laskeutusta tehostava lietepeti (Kuva 3). Tällaisissa ratkaisuissa tulovirtaama tuodaan selkeyttimeen yleensä selkeyttävän vyöhykkeen alapuolelta ja vesi virtaa säiliössä ylöspäin.

Lietepedin läpi kulkevan nestevirran kiintoaineet tarttuvat pedissä oleviin kiintoainehiukkasiin ja tällä tavoin vesi selkeytyy (Zhang, Chen, Li, Fan J., Fan B., Luan, Lu 2006, 858). Kirkaste poistetaan altaan yläpäästä ylitteenä. Joissain malleissa tulovirtaama tuodaan aivan selkeyttimen alaosaan, laskeutuneen lietekerroksen sisään, mutta tällainen selkeyttinmalli vaatii hitaan virtausnopeuden, jotta laskeutunut kiintoaines ei pääse nousemaan virtauksen mukana kirkasteen poistoaukkoon asti. Vyöhykeselkeyttämiseen soveltuvat parhaiten sellaiset käyttökohteet, joiden virtausmäärät ja nopeudet ovat pieniä ja laskeutuvaa kiintoainetta on paljon.

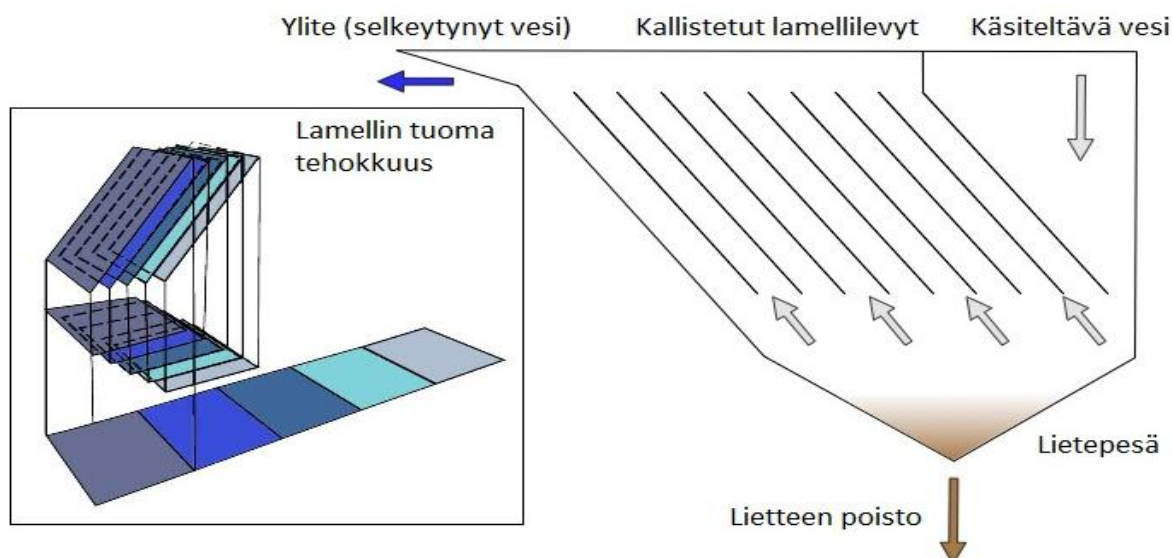


Kuva 3 Vyöhykeselkeytin on kuvassa vasemmalla ja normaali pystyselkeytin oikealla (muokattu lähteestä Zhang ym. 2006, 860).

Zhangin ja kumppaneiden (2006, 860–863) tekemässä tutkimuksessa vertailtiin kuvan 3 mukaisia pystyselkeyttimiä. Molempien selkeyttimien sisähalkaisija oli 40 mm, mutta kuvassa vasemmalla olevaan selkeyttimeen tehdyn selkeytymisvyöhyke 2:n sisähalkaisija oli kavennettu 25 mm:iin. Kumpankin laitteeseen johdettiin samalla tavalla kemikaloitua ja käsiteltyä vettä, pintakuorman arvojen ollessa ensin 3,6 m/h ja sitten 7,2 m/h. Kumpiakin laitteita ajettiin yhtä aikaa kullakin vesijakeen ja pintakuorman yhdistelmällä ja niiden kirkasteista otettiin näytteitä. Perinteinen pystyselkeytin erotti 3,6 m/h pintakuorman arvolla 60 prosenttia kiintoaineista, vyöhykeselkeyttimen päästessä 86 prosentin erotuskykyyn. 7,2 m/h pintakuormilla vastaavat luvut olivat 45 ja 79 prosenttia.

2.4 Lamelliselkeytin

Laskeutusaltaita ja pystyselkeyttimiä voidaan tehostaa niihin asennettavilla lamelliratkaisuilla. Lamellin laskeutustehokkuus perustuu lamellin rakenteen tuomaan vaakatasoon projisoidun laskeutuspin-ta-alan lisäämiseen (Kuva 4). Normaali lamellin tuoma tehokkuus on noin 5–10-kertainen perinteiseen laskeutusaltaseen verrattuna, pintakuorman arvon vaihdeltaessa yleensä noin 2,5–7,5 m/h (Crittenden ym. 2012, 681). Lamellin rakenteena käytetään yleisesti metallisia levyjä jotka asennetaan kuvan 4 mukaisesti kaltevaan 30–60 asteen kulmaan vaakatasoon nähden. Myös putkia käytetään lamellin rakenteena, jolloin putket asennetaan altaaseen halutulle kohdalle ennen kirkasteen poistoaukkoa. Muitakin lamellirakenteita on olemassa, kuten heksagonaalinen rakenne (Kuva 6), sekä muut taitetut, hitsatut ja valetut teräslevy- ja muovimallit (Crittenden ym. 2012, 688).

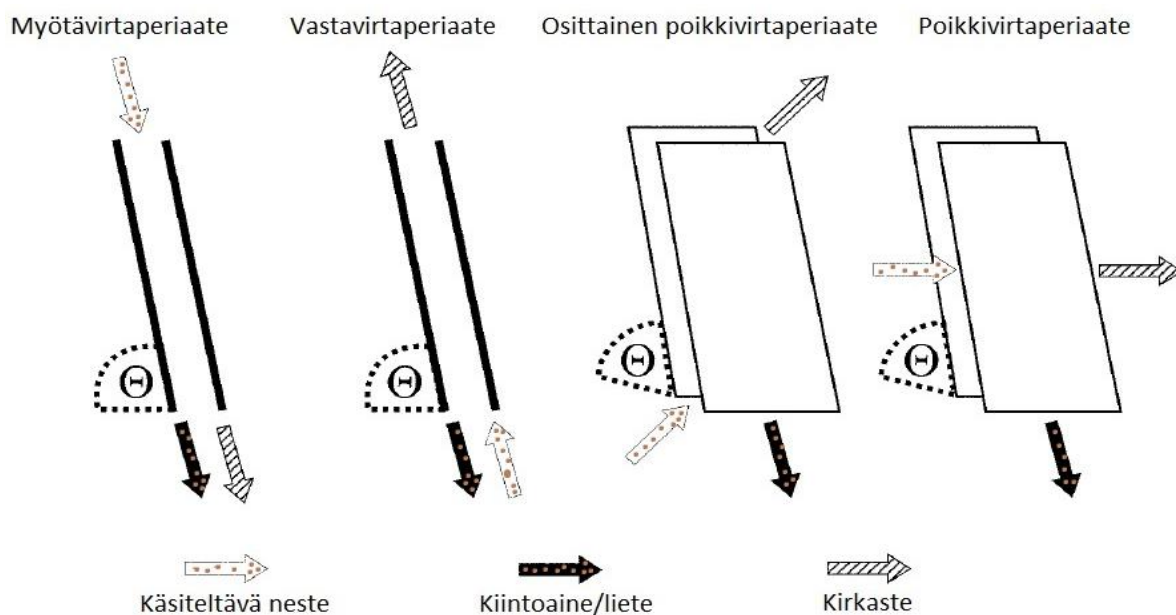


Kuva 4 Lamellipakan tuoman laskeutuspinta-alan tehokkuus on havainnollistettu kuvassa vasemmalta ja lamelliselkeyttimen virtausperiaate oikealla (muokattu lähteistä Jorsun Separation Tec 2015-01-29 ja CEICSep 2015-01-29).

Lamelliselkeytin voi toimia neljällä eri virtausperiaatteella, kuten Kuva 5 on esitetty. Myötävirtaperiaatteella toimivassa lamelliselkeyttimessä käsiteltävä vesi johdetaan lamelliselkeyttimen sisään lamellin päältä, josta virtaus jatkaa lamellin läpi alaspäin. Lamellin sisällä kiintoainepartikkelit laskeutuvat lamellin pinnalle ja valuvat virtauksen kanssa samaan suuntaan kohti selkeyttimen pohjalla olevaa lietepesää. Selkeytynyt vesi, eli kirkaste, johdetaan joko takaisin selkeyttimen yläosaan ja poistetaan ylitteenä tai se johdetaan pois erillistä poistoputkea myöten lietepesän yläpuolelta. (Coleman ym. 2005, 75.)

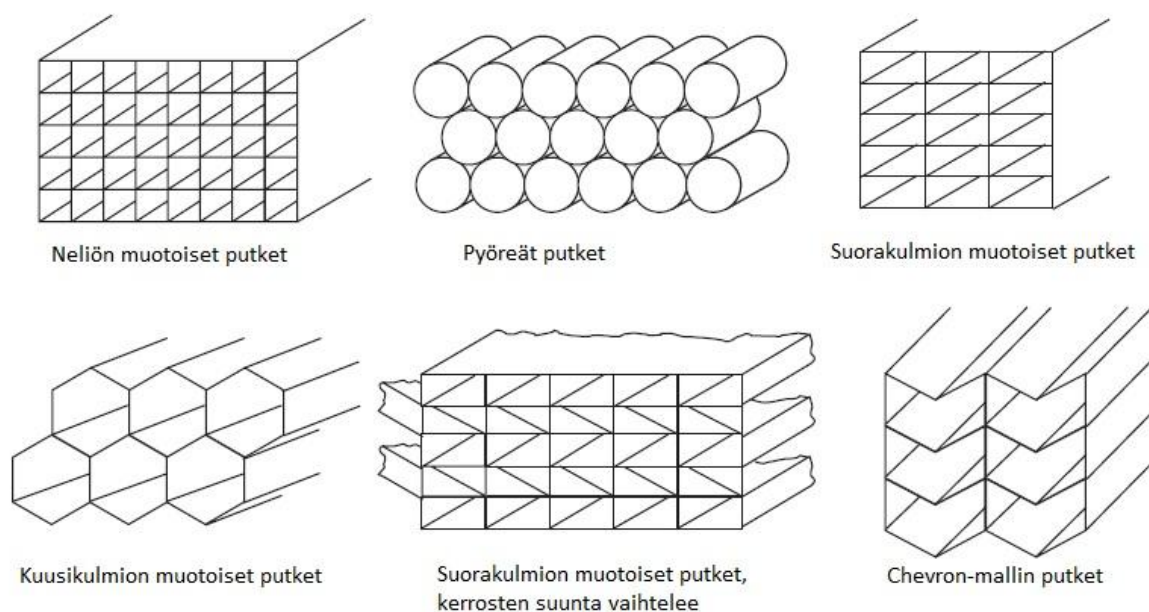
Vastavirtaperiaatteella toimivassa lamelliselkeyttimessä käsiteltävä vesi johdetaan selkeyttimen sisään lamellin alapuolelta (Kuva 5). Tästä virtaus jatkaa ylöspäin lamellin läpi kohti kirkasteen poistoa. Lamellin sisällä kiintoaine laskeutuu jälleen lamellin levyjen tai putkien pinnalle, josta se lähtee painovoiman vaikutuksesta virtaamaan kohti selkeyttimen pohjalla olevaa lietepesää. Selkeytynyt vesi johdetaan pois lamellin päältä ylitteenä. Vastavirtaperiaatteella toimivassa selkeyttimessä käsiteltävän veden ja laskeutuneen kiintoainevirran virtaussuunnat ovat siis vastakkaiset. (Coleman ym. 2005, 75.)

Lisäksi on olemassa poikkivirtaperiaatteella toimivia lamelliselkeyttimiä, joissa käsiteltävän nesteen virtaussuunta on osittain poikittainen tai täysin 90 asteen kulmassa laskeutuneen kiintoaineen virtaussuuntaan nähden. Tällaiset sovellukset vaativat toimiakseen suuremman tilan leveyssuunnassa, kuin myötä- tai vastavirtaperiaatteella toimivat lamelliselkeyttimet. Lisäksi niiden lamellin rakenne ei voi muodostua putkimaisista rakenteista, vaan lamellien tulee olla levymäisiä virtaussuunnan säilyttämiseksi. Hyvänä puolena poikkivirtaperiaatteella toimivissa selkeyttimissä on kuitenkin se, että pystysuunnassa oleva tilantarve ei ole niin suuri kuin myötävirtaperiaatteella toimivissa selkeyttimissä ja toisaalta laskeutuneen kiintoaineen ja käsiteltävän nesteen välinen kitka ei ole niin suuri kuin vastavirtaperiaatteella toimivissa lamelliselkeyttimissä.



Kuva 5 Lamelliin tulevan käsiteltävän nesteen, sekä poistuvan lietteen ja kirkasteen virtaussuunnat ovat merkitty kuvaan nuolilla (muokattu lähteestä Coleman ym. 2005, 76).

Yleensä lamellin rakenteina käytetään metallia sen työstettävyyden ja kestävyysvuoksi, mutta metallinen rakenne painaa ja maksaa paljon, verrattuna esimerkiksi muovisiin rakenteisiin. Muovia ei kuitenkaan pysty hyödyntämään sen lujuusominaisuuksien vuoksi yhtä hyvin suorissa, levymäisissä rakenteissa, kuin pyöreissä, putkimaisissa rakenteissa (Kuva 6). Lamelliselkeytyksestä ja lamellin toimintaperiaatteista on kerrottu lisää kappaleessa 4.

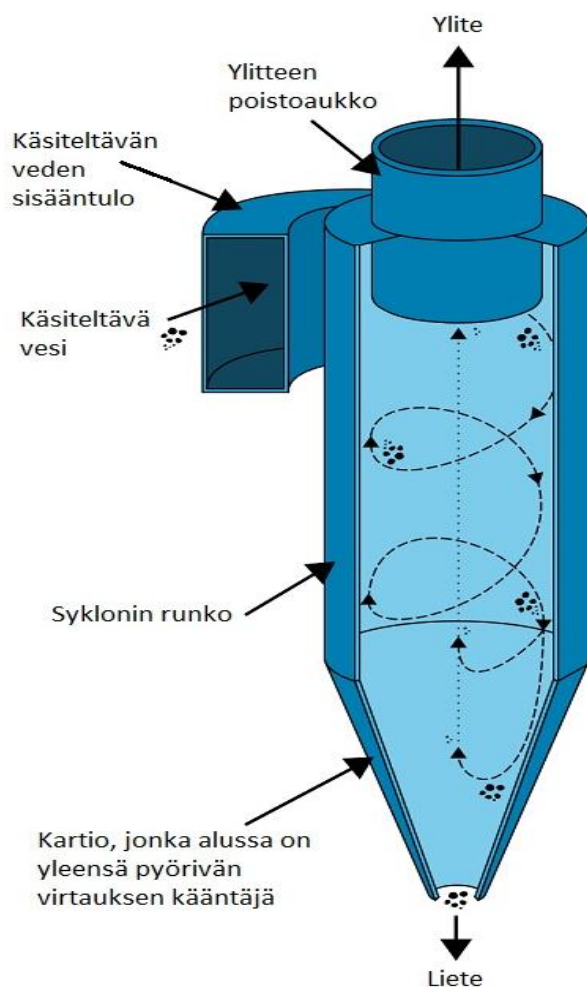


Kuva 6 Lamelliputkia pystytään valmistamaan erimuotoisina (muokattu lähteestä Crittenden ym. 2012, 688).

2.5 Sykloni

Syklonien toimintaperiaate perustuu riittävään nopeuteen ja keskipakoisvoimaan. Syklonin sisäkehäle pumpataan kovalla nopeudella selkeytettävää vettä, jolloin vesi ja kiintoaine lähtevät kiertämään syklonin kehää (Kuva 7). Kevyempi jae, eli vesi johdetaan ylös syklonin keskellä olevan poistoaukon kautta, kun taas raskaampana jakeena oleva kiintoaines painuu syklonin seinämää vasten ja jatkaa matkaansa suppilomaisen syklonin alaosan poistoaukkoon, josta kiintoaine/liete johdetaan alitteena pois. (Advanced Water Treatment 2015-02-27.) Sama periaate toimii myös kaasuille.

Syklonille tulevan virtauksen nopeuden nostaminen riittävälle tasolle vaatii pumppausta, joka ei sovellu vesille, joihin on lisätty saostuskemikaaleja. Näin ollen tämä energiaa vaativa prosessi sopii paremmin esiselkeyttimiksi, eikä niinkään primääriselkeyttimiksi. Lisäksi kovalla vauhdilla kulkeutuva kiintoaines kuluttaa syklonin, putkien ja pumppujen rakenteita. Tekniikka on sinänsä tuttua ja yksinkertaista, mutta se vaatii usein suuria investointi- ja kunnossapitokustannuksia, soveltuen siten pienempien vesimäärien käsittelyyn. Käsittävän veden virtaaman tulee olla lähes vakio, jotta laitteisto soveltuu jatkuvatoimiseen käyttöön. Pumppujen, putkistojen ja syklonin rakenteista riippuen veden laadun tulee olla myös suhteellisen tasaista.



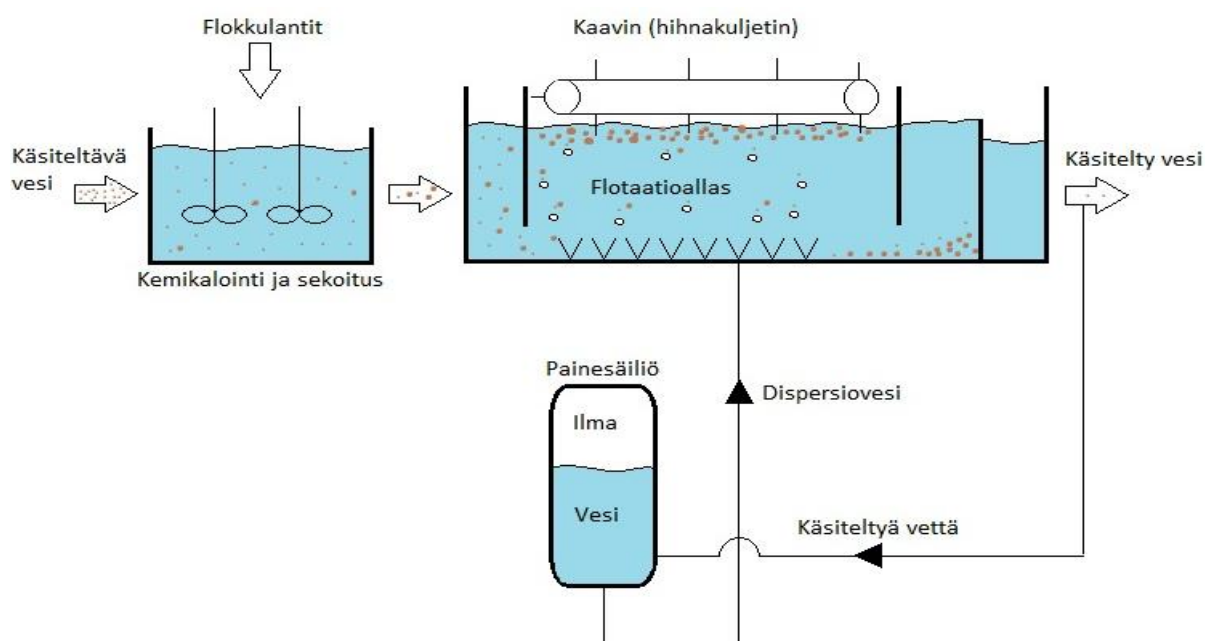
Kuva 7 Syklonin toiminta perustuu keskipakoisvoimaan (muokattu lähteestä Burnett 2015-01-29).

2.6 Flotaatio

Selkeytettävissä vesissä saattaa kohteesta riippuen olla paljon kiintoainetta, jonka tiheys ei eroa juurikaan veden tiheydestä. Tällaisia vesiä käsiteltäessä käytetään usein apuna flotaatiota. Aluksi käsiteltävään veteen lisätään flokkulantteja, joiden tarkoituksena on pienentää kiintoainehiukkasten pintavarausta ja näin ollen auttaa partikkeleiden tarttumista toisiinsa. Tätä kutsutaan koagulaatio-flokkausvaiheeksi. Flotaatioaltaassa muodostuneet hiukkaset pyritään nostamaan altaan pinnalle, josta veden pinnassa oleva kuona kerätään pois. Kuona voidaan poistaa joko kaapimien avulla, jotka siirtävät kuonan mekaanisesti veden pinnasta (Kuva 8) tai pinnalle noussut kuona voidaan poistaa altaan reunoilta ylitteenä erillisiin poistokouruihin.

Flotaatioaltaan hiukkasten nousemista altaan pinnalle voidaan tehostaa pienten ilmakuplien avulla (Kuva 8). Tämä toimenpide toteutetaan dispersioveden avulla, joka muodostuu käsitellyn veden ja ilman seoksesta. Käsiteltyä vettä pumpataan pienenä sivuvirtana dispersiovesisäiliöön, joka on noin puolillaan kompressorin tuottamaa paineilmaa. Säiliössä vallitseva ylipaine mahdollistaa ilman runsaan liukenemisen veteen. Kun korkeapaineinen dispersiovesi johdetaan painesäiliöstä flotaatioaltaan pohjalla oleviin dispersiovesisuuttimiin, nestefaasissa oleva ilma vapautuu paineen alentuessa pieninä kuplina ympäröivään veteen. Nämä mikrokuplat nostattavat muodostuneita hiukkasia flotaatioaltaan pohjalta kohti pintaa. (Pajula 2015-02-04.)

Flotaatioaltaiden hyvänä puolena on se, että niiden toiminta perustuu kiintoaineen nostamiseen, eikä laskeutumiseen. Näin ollen flotaatioaltaiden pintakuormat voivat olla kohteesta ja altaan tekniikasta riippuen yli kymmenkertaisia perinteisiin laskeutusmenetelmiin nähden. Heikkona puolena pelkässä flotaatiossa on kuitenkin se, että se tarvitsee usein esiselkeyttimen laskeutuvan kiintoaineen erottamiseen. Markkinoilla on kuitenkin olemassa kehittyneempiä DAF-selkeyttimiä (Dissolved Air Flotation), jotka pystyvät erottamaan suurilla pintakuormilla sekä raskaita että kevyitä kiintoaineita.



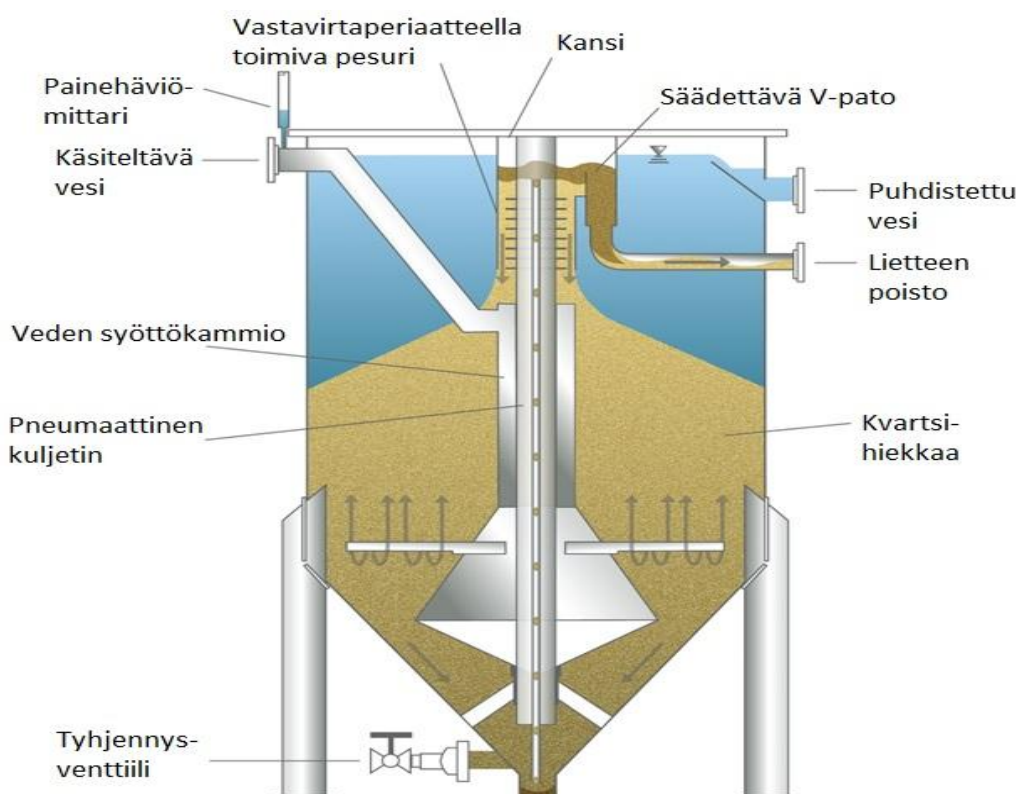
Kuva 8 Kemikalointi- ja flotaatioallas (Huttunen 2015-01-07)

2.7 Suodatusmenetelmät

Suodatuksessa käsiteltävä vesi johdetaan tiiviin suodatinmateriaalin läpi, jolloin useimmat kiinto-ainehiukkaset jäävät suodatinkerrokseen tai sen pinnalle. Suodattimen kiintoaineen erotusta tehos- tavana materiaalina voivat toimia esimerkiksi normaali puhdistettu hiekka, kvartsihiekka, keraamiset tai synteettiset suodatinkappaleet, metalliset ja muoviset verkot, tai kankaat. Suodatinmateriaalista ja sen ominaisuuksista riippuen suodattimet voidaan jakaa useisiin eri luokkiin, joita ovat muun muassa

1. välppäys
2. rumpusiivilöinti
3. hiekkasuodatus
4. mikro-suodatus
5. ultrasuodatus
6. nanosuodatus ja
7. käänteisosmoosi.

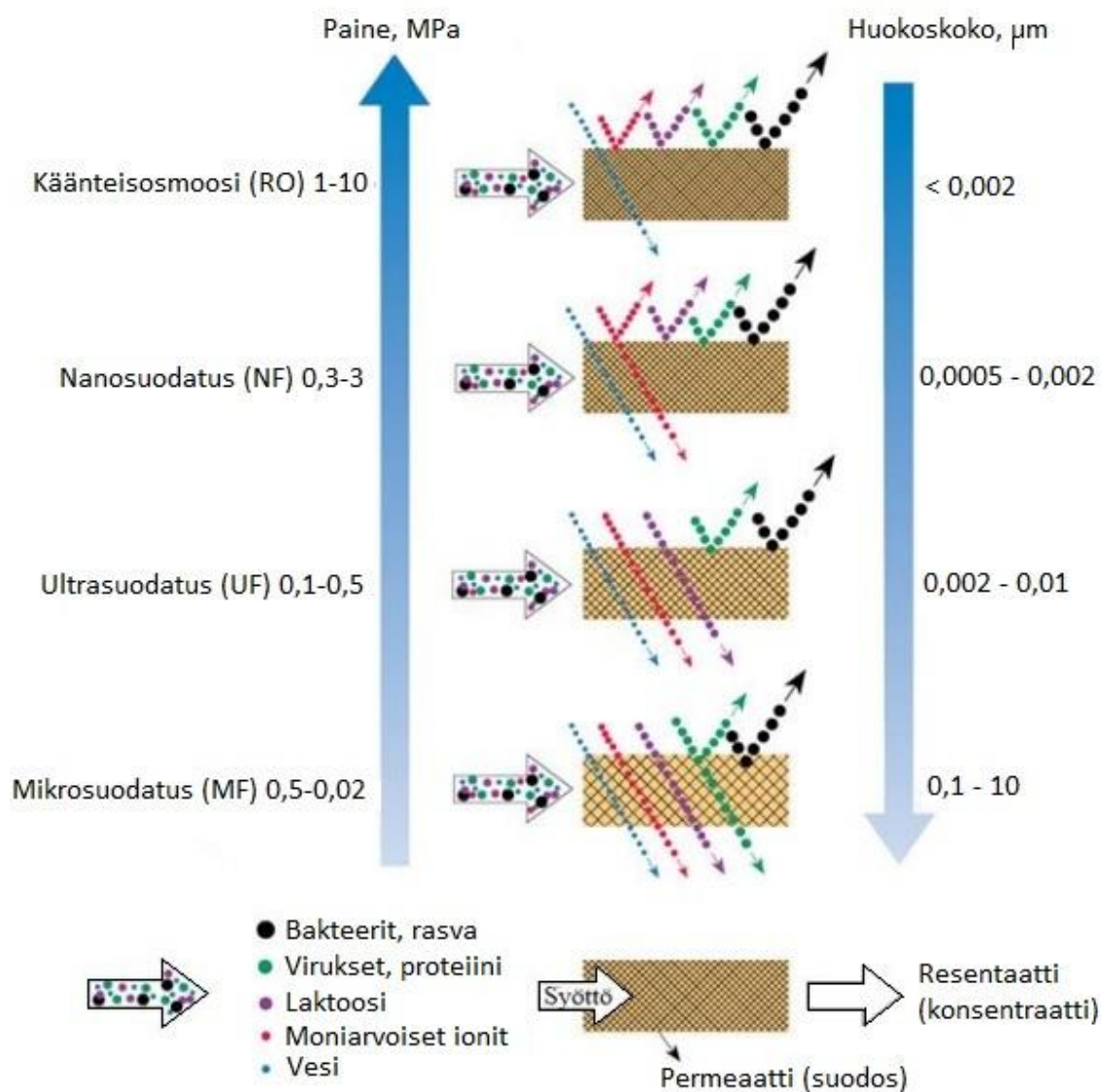
Välppäyksessä käsiteltävästä vedestä erotellaan kaikkein suurimmat kiintoainekappaleet. Tätä menetelmää käytetään esimerkiksi jätevedenpuhdistuslaitoksilla, joissa välpällä kerätään muun muassa viemäristä kulkeutuneita risuja. Hiekkasuodatuksessa käsiteltävä vesi johdetaan hiekkakerroksen läpi, johon veden sisältämät kiintoainepartikkelit suodattuvat. Pidemmälle kehitellyissä hiekkasuodattimissa voi olla myös automaattisella ohjauksella oleva hiekkapedin puhdistus, sekä erillinen lietteen poisto (Kuva 9). Hiekkakerrokseen voidaan viljellä myös mikrobikantoja, jotka puolestaan poistavat käsiteltävästä vedestä haitallisia bakteereja ja yhdisteitä.



Kuva 9 Dynasand-hiekkasuodatin (muokattu lähteestä Headworks BIO 2015-01-29)

Mikro-, ultra- ja nanosuodatuksista sekä käänteisosmoosista puhuttaessa tarkoitetaan yleensä suodattimia, joiden kiintoaineiden erotus perustuu kalvoihin tai putkiin. Nämä kalvot tai putket ovat materiaaliltaan usein muovia, joiden pinta koostuu pienistä rei'istä. Reikien koko ja syötettävän veden paine ratkaisevat sen, kuinka paljon suodattimet pystyvät erottamaan käsiteltävän veden kiintoainetta. Mikro-suodattimissa reikien huokoskoko on noin 0,1–10,0 μm (Retsja 2012, 5), kun taas käänteisosmoosissa reikien koko on alle 0,002 μm (Kuva 10).

Hyvänä puolena monissa suodattimissa on niiden erotustehokkuus, mutta usein niiden hankinta- ja ylläpitokustannukset ovat puolestaan suuria. Lisäksi paljon kiintoainetta sisältävien vesien käsittelyssä suodattimet tukkeutuvat helposti ja niitä joudutaan jatkuvasti puhdistamaan. Monet suodattimet soveltuvatkin paremmin puhtaammille vesille, kuten pohja- ja pintavesien käsittelyyn.



Kuva 10 Erilaiset kalvosuodatusmenetelmät ovat esitettyinä käytettävän vedenpaineen, kalvojen huokoskoon ja erotuskyvyn mukaan (muokattu lähteestä Retsja 2012, 4).

2.8 Yhteenveto yleisimmistä kaivosvesien selkeyttämismenetelmistä

Taulukkoon 1 on tehty yhteenveto eri vedenkäsittelymenetelmien pintakuormista ja käyttökohteista, sekä listattu menetelmien merkittävimpiä hyviä ja huonoja puolia. Pintakuormissa suodatuksella ja flotaatiolla päästään parempiin arvoihin verrattuna esimerkiksi lamelliselkeytykseen. Suodatuksen huonona puolena on kuitenkin suodattimen tukkeutuminen paljon kiintoainetta sisältävillä vesijakeilla, eikä se siten sovellu hyvin primääriselkeyttimeksi kaivosympäristöissä. Flotaattorit ja niistä kehitetyneemmät DAF-laitteistot ovat puolestaan hyvin kalliita. Lamelliselkeytin pystytään kuitenkin investoimaan suhteellisen pienillä kustannuksilla ja tarvittaessa pelkkä lamellirakenne voidaan lisätä jo olemassa olevaan laitteistoon.

Taulukko 1 Eri vedenkäsittelymenetelmien pintakuormat, käyttökohteet sekä niiden hyvät ja huonot ominaisuudet on listattu taulukkoon (a) Vesihuolto II: RIL 124-2-2004, 87; b) Crittenden ym. 2012, 681, 689 ja 703; c) Zhang ym. 2006, 861; d) Wiser 2015-03-19; e) Ränkman 2010, 13 ja 18).

Menetelmä	Pintakuorma	Käyttökohde	Hyvää/huonoa (+/-)
Laskeutusallas	0,8–2,5 m/h a), b)	Suuren mittakaavan laitokset	+ Helppokäyttöinen, varmatointinen ja voidaan tehostaa eri moduuleilla – Vie paljon tilaa
Pystyselkeytin	1,25–1,88 m/h b)	Keskikokoiset ja pienet laitokset	+ Korkea erotustehokkuus, vie vähän tilaa – Oikovirtaukset, herkkä kuormituksen vaihtelulle
Vyöhykeselkeytin	0,16–7,2 m/h c)	Pienet ja keskisuuret jätevedenkäsittelylaitokset	+ Toimii hyvin yhdistettynä flotaatioon – Vaatii pitkän ajan lietepedin muodostumiseksi, herkkä kuormitusten vaihtelulle
Lamelliselkeytin	2,5–7,5 m/h b)	Hyvin laaja käyttöympäristö	+ Hyvä erotustehokkuus ja kapasiteetti, lamelli voidaan erillisasentaa muihin altaisiin – vaatii usein säännöllistä puhdistusta
Sykloni	18–20 m/s (virtausnopeus) d)	Esikäsittelymenetelmä	+ suuret käsittelymäärät – laitteisto kuluu nopeasti eikä sovellu primääriselkeyttimeksi
Flotaatio/DAF	5–45 m/h b)	Suuren mittakaavan laitokset	+ suurten virtaamien tehokas käsittely – kallis investoida, paljon liikkuvia ja hajoavia osia
Välppäys/siivilöinti/suodatus	0,038–150 m/h e)	Kunnallinen vedenkäsittely, sekä muut puhdasta vettä tarvitsevat yritykset	+ Erinomainen puhdistustulos, pystytään erottelemaan taudinaiheuttajat vedestä – Kallis investoida ja vaatii jatkuvaa huoltoa koska suodattimet tukkiutuvat helposti

3 KAIVOSVESIEN SELKEYTTÄMISEEN VAIKUTTAVAT OMINAISUUDET JA NIIDEN MITTAAMINEN

3.1 Erilaiset kaivosvedet

Suomen kaivoksilla louhittavista metallimalmeista yleisimpiä ovat kulta, nikkeli, kupari, sinkki, rikki, hopea ja rauta. Teollisuusmineraaleista louhitaan eniten muun muassa kalkkikiveä, kvartssia, maasälpää, apatiittia, talkkia ja teollisuuskiviä. Lisäksi joiltakin kaivoksilta saadaan jalokiviä. (Aaltonen ym. 2012, 14.) Yhteistä näille kaikille toimijoille on kuitenkin se, että louhinnan sivutuotteena syntyy suuria määriä irtonaista hiekkaa ja pölyä, jotka muodostavat suuren osan kaivosvesien kiintoaineista.

Jokaiselta kaivokselta tulee koostumukseltaan erilaisia kaivosvesiä, riippuen muun muassa maainesten ominaisuuksista, pintavalunnan määrästä ja niiden hallinnasta, räjäytyksistä ja niissä käytettävistä aineista, muista louhintatavoista, malminerotusmenetelmistä, sekä rikastusvaiheiden prosessi- ja jätevesistä. Koska syntyvien kaivosvesien laatu vaihtelee kohteen mukaan, niitä on hankala verrata keskenään. Näin ollen kaivosten päästöjäkään ei voi suoraan verrata toisiinsa, eikä yhden kaivoksen vesijakeesta voi suoraan päätellä, mitä toisen, samaa lopputuotetta valmistavan kaivoksen vesijae sisältää. Jokaisen kaivoksen kaivosvesistä pyritään kuitenkin poistamaan prosesseista vesiin tulevia haitta-aineita, kuten erilaisia seoksia, myrkkijä, raskasmetalleja, ravinteita ja kiintoaineita ennen vesistöön johtamista. Yhtenä tärkeimmistä vesien puhdistuksen osaprosesseista on selkeyttäminen eli kiintoaineiden erottaminen kaivosvesistä.

3.2 Selkeyttäminen painovoiman avulla

Selkeyttäminen tarkoittaa kiintoaineen erottamista nestefaasista. Kiintoaineet voivat olla ympäröivää nestettä kevyempiä, jolloin ne pyrkivät nousemaan nesteen yläpuolelle. Painovoiman avulla tapahtuvassa selkeytyksessä ympäröivää nestettä raskaammat kiintoaineet laskeutuvat nesteen alapuolelle painovoiman vaikutuksesta. Kiintoaineiden laskeutumisenopeus riippuu kiintoaineiden ja niitä ympäröivän nesteen ominaisuuksista. Tällaisia arvoja ovat kiintoaineen tiheys, koko, muoto ja massa, sekä ympäröivän nesteen tiheys, lämpötila ja viskositeetti. (Vesihuolto II: RIL 124-2-2004, 78–80.) Kiintoaineiden selkeytystehokkuus riippuu siis siitä, kuinka hitaasti eroteltava kiintoaine laskeutuu. Tässä opinnäytetyössä perehdytään nestettä raskaampien hiukkasten erottamiseen laskeutuksen avulla.

Koska kaikkein hienoimmat kiintoaineet ovat kooltaan hyvin pieniä, halkaisijaltaan jopa alle 1,0 µm, on niiden laskeutumisenopeus erittäin pieni. Kiintoainepartikkelin, joka on halkaisijaltaan 1,0 µm ja tiheydeltään 2 650 kg/m³, laskeutumisenopeus liikkumattomassa vedessä, jonka lämpötila on 10 °C, on 0,000 055 440 m/h (Vesihuolto II: RIL 124-2-2004, 79). Tällaisen savihiukkasen erottamiseksi tarvittaisiin vastaava selkeyttimen tuoma pintakuorman suuruus, joka ei useimmissa laitteistoissa edes tehokkaalla lamellilla ole taloudellisesti kannattavaa. Tämän vuoksi kaikkein pienimpiä kiintoainehiukkasia ei kaivosvesistä pyritä aina erottamaan, jolloin mitoitusarvona käytettävä pintakuorman suuruus joudutaan määrittelemään suunnitteluvaiheessa erotustehokkuuden kautta.

3.3 Virtaama, pintakuorma ja erotustehokkuus

Pintakuorman arvo kertoo, kuinka nopeasti vesimassa nousee selkeytysaltaassa ylöspäin tiettyä aikayksikköä kohden. Pintakuorman v_{SOR} arvo voidaan laskea virtaaman Q ja altaan selkeyttävän pinta-alan A osamääränä ja usein se ilmoitetaan metreinä tunnissa. Tämä tarkoittaa sitä, että selkeytysallas pystyy erottamaan vedestä kaikki ne kiintoainehiukkaset, joiden maan vetovoiman G aiheuttama pohjaa päin kohtisuora laskeutumisenopeus v on suurempi tai yhtä suuri kuin pintakuorman v_{SOR} arvo, eli ylöspäin kohtisuoraan suuntautuvan virtauksen nopeus. Loput hiukkaset, joiden laskeutumisenopeus on pintakuorman arvoa pienempi, eivät välttämättä ennätä laskeutua selkeyttimessä. Tarkemmin ottaen ne erottuvat nopeuksien suhteessa eli v/v_{SOR} . (Vesihuolto II: RIL 124-2-2004, 87.) Crittenden ym. (2012, 689) esittävät tutkimuksessaan, että tyypillinen pintakuorman arvo laskeutusaltaille on noin 1,25–2,5 m/h, kun taas Vesihuolto II:n (Vesihuolto II: RIL 124-2-2004, 87) mukaan pintakuorman arvo vaihtelee normaalisti 0,8–1,5 m/h.

Pintakuormateorian oletukset pitävät kuitenkin paikkansa vain osittain. Tämä teoria ei ota huomioon selkeyttimen tulo- ja lähtövyöhykkeiden virtauksen epätasaista jakautumista virtaukseen nähden pystysuorassa leikkauksessa. Lisäksi lietteen epätasainen kerääntyminen ja sen poisto vaikeuttavat kiintoainepartikkeleiden laskeutumista. Silti pintakuorma on yleisimmin käytetty selkeytinjärjestelmien suunnittelussa oleva mitoitusparametri. (Vesihuolto II: RIL 124-2-2004, 87–88.) Tässä opinäytetyössä selkeyttimen mitoituksessa käytetään apuna pintakuormateoriaa.

Painovoimaan perustuvan selkeyttimen pintakuorman arvon ja sitä kautta selkeyttimen koon ja mahdollisen lamellin rakenteen ratkaisee usein erotustehokkuuden arvo. Selkeytystä tarvitsevien yritysten lupaehtoihin on merkitty tietyt vuosiarvot esimerkiksi kiintoaineiden päästöille. Kun tiedetään vuoden aikana yrityksestä syntyvien ja sallittujen päästöjen määrä, voidaan vesienkäsittelymenetelmille laskea näiden kahden osamäärästä erotustehokkuusprosentti. Lisäksi tiedossa olisi hyvä olla käsiteltävien vesien kiintoaineiden koko- ja massajakauma. Niiden perusteella pystytään laskemaan, mikä on kyseisen vesijakeen pienin hiukkanen, joka tulee saada erotettua, että selkeytyksen erotustehokkuus pysyy halutulla tasolla ja lupaehdot täyttyvät. Sama tarkasteluperiaate pätee myös muihin eroteltaviin aineisiin.

3.4 Selkeytyksessä käytettävät kemikaalit

Käsiteltävän veden selkeytyksessä käytetään usein apuna erilaisia kemikaaleja. Niiden tarkoituksena on selkeytysmekanismin mukaan joko saostaa pieniä partikkeleita suuremmiksi ja painavammiksi kappaleiksi tai muodostaa partikkeleista pitkiä, ketjumaisia yhdistelmiä, jotka kelluvat paremmin.

Kun kiintoainepartikkeleita halutaan saostaa suuremmiksi hiukkasiksi, puhutaan veden koaguloinnista. Siinä käsiteltävään veteen syötetään saostuskemikaalia eli koagulanttia, esimerkiksi sammutettua kalkkia $[Ca(OH)_2]$, lipeää (NaOH) tai ferrisulfaattia $[Fe_2(SO_4)_3]$. Kemikaalit neutraloivat kiintoainepartikkelien pintavarauksia, jolloin partikkelit agglomeroituvat helpommin saostumiksi. Partikkelit voivat myös adsorboitua hydrolyysin tuloksena muodostuneeseen hydroksidisaostumaan, joka on pintava-

raukseltaan positiivinen (Luukkonen ja Rämö 2012). Lisäksi vedenkäsittelykemikaalit voivat myös tarttua laskeutettavan kiintoainepartikkelin pinnalle, tehden siitä helpommin laskeutuvan. Saostusta käytetäänkin usein näistä syistä laskeutuksen apuna.

Mikäli kiintoainepartikkeleita halutaan poistaa vedestä flotaation avulla, jossa kiintoaines kerätään talteen selkeyttimen pinnalta, käytetään apuna flokkulantteja. Flokkulantit pienentävät niin ikään käsiteltävän veden hiukkasten pintavarausta, jolloin partikkelit eivät enää pyri hyljeksimään toisiaan. Tämän seurauksena partikkelit muodostavat suurempia kolloideja, joita on helpompi nostaa selkeyttimen pintaan esimerkiksi flotaattorin ilmakuplien avulla.

3.5 Virtausprofiilin mittaaminen ja havainnointi

Selkeyttimen sisällä kulkevan nesteen ja kiintoaineiden virtauksia pystytään tarkastelemaan virtausprofiileiden avulla. Tällaisia virtausprofiileja pystytään mittaamaan muun muassa impedanssitomografian avulla. Impedanssitomografisessa virtausmallinnuksessa selkeytysaltaan sisäkehälle ja/tai altaan keskelle asennetaan mitta-antureita, jotka mittaavat nestefaasissa olevien hiukkasten ja nesteen välisiä jännite-eroja ja pystyvät näin määrittämään missä yksittäinen kiintoainehiukkanen liikkuu milläkin hetkellä (Tarvainen 1999, 5).

Toinen tapa havainnoida kiintoaineen ja nesteen virtauksia ovat optiset menetelmät. Selkeytysaltaaseen asennettujen kameroiden avulla voidaan tarpeeksi kirkkaassa vedessä esimerkiksi erottaa nopeamman ja hitaamman virtaaman alueita, havaita tukoksia ja oikovirtaamia, sekä selvittää lietekerroksen korkeutta ja sen vaikutuksia virtaukseen. Altaiin pystytään myös tekemään läpinäkyvästä muovista tai lasista kapeita ikkunoita, joista altaan kehällä tapahtuvia virtauksia pystytään havainnoimaan. Optisia havainnoiteja voidaan edelleen tehostaa merkkiainetutkimuksin, jolloin veteen syötetään värjättyä ainetta (Vesihuolto II: RIL 124-2-2004, 93). Tällä tavoin voidaan paikallistaa esimerkiksi laitteessa tapahtuvia oikovirtaamia.

3.6 Pyörteet

Pyörteet ovat nestefaasissa olevia alueita, joissa neste kiertää ympyrän tai ellipsin muotoista rataa. Ilmiö ei ole toivottu selkeytysprosesseissa, joissa veden on tarkoitus liikkua jatkuvalla tasaisella nopeudella tiettyyn suuntaan. Kun pyörteitä syntyy laskeutusprosessiin, kiintoaineiden erottuminen heikkenee ja pyörteet voivat jopa kaapata mukaansa jo laskeutuneita hiukkasia esimerkiksi altaan pohjalta tai mahdollisen lamellin alapinnalta (Crittenden ym. 2012, 699).

Selkeyttimen sisälle syntyvät pyörteet aiheutuvat usein altaan rakenteesta. Syinä pyörteille voivat olla muun muassa selkeytysaltaan kulmikas muoto, tukokset lamellissa, väärin asetettu sisääntuloputken suuaukko tai liian suuri virtausnopeus tiettyssä kohtaa allasta. Suurilla, ulkotiloihin asennettavilla laitteistoilla, joiden vesipintaa ei ole peitetty, ongelmaksi saattaa muodostua myös tuuli. Sen vaikutuksesta pintakerrosten vesi lähtee kulkemaan tuulen puhaltamaan suuntaan, jolloin se syrjäyttää tieltään muuta vesifaasia, synnyttäen lopulta pyörteitä (Crittenden ym. 2012, 695).

Pyörteiden syntymistä voidaan parhaiten ehkäistä suunnitteluvaiheen mitoitusten ja ratkaisujen kautta. Suuret laitteistot on hyvä suunnitella niin, että ne pystytään tarvittaessa suojaamaan tuulelta. Jos selkeyttimessä on vesipinnan alapuolella liikkuvia osia, on hyvä huomioida suunnitteluvaiheessa niiden aiheuttama voima ympäröivään vesifaasiin ja pyrkiä pienentämään niiden suuruutta esimerkiksi muotoilemalla liikkuvat osat pyöreiksi tai muuten pienentämällä niiden aiheuttamaa vastusta.

3.7 Lietekerroksen paksuus

Selkeytysaltaan pohjalle syntyvän lietekerroksen paksuuteen vaikuttavat muun muassa

1. ympäröivän veden ja laskeutettavien kiintoaineiden ominaisuudet
2. altaan ja lietepesän tilavuus
3. selkeyttimen erotuskyky
4. pintakuorman arvo
5. pyörteet ja oikovirtaamat
6. altaan tyhjennysmekanismi ja
7. lietepesän tyhjennysväli.

Tärkein asia lietekerroksen paksuuteen liittyen on se, ettei lietteen yläpinta saa koskaan nousta liian lähelle selkeyttimen alimpia, selkeyttimen toimintaan vaikuttavia komponentteja, kuten lamellin rakennetta tai käsiteltävän veden syöttämiseen ja selkeytyneen veden poistamiseen käytettäviä putkikyhteitä. Jos lietepesää ei tyhjennetä riittävän usein, saattaa vähitellen kohoava lietekerros tukkia selkeyttimen rakenteelle kriittisiä osia. Liian korkeaksi päässyt lietekerros saattaa myös virtaavan veden ja lietepinnan välisten kitkavoimien vaikutuksesta lähteä uudelleen virtaavan veden matkaan.

Lietekerroksen paksuutta voidaan mitata jatkuvatoimisilla menetelmillä, kuten pinnankorkeus- tai paineantureiden avulla. Lietepesän kyljessä voi olla toisinaan myös läpinäkyvästä lasista tai muovista tehty ikkuna, josta lietteen kertymistä voidaan seurata.

4 LAMELLISELKEYTIN

4.1 Lamelliselkeyttimen toimintaperiaate

Lamelliselkeytyksen periaate keksittiin jo 1900-luvun alussa verinäytteitä tutkittaessa, kun punasolujen huomattiin laskeutuvan nopeammin kallistetussa, kuin pystysuorassa koeputkessa (Wisniewski 2013, 46). Tästä johdettiin lamelliselkeytyksen ajatusmalli, jonka mukaan selkeytyksen teho riippuu partikkelin alaspäin kohtisuorasta etäisyydestä lähimmälle altaassa olevalle pinnalle. Tämä perusperiaate soveltuu kaikille niille liukenemattomille kiintoainehiukkasille, joiden tiheys on suurempi kuin ympäröivän nesteen tiheys. Periaatetta ei voi kuitenkaan soveltaa suoraan nesteeseen liuenneille partikkeleille, vaan niiden erottamiseksi tarvitaan saostuskemikaaleja. Näiden saostuskemikaalien tehtävänä on saostaa liuenneita partikkeleita suuremmiksi partikkeleiksi tai kolloideiksi, jolloin niiden koko ja massa kasvavat ja ne laskeutuvat nopeammin.

Lamelliselkeyttimien mitoitus tapahtuu yleensä suoraan käyttökohteeseen ja siltä haetaan tiettyä erotustehokkuutta, joka ilmoitetaan prosentteina. Erotustehokkuuden arvo saadaan yleensä laitoksen ympäristöluvista ja se määritellään nesteen kiintoaineen massan mukaan. Jos haluttu arvo on esimerkiksi 90 prosenttia, tulisi selkeytettävän nesteen kiintoaineiden yhteenlasketusta massasta selkeytyksen jälkeen olla jäljellä korkeintaan 10 prosenttia.

Erotustehokkuuden arvon määrittämisessä ensimmäinen vaihe on nesteen kiintoainepitoisuuden, partikkelikokojakauman ja kiintoaineiden ominaisuuksien määrittäminen. Kiintoainepitoisuudet ilmoitetaan yksikössä mg/l. Jos käsiteltävän nesteen kiintoainepitoisuus on esimerkiksi 200 mg/l ja tavoitelluksi erotustehokkuudeksi määrätty arvo edellä mainittu 90 prosenttia, tulee käsitellyn nesteen kiintoainepitoisuus olla selkeytyksen jälkeen korkeintaan 20 mg/l. Partikkelikokojakauman ja kiintoaineiden ominaisuuksien avulla voidaan määrittää, mikä on pienin kiintoaineiden kokoluokka, joka tulee vielä saada eroteltua nesteestä, jotta tavoiteltu erotustehokkuus saavutetaan. Pienimmän eroteltavan kiintoainepartikkelin laskeutumisenopeus määritetään tämän jälkeen hiukkasen halkaisijan, muodon ja tiheyden, sekä nesteen tiheyden, lämpötilan ja viskositeetin perusteella.

Yksittäiseen kiintoainepartikkeliin, joka putoaa vapaasti vedessä alaspäin, vaikuttaa hiukkasen painon ja veden nostovoiman erotus (Vesihuolto II: RIL 124-2-2004, 79–80, kaavat 1–9):

$$F_1 = (\rho_s - \rho) * g * V_s , \quad (1)$$

jossa ρ_s on hiukkasen tiheys, ρ on ympäröivän nesteen tiheys, g on maan vetovoiman aiheuttama putoamiskiivitys ja V_s on hiukkasen tilavuus. Hiukkasen liikettä vastustaa voima F_D , joka saadaan seuraavasti:

$$F_D = C_D * A_C * \rho * \frac{v_s^2}{2} , \quad (2)$$

missä C_D on Newtonin vastuskerroin, A_C hiukkasen liikettä kohtisuoraan muodostuvan projektion pinta-ala ja v_S hiukkasen laskeutumisnopeus. Tasapainotilanteessa, jolloin $F_I = F_D$, tasaisella nopeudella laskeutuvan hiukkasen laskeutumisnopeudeksi saadaan kaavalla

$$v_S = \left(\frac{2g}{C_D} * \frac{\rho_s - \rho}{\rho} * \frac{V}{A_C} \right)^{\frac{1}{2}} . \quad (3)$$

Oletetaan laskeutuvan partikkelin olevan pallon muotoinen, jolloin

$$V = \frac{\pi}{6} * d^3 \text{ ja } A_C = \frac{\pi}{4} * d^2 , \quad (4), (5)$$

missä d on hiukkasen halkaisija. Sijoittamalla kaavaan 3 kaavat 4 ja 5, saadaan hiukkasen laskeutumisnopeudeksi

$$v_S = \left(\frac{4}{3} * \frac{g}{C_D} * \frac{\rho_s - \rho}{\rho} * d \right)^{\frac{1}{2}} . \quad (6)$$

Oletetaan seuraavaksi, että laskeutuminen tapahtuu selkeyttimen laminaarisella alueella, jossa $10^{-4} < Re < 1$. Silloin Newtonin vastuskertoimeksi saadaan

$$C_D = \frac{24}{Re} . \quad (7)$$

Reynoldsin luku puolestaan saadaan kaavasta

$$Re = \frac{\varphi * v_S * \rho * d}{\mu} , \quad (8)$$

jossa φ on hiukkasen muotokerroin (pyöreille hiukkasille 1,0) ja μ on nesteen dynaaminen viskositeetti. Kun kaava 8 sijoitetaan kaavaan 7, joka edelleen sijoitetaan kaavaan 6, saadaan hiukkasen laskeutumisnopeudelle ratkaistavissa oleva yhtälö:

$$v_S = \frac{g * (\rho_s - \rho) * d^2}{18 * \mu} . \quad (9)$$

Kaava 9 tunnetaan nimellä Stokesin laki. Se ei sellaisenaan ole käyttökelpoinen tai selitä yksiselitteisesti kaikkia laskeutuviin partikkeleihin vaikuttavien muuttujien korrelaatioita. Tämä johtuu siitä, että jäteveden suspendoituneet aineet eroavat usein toisistaan muun muassa koon, muodon ja tiheyden suhteen. Stokesin kaavasta pystytään kuitenkin päättämään, että partikkelin laskeutumisnopeus suurenee ympäröivän nesteen ja partikkelin välisen tiheyseron kasvaessa. Lämpötilaa nostamalla tätä tiheyseroa saadaan kasvatettua entisestään ja samalla ympäröivän nesteen viskositeetti pienenee, joka edelleen lisää partikkelin laskeutumisnopeutta. (Vesihuolto II: RIL 124-2-2004, 80–82.) Kolmas laskeutumisnopeuteen vaikuttava tekijä on partikkelin halkaisija, jota voidaan kasvattaa esimerkiksi saostuskemikaalien avulla.

Stokesin kaavan avulla laskettu pienimmän eroteltavan hiukkasen laskeutumisenopeus kertoo kuitenkin suunnittelijalle alustavasti lamelliselkeyttimen tavoitellun Hazenin virtausnopeuden, sekä selkeyttimen oman selkeyttävän vesipinnan tuoman pintakuorman yhteenlasketun maksimiarvon. Lamelliselkeyttimillä tämä arvo kuvastaa siis samaa, kuin kappaleiden 2.1 ja 3.3 kuvatut pintakuormien arvot.

Colemanin ym. (2005, 65) mukaan Hazenin virtausnopeus lasketaan kaavalla

$$v_H = \frac{Q}{A_{tp}}, \quad (10)$$

jossa v_H on Hazenin (lamellin sisällä oleva pystysuuntainen) virtausnopeus (m/h), Q on virtaaman suuruus (m^3/h) ja A_{tp} (total projected area) on lamellin vaakatasoon projisoidun tehollisen laskeutus-pinta-alan suuruus (m^2). Pintakuorman arvo lasketaan puolestaan kaavalla

$$v_{SOR} = \frac{Q}{A_S}, \quad (11)$$

jossa v_{SOR} on pintakuorman arvo (m/h) ja A_S selkeyttimen laskeuttavan vesipinnan pinta-ala (m^2) (Coleman ym. 2005, 66). Hydraulisia pintakuormia ilmoitettaessa käytetään kaavan 11 mukaan laskettuja pintakuorman arvoja. Tämä arvo ei siis välttämättä suoraan kerro sitä, mikä on selkeyttimen pienimmän eroteltavan kiintoaineen laskeutumisenopeus. Pintakuorman arvo viittaa usein enemmänkin selkeyttimen tehokkuuteen. Iso Hazenin luku lamelliselkeyttimessä tarkoittaa siis sitä, ettei se pysty erottelemaan virtaamasta kovin pieniä partikkeleita, mutta iso pintakuorman arvo ei vielä välttämättä kerro totuutta lamelliselkeyttimen erotustehokkuudesta. Selkeyttimelle, jonka lamellipakka on 55 asteen kulmassa vaakatasoon nähden ja jonka lamellilevyjen välinen kohtisuora etäisyys toisistaan on 10 cm, vaakatasoon projisoidun laskeutus-pinta-alan suhde vesipinta-alaan on noin 10:1, jolloin Hazenin virtausnopeus on suunnilleen kymmenesosan suuruinen selkeyttimen pintakuormaan nähden (Coleman ym. 2005, 66).

Haluttua Hazenin virtausnopeuden arvoa voidaan säätää joko virtaaman Q tai koko selkeyttimen tehollisen laskeutus-pinta-alan A avulla. Koska käsiteltävän veden virtaama voi kohteesta riippuen vaihdella, tulisi lamelliselkeyttimen suunnitella aina kovimmalle mahdolliselle virtaamalle. Tällä tavoin se toimii halutulla erotustehokkuudella kaikissa häiriöttömissä tilanteissa. Kun maksimivirtaama on selvitetty, jäljelle jää enää tehollisen laskeutus-pinta-alan määritys.

Lamelliselkeyttimen teholliseen laskeutus-pinta-alaan vaikuttavat selkeyttimen oma, käsiteltävälle vedelle varattu pinta-ala A_S , ja lamellin tuoma tehollinen pinta-ala. Lamellin teholliseen laskeutus-pinta-alaan A_{tp} puolestaan vaikuttaa lamellin rakenne, kuten lamellin levyjen lukumäärä n , kallistuskulma α , leveys b , pituus L tai lamellin putkien lukumäärä n , pituus L , kallistuskulma α ja putkien sisähalkaisija d_i (Vesihuolto II: RIL 124-2-2004, 85). Lamellinlevyjen tai -putkien lukumäärä taas määräytyy usein lamellille varatun tilan ja lamellilevyjen välisen etäisyyden tai putkien ulkohalkaisijan suhteen.

Levymaisille lamelleille tehollinen laskeutuspinta-ala määräytyy seuraavasti:

$$A_{tp} = n * b * L * \cos \alpha. \quad (12)$$

Putkimaisille lamellirakenteille putkien tehollinen laskeutuspinta-ala lasketaan puolestaan kaavalla

$$A_{tp} = n * d_i * L * \cos \alpha, \quad (13)$$

jossa yhden lamelliputken sisähalkaisija saadaan laskettua vähentämällä putken ulkohalkaisijasta d_e putken seinämäpaksuus kaksi kertaa. (Vesihuolto II: RIL 124-2-2004, 85, kaavat 12–13).

Kun lamellin tuoma tehollinen pinta-ala A_{tp} on saatu laskettua, voidaan aloittaa sen suuruuteen vaikuttavien tekijöiden määrittäminen ja niiden avulla rakentaa lamellista riittävän tehokas kokonaisuus käsiteltävälle vedelle.

4.2 Lamellin rakenne ja virtausperiaatteet

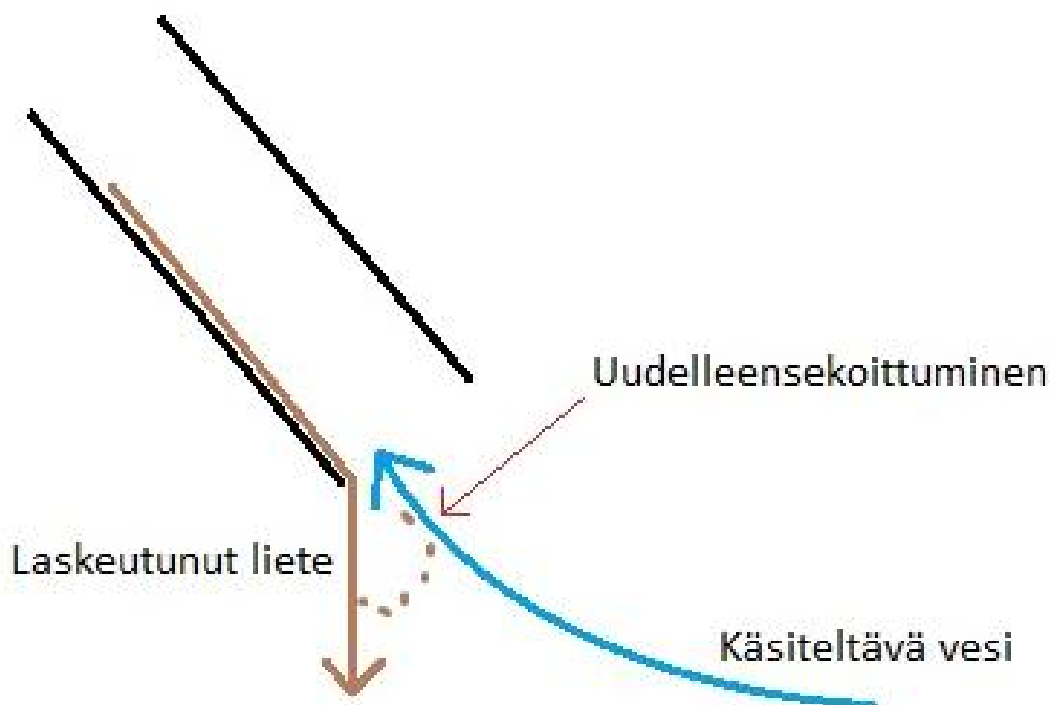
Lamelliselkeyttimessä neste voi virrata lamellin sisällä joko alhaalta ylöspäin, ylhäältä alaspäin tai poikittain lamellin läpi (katso kappale 2.4). Kiintoaine pyrkii valumaan joka tapauksessa painovoiman vaikutuksesta alaspäin, jolloin kyseessä on näin ollen joko vastavirta-, myötävirta- tai poikkivirtaperiaatteella toimiva lamelliselkeytin. Jos lamellin rakenne koostuu kennoista, kanavista tai putkista, ei poikkivirtaperiaate toimi.

Myötävirtaperiaatteella toimivassa lamelliselkeyttimessä on se hyvä puoli, että neste ja kiintoaine liikkuvat lamellin ja selkeyttimen sisällä samaan suuntaan, jolloin niiden välille ei aiheudu niin suurta kitkaa kuin vastavirtaperiaatteella toimivassa lamellissa. Näin ollen myös kiintoaineiden uudelleensekoittuminen veteen on pienempää tällä menetelmällä (Kuva 11). Lamellin rakennetta voidaan myös kallistaa enemmän, jolloin lamellilta saadaan parempi erotustehokkuus. Ongelmana myötävirtaperiaatteessa on kuitenkin kirkasteen poisto, joka joudutaan tekemään lamellin ja lietepesän väliin, jolloin voi käydä niin, että laskeutunutta lietettä pääsee kirkasteen poiston mukana eteenpäin prosessissa. Tämän estämiseksi koko selkeyttimen rakenteen on oltava korkea, jotta lamellin ja lietepesän väliin jäävästä vyöhykkeestä saadaan riittävän suuri. Toinen vaihtoehto on tehdä rakenteesta kookkaampi pituussuunnassa, jolloin kirkaste johdetaan lamellin jälkeen jonkin matkaa takaisin ylöspäin ennen sen poistoa (kuva 4). Tällainen ratkaisu vaatii kuitenkin enemmän tilaa.

Myötävirtaperiaatteella toimivassa lamelliselkeyttimessä on otettava huomioon myös se, että puhdistettava vesi tuodaan selkeyttimelle lamellin päältä. Silloin selkeyttimen tulee sijaita hieman mahdollisten esikäsitelyaltaiden (kemikalointi ym.) alapuolella, jos prosessi toimii ilman altaiden välille kytkettäviä pumppuja. Mikäli tämä ei ole mahdollista ja käsiteltävää vettä on kemikaloitu, saattaa pumppaus hajottaa kemikalointialtaissa syntyneitä flokkeja ja/tai saostumia.

Vastavirtaperiaatteessa vesi tuodaan selkeyttimeen lamellipakan alta, joko lietepesän yläpuolelta tai suoraan lietepesän läpi. Jos vesi johdetaan suoraan lietepesän lieteerroksen läpi selkeyttimeen kuten joissakin vyöhykeselkeyttimissä, niin virtausnopeuden on oltava todella pieni, jottei laskeutunut liete lähde uudestaan liikkeelle sisään virtaavan veden mukana. Johdettaessa käsiteltävä vesi lietepesän yläpuolelta lamellin läpi selkeyttimen yläosaan, voidaan käsiteltävää vettä ajaa laitteiston läpi myös suuremmilla nopeuksilla. Lamellin päältä kirkaste voidaan poistaa ylivuotona kuvan 4 tavoin.

Vastavirtaperiaatteella lamelliselkeyttimen käsiteltävän nestevirran ja lamelliin laskeutuneen kiintoainevirran välille muodostuu Salemin (2012, 23) tutkimuksen mukaan enemmän kitkaa niiden virrassa vastakkaisiin suuntiin, jolloin kiintoaineiden uudelleensekoittuminen veteen lamellin sisällä ja sen alapuolella on mahdollista (Kuva 11). Lamellin pinnalle laskeutuneen kiintoaineen poistamiseksi lamellipakka joudutaan pitämään Colemanin ym. (2005, 75) ja Crittenden ym. (2012, 687) tutkimusten mukaan vähintään 60 asteen kulmassa vaakatasoon verrattuna, mikä puolestaan pienentää selkeyttimen viemää pinta-alaa, mutta samalla laskeutuksen tehokkuus kärsii. Hyvän vastavirtaperiaatteesta tekee kuitenkin se, että kirkaste voidaan poistaa lamellin päältä, jolloin kiintoaineen ja kirkasteen uudelleen sekoittuminen ei ole vaarana. Näin ollen lamellin alapuolella oleva tila ei myöskään vaadi yhtä suurta korkeutta, ja selkeyttimen koko pysyy mahdollisimman pienenä. Selkeyttimeen tuotava puhdistettava vesi voidaan johtaa sisään lamellin alapuolelta, joka puolestaan poistaa mahdollisen pumppauksen tarpeen useimmissa kohteissa.



Kuva 11 Vastakkaisiin suuntiin menevien virtausten vaikutuksesta laskeutuneen kiintoaineen uudelleensekoittumista tapahtuu lamelliselkeyttimissä jatkuvasti (Huttunen 2015-01-07).

4.3 Tulo- ja lähtövyöhykkeet

Lamelliselkeyttimien kokoon vaikuttavat virtausperiaatteista riippuen myös tulo- ja lähtövyöhykkeiden koko. Tulovyöhyke on selkeyttimen sisään tulevalle vedelle varattu alue ennen lamellia ja lähtövyöhyke on virtaussuunnassa tarkasteltuna lamellin jälkeinen osa, josta kirkaste lopulta poistuu selkeyttimestä.

Myötävirtaperiaatteella toimivassa lamelliselkeyttimessä tulovyöhyke muodostuu lamellin yläpuolelle, josta vesi johdetaan selkeyttimen sisään. Kyseiset laitteet vaativatkin usein riittävän suuren tulovyöhykkeen koon, tai tarpeeksi suuren virtaaman, jotta käsiteltävä vesi jakautuu tasaisesti koko lamellille. Lamellin jälkeinen, alapuolinen osa, toimii tällöin lähtövyöhykkeenä.

Vastavirtaperiaatteella toimivan lamelliselkeyttimen tulovyöhyke on lamellin ja lietepesän välissä, tai sille on tehty oma osio selkeyttimeen (Kuva 4). Näin ollen virtaaman suuruudella tai tulovyöhykkeen koolla ei ole lamellin toiminnan kannalta niin suurta merkitystä kuin myötävirtaperiaatteella, sillä käsiteltävä vesi nousee selkeyttimessä tasaisesti (vaakatasossa) ylöspäin kohti lamellin päällä olevaa lähtövyöhykettä. Tulovyöhykkeen pituudella pystytään kuitenkin parantamaan käsiteltävän veden mahdollisimman tasainen jakautuminen lamellille (Salem 2012, 84). Lähtövyöhykkeen koolla ei puolestaan ole juuri merkitystä, kunhan lamellin päällä oleva vesipinta peittää lamellin kauttaaltaan. Näin turvataan lamellin kokonaisvaltainen hyödyntäminen.

4.4 Käsiteltävän veden jakaminen selkeyttimeen

Ahmed Ibrahim Salemin (2012) tekemässä tutkimuksessa vertailtiin sitä, kuinka lamelliselkeyttimelle tulevan virtaaman syöttö ja jakaminen vaikuttavat selkeyttimen erotuskykyyn. Tutkimuksessa huomattiin, että tietyille virtaamalle optimoidun suuttimen läpi tapahtuva käsiteltävän veden syöttö voi huomattavasti parantaa selkeyttimen hydraulisia ominaisuuksia, mikä edesauttaa kiintoaineiden laskeutumista.

Suuttimien avulla virtaus saadaan jaettua tasaisemmin koko lamellin alalle, oikovirtaukset, pyörteet ja lamellin turbulenttisuus pienentyvät, sekä selkeyttimen erotustehokkuus paranee. Kokeissa käytetyssä parhaiten toimivassa suuttimessa oli yhteensä 12 reikää kolmessa eri tasossa, joiden kautta vesi johdettiin lamellin alle. Jokaisen tason neljä reikää olivat samalla korkeudella suuttimeen nähden ja kunkin tason rei'illä oli eri halkaisija. Salemin (2012, 84) tutkimuksen tulosten perusteella huomattiin selkeyttimen erotustehokkuuden parantuvan jopa yli 10 prosenttia tällä tekniikalla.

4.5 Lamellin kallistuskulma

Lamellin ja samalla koko selkeyttimen tehokkuutta voidaan säätää muuttamalla selkeyttimen pintakuormaa. Lamellin pintakuorman suuruuden, eli Hazenin virtausnopeuden arvon määräävät virtaama Q , sekä lamellin vaakatasoon projisoitu, laskeuttamista edistävä kokonaispinta-ala. Lamellin kallistuskulman arvo on kirjallisuudesta saatujen tietojen mukaan myötävirtaperiaatteella noin 30–60 astetta ja vastavirtaperiaatteella noin 60 astetta vaakatasoon nähden (Coleman ym. 2005, 75; Critten-

den ym. 2012, 687). Kallistuskulma määrää osaltaan sen, kuinka suuri projisoitu tehollinen laskeutuspinta-ala lamellille syntyy. Mitä loivempi kallistuskulma on, sitä suurempi lamellin tuoma tehollinen laskeutuspinta-alakin on. Jyrkempi kallistus takaa kuitenkin paremmin laskeutuneen kiintoaineen valumisen lamellin pinnalla alaspäin, kohti lietepesää.

Myötävirtaperiaatteella alle 30 asteen kulmassa oleva lamelli voi tukkeutua, koska kiintoaine ei liu'u ja poistu lamellista yhtä nopeasti kuin suuremmilla kallistusasteilla (Crittenden ym. 2012, 687). Yli 60 asteen kallistus myötävirtaperiaatteella ei ole taas tarkoituksenmukainen, koska samaan suuntaan kulkeva vesivirta voi huonoimmassa tapauksessa vain puskea kiintoaineen lamellin läpi, jolloin kiintoaine ei välttämättä ennätä laskeutua ja erottua käsiteltävästä vedestä.

Vastavirtaperiaatteella huomattavasti alle 60 asteen kulma saattaa tehdä tukoksia lamelliin, jolloin laskeutunut kiintoaine ei lähde valumaan lamellin pinnalla alaspäin ja lamellin sisälle alkaa muodostua oikovirtaamia tiettyjen lamellin osien läpi. Jos tukoksia on riittävästi, virtausnopeus lamellin tukkeutumattomissa osissa kasvaa ja kiintoaine ei ehdi laskeutua lamellin pohjalle. Yli 60 asteen kallistuskulma on puolestaan liian jyrkkä tuottaakseen tarvittavaa tehollista lisäystä laskeutukseen.

4.6 Lamellirakenteiden leveys, pituus, lukumäärä ja etäisyys toisistaan

Lamelliputkien koko tai lamellilevyjen leveys ja niiden kohtisuora etäisyys toisistaan vaikuttavat yhtenä osatekijänä kallistuskulman lisäksi siihen, kuinka suuri lamellin vaakatasoon projisoitu pinta-ala tulee olemaan. Nämä mitat siis vaikuttavat kaavojen 12 ja 13 perusteella lamellin tehokkuuteen. Mitä pienempi matka kahden lamellilevyn välissä on tai mitä pienempiä putket ovat, sitä tehokkaampi lamelli on. Jos tämä virtaustila lamellin sisällä on kuitenkin liian kapea, saattaa lamellista osa tukkeutua, synnyttäen oikovirtaamia. Näin ollen lamellin seinämien optimaalisen etäisyyden saavuttaminen on hyvin vaikeaa ilman käytännön kokeita, sillä kiintoaineen valumiseen lamellin pinnalla vaikuttavat kiintoaineen ja käsiteltävän veden ominaisuuksien lisäksi lamellin kallistuskulma ja lamellissa käytetyn materiaalin karkeuskerroin.

Lamellin pituus on myös merkittävä osatekijä, joka määrää lamellin vaakatasoon projisoidun pinta-alan ja sitä kautta pintakuorman suuruutta. Lamellin pituus määrää myös osaltaan sen, kuinka korkea selkeyttimestä tulee tehdä. Riippuen selkeyttimen rakenteesta, lamellin pituus voi myös osaltaan määrätä rakennettavan selkeyttimen leveyden tai pituuden, sekä pyöreissä rakenteissa rungon halkaisijan (Kuva 4). Pituuden tavoin myös lamellirakenteiden lukumäärä vaikuttaa oleellisesti rakennettavan selkeyttimen kokoon ja tehokkuuteen, kuten kaavan 12 ja 13 osoittavat.

4.7 Lietepesän muoto ja lietteenpoistoratkaisut

Käsitelty vesi jättää selkeyttimissä jälkeensä kiintoainesta, joka kerääntyy usein laitteen pohjalla sijaitsevaan lietepesään. Lietteen poistamiselle on selkeyttimestä riippuen olemassa useita ratkaisuita. Perinteisissä laskeutusaltaissa liete poistetaan useimmiten altaiden pohjalta ruoppaamalla. Menetelmä on siinä mielessä yksinkertainen, ettei sitä tarvitse erikseen suunnitella ja rakentaa, vaan ruoppaus toteutetaan perinteisesti ostopalveluna. Pienemmissä selkeytintä ratkaisuihin, kuten lamellis-

keyttimissä ruoppauksen sijasta voidaan käyttää esimerkiksi lietepesän pohjassa sijaitsevaa käsikäyttöistä lietteenpoistoventtiiliä. Jos kerääntynyt liete poistetaan altaan pohjalla olevan venttiilin kautta, tulee pohjan profiilin olla kallellaan kauttaaltaan kohti lietteenpoistoputkea.

Monimutkaisemmissa laitteissa poisto voidaan suorittaa automaattiventtiiliin kytkettävällä elektronisella yksiköllä, joka mittaa lietepesän lietteen korkeutta esimerkiksi paine- tai pinnankorkeusanturin avulla ja aukaisee venttiilin, kun lietettä on kertynyt lietepesään riittävästi. Lisäksi joissain laitteissa selkeyttimen pohjalle voidaan asentaa esimerkiksi ruuvi- tai hihnakuljetin, joka poistaa laskeutunutta kiintoainesta jatkuvasti. Jatkuvatoimisissa poistomenetelmissä hyvänä puolena on se, ettei laskeutunut kiintoaine pääse tiivistymään liikaa lietepesän pohjalle, jolloin se saattaa huonoimmassa tapauksessa jumittaa lietteenpoistoaukon pään. Lietepesän pohjan profiilin muotoilun lisäksi lietteen jäähmettymistä tai holvaantumista voidaan estää esimerkiksi lietepesän pohjaan asennettavilla laahaimilla/kaapimilla. Ne pitävät lietteen jatkuvasti pienessä liikkeessä, siirtäen sitä hiljalleen kohti lietteenpoistoaukkoa (Kuva 2).

5 KALLISTETTAVAN PUTKISELKEYTTIMEN SUUNNITTELU JA RAKENTAMINEN

Selkeyttimen suunnittelu alkaa yleensä selkeytettävän nesteen ja sen sisältämien kiintoaineiden ominaisuuksien, kuten veden lämpötilan, viskositeetin ja pH:n, sekä kiintoaineiden keskimääräisen koon, muodon ja laskeutumisenopeuden määrittämisestä. Lisäksi selvittettäviä asioita ovat selkeyttimelle varattu tilavuus, pinta-ala, tavoiteltu pintakuorman ja Hazenin virtausnopeuden arvo, sekä käsiteltävän virtaaman suuruus.

Opinnäytetyön tarkoituksena oli kuitenkin suunnitella liikutettava laitteisto, jota koeajetaan useissa erilaisissa kohteissa. Näin ollen laitteistoa ei pystynyt suoraan suunnitteluvaiheessa määrittämään millekään tietylle vedelle, vaan ainoana suuntaa antavana parametrina oli jo olemassa olevan laitteiston (Kuva 12), eli pikasekoitus- ja hämmennysaltaiden virtaama Q ($5,0 \text{ m}^3/\text{h}$).



Kuva 12 Vasemmalla $1,0 \text{ m}^3$ suuruisen IBC-säiliön päällä on pikasekoitusallas ja oikealla siihen kytkettynä on toinen hämmennysaltaista (Huttunen 2015-01-07).

5.1 Materiaalit

Markkinoilla myytävänä olevat lamelliselkeyttimet ovat lähes poikkeuksetta metallista rakennettuja ja lamellin rakenne on levymäinen. Kun lamellin rakenne on levymäinen, tulee myös selkeyttimen rungon olla nelikulmainen. Tällainen rakenne jo itsessään vaatii teräksen tai muun kestävästä metallista, jotta runko pysyy oikeassa muodossa, eikä anna periksi esimerkiksi vesimassan tuoman rasituksen vaikutuksesta. Nelikulmaisissa rakenteissa on kuitenkin tiettyjä heikkouksia. Virtausmallinnusta niiden sisällä on vaikea toteuttaa, sillä kaikki rakenteissa olevat kulmat aiheuttavat poikkeamia virtaamisissa, kuten pyörteitä. Lisäksi kulmiin saattaa helposti jäädä kiintoainesta, joka ajan myötä saattaa kovettua paikalleen, vieden selkeyttimen tilavuutta.

Putkimainen muoto selkeyttimen ja lamellin rakenteena tuo monia etuja tullessaan. Ensiksi, virtausmallinnus on helpompi toteuttaa putkimaisessa rakenteessa, sillä siinä virtaama jakaantuu tasaisemmin koko rakenteen matkalle, kuin muun mallisissa rakenteissa. Toiseksi, pyöreissä rakenteissa ei ole yhtä paljon kulmia, jotka aiheuttaisivat pyörteitä, haitaten sekä mallinnusta että kiintoaineen erotusta. Kolmanneksi, putkimainen rakenne on myös muovisilla materiaaleilla erittäin hyvä, rasituskestävä vaihtoehto. Muovi on myös materiaalina huomattavasti metalleja halvempaa.

Muovisia putkia saa monilta eri putkivalmistajilta halkaisijaltaan muutamista kymmenistä millimetreistä aina kolmeen metriin saakka, jolloin sekä selkeyttimen runko että sisälle tuleva lamelli voidaan suunnitella ja rakentaa valmiista muoviputkista. Koska putkia valmistetaan jatkuvasti eri tarkoituksiin, ei lamelliselkeyttintä varten tulevia rakenteita tarvitse tosin sanoen erikseen teettää tehtailla, mikä tulisi maksamaan paljon, vaan tarvittavat putket voidaan tilata putki- tai kaivotoimittajien listoilta suoraan.

5.2 Virtaama

Savonia-ammattikorkeakoulun olemassa olevat kaivosvesien käsittelyä varten rakennetut kemikaalintaltaat on mitoitettu noin $5,0 \text{ m}^3/\text{h}$ virtaamalle, joka oli alun perin työn alussa myös suunniteltavan lamelliselkeyttimen ainoa olemassa oleva mitoitusparametri. Koska lamelliselkeyttintä haluttiin testata rinnan pystyselkeyttimen kanssa, oli näiden selkeyttimien oltava virtaamaltaan yhtä suuria, jotta erotuskyvyn testaaminen olisi mahdollisimman helppoa. Näin ollen lamelliselkeyttimen virtaaman arvo päätettiin ottaa suunniteltavan pystyselkeyttimen virtaaman arvosta suoraan. Pystyselkeyttimen mitoituksesta ja suunnittelusta on kerrottu tarkemmin kappaleessa 6.3.

Pystyselkeyttimen mitoittamisessa päädyttiin sisähalkaisijaltaan 1,4 m olevaan kaivorakenteeseen, sen ollessa samankokoinen, kuin hämmennysallas. Tällaisen pystyselkeyttimen laskennallinen tehokkuus riittäisi noin $0,85 \text{ m}^3/\text{h}$ virtaaman selkeyttämiseen kiintoainehiukkasista, joiden laskeutumisnopeus on $0,5544 \text{ m/h}$ tai suurempi, veden lämpötilan ollessa noin $10 \text{ }^\circ\text{C}$. Näin ollen myös suunniteltavan lamelliselkeyttimen tulisi huonoimmassakin tapauksessa pystyä selkeyttämään samainen $0,85 \text{ m}^3/\text{h}$ virtaama.

5.3 Käyttötarkoitus

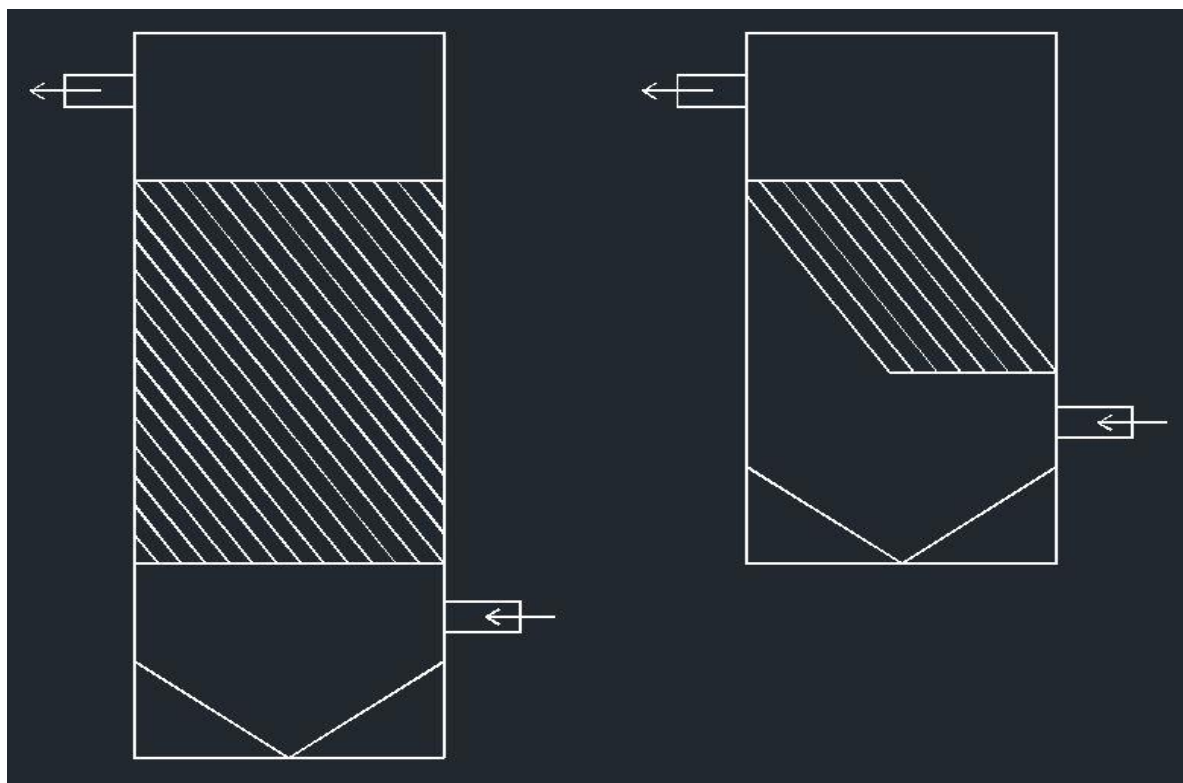
Opinnäytetyön tarkoituksena oli suunnitella helposti liikuteltavissa oleva, kallistettava lamelliselkeyttin pilot-mittakaavan kokeisiin, jotka toteutetaan eri kaivoskohteissa. Lähtökohtaisena mitoitusparametrina oli $5,0 \text{ m}^3/\text{h}$ virtaama, jolle on jo suunniteltu ja rakennettu pikasekoitus- ja kaksi sekoitusallasta (Kuva 12). Tarvittavan kiintoaineen erotuskyvyn lisäksi laitteen tulee olla mobiili, eli kevyt ja helposti liikuteltavissa. Lisäksi laitetta on pystyttävä muokkaamaan tarvittaessa eri kohteista ja kiintoainetta sisältävistä kaivosvesistä riippuen.

5.4 Lamellin ja selkeyttimen rungon suunnittelu

5.4.1 3D-suunnittelu

Muodoltaan lamelliselkeytin suunniteltiin sylinterimäiseksi rakenteeksi, jonka sisään lamellipakka rakennetaan erikseen. Ensiksi ajateltiin, että lamellipakka selkeyttimen sisällä olisi selkeyttimen rungon suuntainen ja koko laite kallistettaisiin tukirakenteen avulla haluttuun kulmaan (45–60 astetta vaakatasoon nähden). Opinnäytetyössä päädyttiin kuitenkin aluksi pystyssä olevan sylinterimäisen rakenteen suunnitteluun, jonka sisällä oleva lamelli olisi kallellaan. Näin ollen lamelliselkeytintä ei tarvitsisi tukea erikseen millään tavalla ja laitteesta tulisi halpa ja helppokäyttöinen.

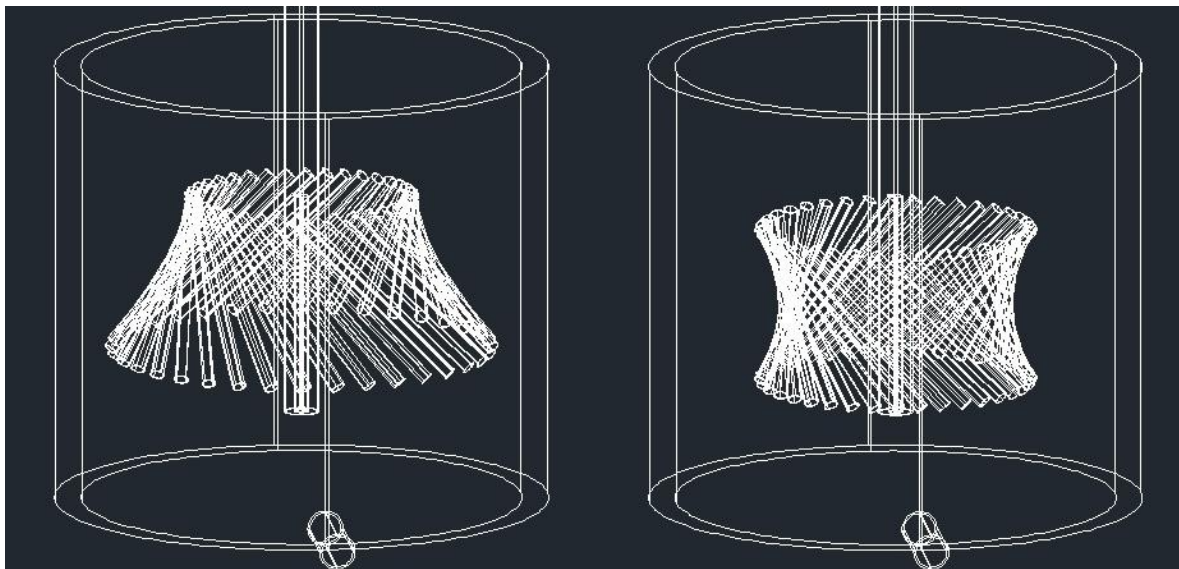
Lamellin kallistus pystyssä olevan sylinterimäisen rungon sisällä osoittautui kuitenkin oletettua hankalammaksi toteuttaa. Jos lamelli rakennettaisiin putkista, niiden kallistus samaan suuntaan sylinterin sisällä (Kuva 13) veisi paljon hukkatilaa selkeyttimestä ja näin ollen hukkatila olisi korvattava suuremmalla rungon putkikoolla, joka puolestaan nostaisi investointikustannusten hintaa huomattavasti. Lisäksi suurempi selkeyttimen rakenne veisi enemmän tilaa.



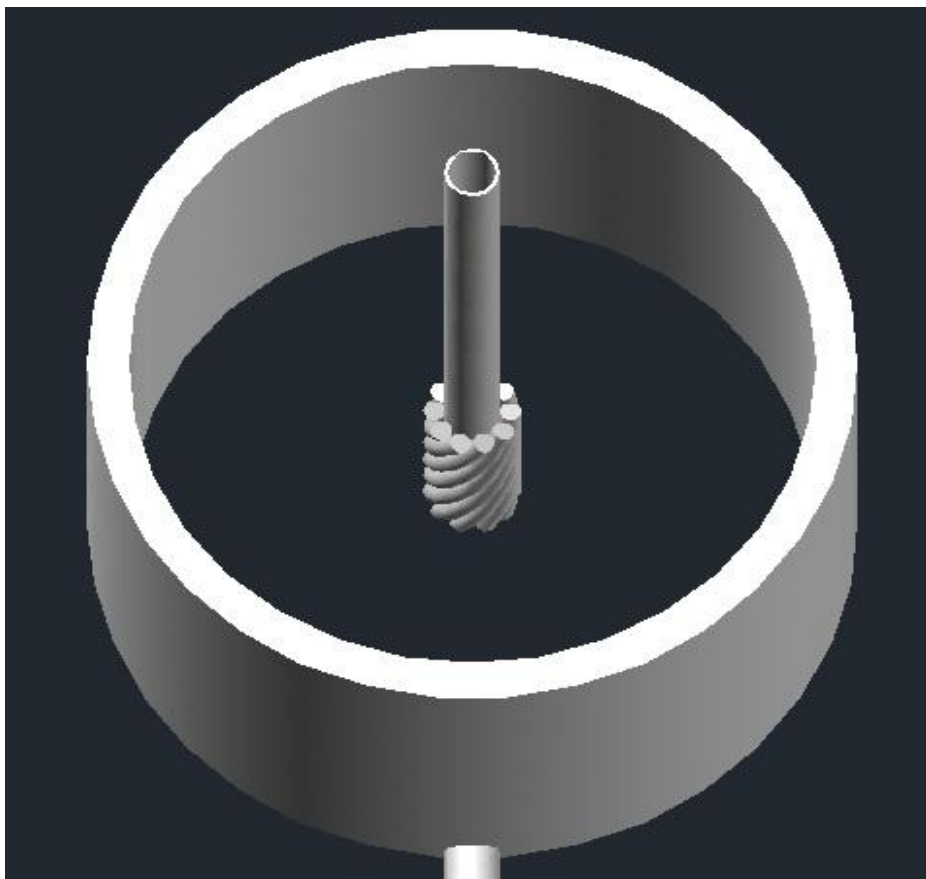
Kuva 13 Vasemmanpuoleisella lamellilla ei ole yhtään avonaista virtauskanavaa ja oikeanpuoleisessa ratkaisussa selkeyttimeen jää runsaasti hukkatilaa (Huttunen 2015-01-07).

Toinen vaihtoehto oli laittaa lamellin putket tiiviisti pystyyn sylinterin sisään ja tämän jälkeen yrittää kallistaa niitä. Tämä kuitenkin osoittautui mahdottomaksi mallintaa, sillä putket eivät mahdu tiiviissä pakassa liikkumaan mihinkään suuntaan. Lamellipakan putkien määrää vähentämällä putket saataisiin lopulta haluttuun kulmaan, mutta tarkkaa tarvittavien putkien määrää ja lamellin tehoa olisi vaikea arvioida teoriassa.

Kolmas vaihtoehto oli kallistaa putkia joko niiden päästä tai keskeltä ensin haluttu astemäärä (45–60 astetta) ja tämän jälkeen laskea putket yksitellen sylinterin sisään valmiissa kallistuskulmassa (Kuva 14). Yksi kallistettu putkikierrös veisi kuitenkin tilaa seuraavalta putkikierrökseltä, minkä seurauksena mallintaminen osoittautui haastavaksi. Myös käytännössä tällaisen lamellipakan kokoaminen olisi ollut erittäin vaikeaa.



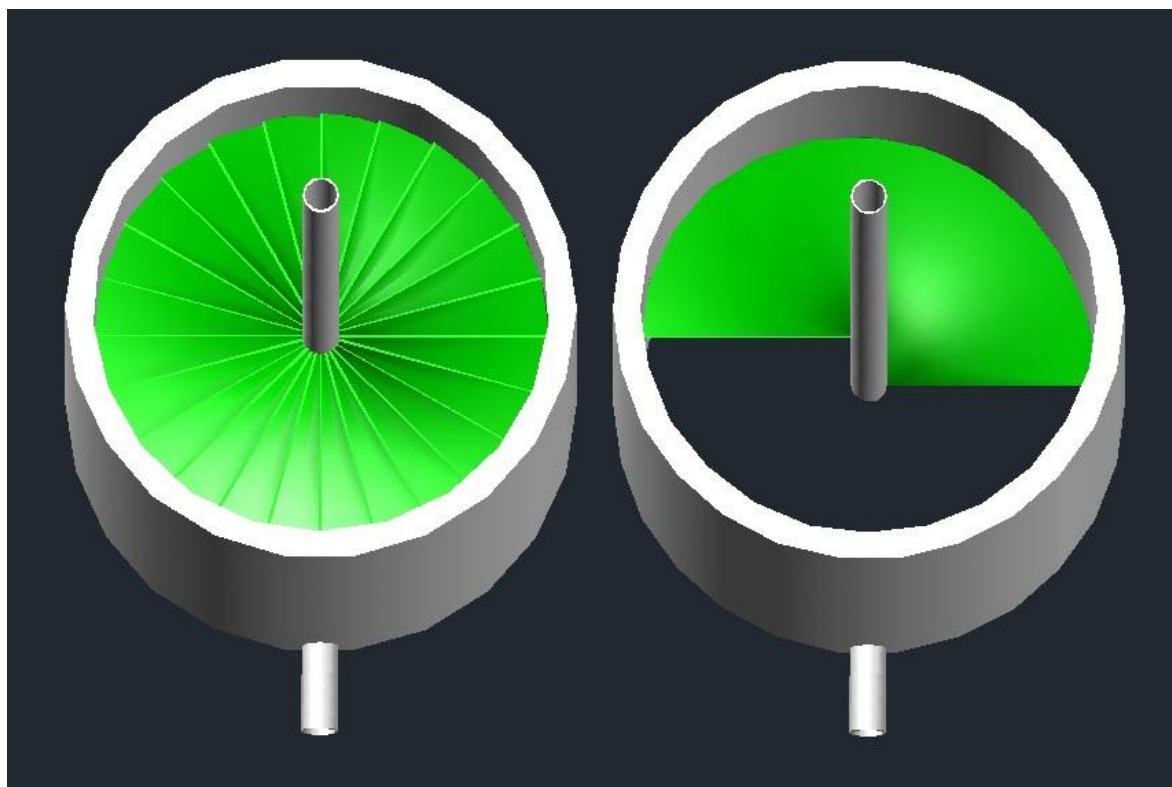
Kuva 14 Yhden lamelliputkikierröksen kallistus joko putkien päästä (vas.) tai keskeltä (oik.) vie paljon tilaa itse selkeyttimestä, mutta myös seuraavilta putkikierröksiltä (Huttunen 2015-01-07).



Kuva 15 Lamelliputkien ensimmäinen kierros on kierteellä impedanssitomografiamittauksia varten suunnitellun putken ympärillä (Huttunen 2015-01-07).

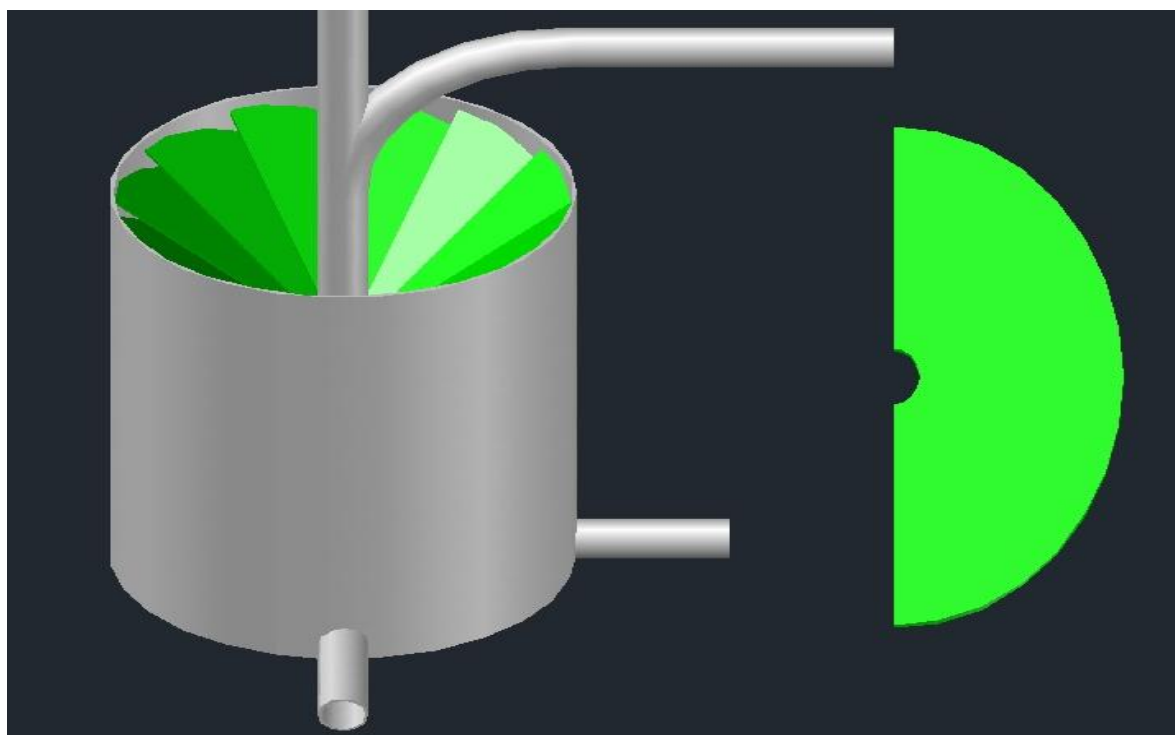
Neljäntenä vaihtoehtona suunniteltiin lamelli rakennettavaksi taipuisista putkista. Teoriassa sylinterin lamellille varattu tila voitaisiin täyttää rungon sisäreunoja myöten täyteen taipuisia putkia, jonka jälkeen jokaista lamelliputkikierrosta kieritettäisiin niin paljon, että haluttu putken kallistuskulma saavutettaisiin. Tämäkään ei kuitenkaan käytännössä onnistu. Jos aloitetaan lamelliputkien kiertäminen lamellipakan keskeltä, ensimmäistä putkikierrosta tulisi metrin mittaisena pyörittää puoli kierrosta (Kuva 15), jotta lamelliputkille saavutetaan 45 asteen kallistuskulma. Seuraavaa kierrosta tulisi kuitenkin pyörittää hieman vähemmän saavuttaakseen tälle kierrokselle sama kallistuskulma, kuin edellisellä kierroksella. Näin ollen putket eivät enää sovi olemaan tiiviisti limittäin ja mallintaminen käy jälleen hankalaksi.

Viidentenä ratkaisuna päätettiin unohtaa lamellin putket kokonaan ja suunnitella selkeyttimen sisään tulevan lamellirakenne siivekkeistä, jotka kiertäisivät sylinterin kehällä edellisen mallin tavoin puoli kierrosta metrin matkalla pystysuunnassa (Kuva 16). Ongelmaksi osoittautui kuitenkin se, että tällaisia muovisia siivekkeitä ei valmisteta suoraan missään yrityksessä, jolloin ne olisi jouduttu tekemään mittatilaustyönä, joka olisi nostanut investointikustannuksia huomattavasti. Lisäksi tällaisissa turbiinimaisissa rakenteissa kahden lamellilevyn väliin jäävän laskeutuskanavan kallistuskulma muuttuu rungon sisäkehältä selkeyttimen keskelle mentäessä. Selkeyttimen rungon luona kallistus saattaa olla sopiva, mutta aivan lamellipakan keskiosassa impedanssitomografiomittauksia olevan putken ympärillä lamellin kallistuskulma muuttuu erittäin jyrkäksi. Näin ollen on hankala arvioida, tulisiko tällainen rakenne toimimaan tehokkaasti käytännössä vai ei.



Kuva 16 Lamelliselkeyttimen rakenne "siivekkeistä". Vasemmalla on kuva valmiista lamellipakasta ja oikealla kuvattuna yksi lamelliin 24 levyä (Huttunen 2015-01-07).

Kuudes ratkaisu oli suunnitella siivekkeet suoraksi, jolloin niitä ei tarvitsisi erikseen valaa muovista, vaan oikealla leikkauksella ne olisi saatu asetettua selkeyttimen rungon sisälle. Tämä osoittautui jälleen vääräksi lähestymistavaksi, sillä lamellin keskusosa olisi ollut jälleen todella ahdas, mutta pystysuunnassa tarkasteltuna myös lyhyt, kun taas selkeyttimen reunoilla oleva lamellirakenne olisi vienyt liian paljon tilaa selkeyttimestä korkeutensa puolesta, jolloin selkeyttimen korkeutta olisi jouduttu kasvattamaan liikaa. Selkeyttimen rungon korottaminen olisi tuonut lisää kustannuksia, eikä alemman kuvan mukainen laite (Kuva 17) olisi luultavastikaan toiminut halutulla tavalla.



Kuva 17 Lamelliselkeytin rakennettuna suorista levyistä (Huttunen 2015-01-07)

Kaikkien näiden poissulkevien suunnitelmien jälkeen päädyttiin jälleen suunnittelemaan lamelliselkeytintä, jonka lamelli koostuu putkista, putket ovat samansuuntaisia itse selkeyttimen rungon kanssa ja koko lamelliselkeytin kallistetaan ulkoisen tukirakenteen avulla haluttuun kulmaan. Kappaleessa 5.4.2 on kerrottu tarkemmin, kuinka selkeyttimen runko ja lamelli mitoitetaan laskennallisesti.

Laskennan avulla putkiselkeyttimen rungon sisähalkaisijaksi saatiin 800 mm. Koska lamelliselkeyttimen runkoon tulee kallistettuna kohdistumaan suuria kuormia rakenteen ja veden massan vaikutuksesta, päätettiin selkeyttimen runko tilata kaivona pystyselkeyttimen tapaan, rengasjäykkyyden ollessa SN8, jolloin selkeyttimen rungon seinämäpaksuus on 50 mm ja ulkohalkaisija 900 mm.

Kun rungon halkaisija oli selvillä, piirrettiin rakenteesta aluksi 2,4 m korkea malli Autodeskin AutoCAD 3D:llä ja kallistettiin rakenne 30 asteen kulmaan pystytasoon nähden, jolloin lamellin kallistus kulma vaakatasoon nähden oli 60 astetta. Kyseinen kallistuskulma valittiin sillä perusteella, että käsiteltävä vesi johdetaan putkiselkeyttimelle yhdestä hämmennysaltaan kuudesta eri yhteestä, jotka kaikki sijaitsevat altaan keskiosan alapuolella. Kun vesi joudutaan ottamaan matalalla kulkevien yhteiden kautta, on luonnollista johtaa vesi myös putkiselkeyttimelle alakautta. Näin ollen putkisel-

keytin tulee toimimaan vastavirtaperiaatteella, jonka vuoksi sen kallistuskulma tulee olemaan 60 astetta vaakatasoon nähden.

Kun putkiselkeyttimen rungon mitat ja kallistuskulma olivat selvillä, laskettiin millä korkeudella poistoaukon tulee olla. Pystyselkeyttimen poistoaukon korkeus määräsi tässä tapauksessa myös lamelliselkeyttimen poistoaukon kohdan. Tämä johtuu siitä, että ylitteiden poistoaukkojen matalin korkeus määrää yhtenäisen pilot-laitteiston vesipinnan hydraulisen koron. Jotta molempia selkeyttimiä voidaan ajaa yhtä aikaa, tulee selkeyttimien poistojen olla samalla korolla. Mikäli poistojen korot eroavat toisistaan, matalammalla korolla olevan selkeyttimen läpi virtaa enemmän käsiteltävää vettä. Koska pystyselkeyttimen poistoaukon alapinnan korkeus oli selvillä ja tiedettiin putkiselkeyttimen kallistuskulman arvo, voitiin määrittää pystyssä olevan putkiselkeyttimen ylitteen poistoaukon alapinnalle tarvittava korkeus, sillä tätä korkeutta tarvitaan tilattaessa putkiselkeyttimen (kaivon) yhteitä.

Seuraavaan kuvaan (Kuva 18) on merkitty tarvittavia mittoja, joiden avulla putkiselkeyttimen poistoputken alapinnan korko saadaan teoriassa laskettua. Aluksi tulee määrittää kallistetun putkiselkeyttimen pohjan ja maanpinnan väliin jäävä matka d :

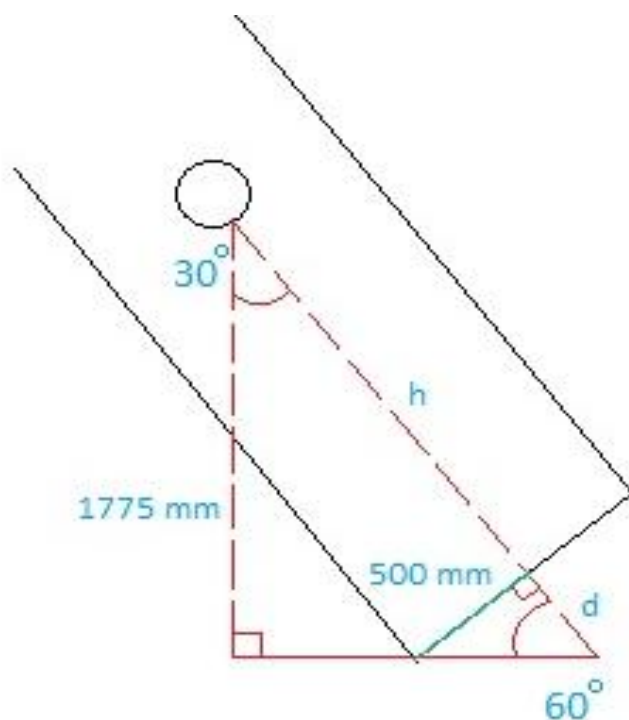
$$\tan 30^\circ = \frac{d}{500 \text{ mm}} \leftrightarrow d = 500 \text{ mm} * \tan 30^\circ \approx 289 \text{ mm}. \quad (14)$$

Kun se on saatu laskettua, tarvittava poistoputken korkeus voidaan laskea seuraavasti:

$$\sin 60^\circ = \frac{1775 \text{ mm}}{h+d} \leftrightarrow h = \frac{1775 \text{ mm}}{\sin 60^\circ} - 289 \text{ mm} \approx 1760 \text{ mm}. \quad (15)$$

Kaava 15 ei kuitenkaan ota huomioon sitä, etteivät kallistetun putkiselkeyttimen "alakulma" ja pystyselkeyttimen pohja tule samalle korolle, sillä putkiselkeytin sijoitetaan vaihtolavan viereen. Vaihtolavan korkeuden ollessa noin 200 mm, tulee pystyselkeyttimen ylitteenpoistoputken alapinnan laskennalliseksi koroksi 1 975 mm. Koska putkiselkeytin tulee olemaan kallistettuna tukirakenteen päällä, tarvittava korkeus pienenee kuitenkin tukirakenteen palkin paksuuden (50 mm) ja putkiselkeyttimen pohjaa vasten olevan tukilevyn tuoman korotuksen (noin 40 mm) verran, jolloin pystyselkeyttimen laskennallinen korko kaavassa 15 onkin oikeasti lähempänä arvoa 1 885 mm. Jos tämä luku sijoitetaan edelleen kaavaan 15, saadaan putkiselkeyttimen ylitteputken alapinnan koroksi h noin 1 890 mm.

Kallistettavan putkiselkeyttimen lietteenpoistoaukko täytyi myös suunnitella siten, ettei se osu maahan selkeyttimen ollessa kallistettuna, ja että siihen saa vielä liitettyä tarvittavan viemäriinjan lietteen poistoa varten. Tästä syystä lietteenpoistoaukon alapinta päätettiin sijoittaa 250 mm rungon pohjasta ylöspäin. Lisäksi tämä laippaliitännällä oleva viemärintiyhde suunniteltiin vain 90 mm pitkäksi rungon ulkoreunasta mitattuna, jotta se jää mahdollisimman kauas maanpinnasta, mahdollistaen sen liittämisen vielä muuhun pilot-laitteiston viemäriinjaan.



Kuva 18 Kallistetun putkiselkeyttimen yliteputken alapinnan koron laskentaan vaikuttavia tekijöitä ovat selkeyttimen kallistuskulma, poistoputken sijainti selkeyttimen rungossa ja rungon ulkohalkaisija (Huttunen 2015-01-07).

Lietteenpoistoaukon tekeminen rungon pohjan yläpuolelle olisi kuitenkin vielä jättänyt selkeyttimen sisälle pienen sakkapesän, johon liete olisi jäänyt kiinni. Tämän estämiseksi putkiselkeyttimeen suunniteltiin välipohja, jonka yläpinta tuli samalle korolle lietteenpoistoputken alapinnan kanssa. Näin putkiselkeyttimen pohja viettää kallistettuna kauttaaltaan kohti lietteenpoistoputkea, eikä liete jää selkeyttimen sisälle. Koska vesimassa saattaisi ajan kuluessa painaa välipohjaa alaspäin, lisättiin rungon pohjan ja välipohjan väliin vielä yksi 160 mm ulkohalkaisijaltaan oleva 150 mm mittainen putki tukevoittamaan välipohjan rakennetta.

Käsiteltävän veden tuloyhteen paikkaa putkiselkeyttimen runkoon ei suunnitteluvaiheessa vielä määritetty. Tämä johtui siitä, että ensiksi haluttiin saada putkiselkeyttimen valmiiksi ja määrittellä tämän jälkeen sille lopullinen paikka suhteessa muuhun pilot-laitteistoon. Kun putkiselkeyttimen paikka saadaan selville ja viemäriyhde on kiinnitetty putkiselkeyttimen poistoputkeen, voidaan tuloyhde asentaa haluttuun kohtaan jälkikäteen. Samalla tuloyhteen pituus voidaan teettää sopivan mittaiseksi suhteessa hämmennysaltaaseen, josta käsiteltävä vesi otetaan selkeyttimelle.

5.4.2 Lamellipakan ja rungon mitoittaminen laskennallisesti

Jos putki- ja pystyselkeyttimen toimintaa halutaan verrata keskenään, tulee lamelliselkeyttimen huonommassakin tapauksessa pystyä käsittelemään virtaamaa, jonka suuruus on $0,85 \text{ m}^3/\text{h}$, eli saman verran kuin pystyselkeyttimen. Koska virtaaman Q ja pintakuorman v_{SOR} oletetaan olevan molemmissa

selkeyttimissä sama, putkiselkeyttimen tehollisen laskeutuspinta-alan A_{pU} tulee olla samansuuruinen kuin pystyselkeyttimen laskeuttavan pinta-alan A_{pY} , eli

$$A_{pY} = \pi * \left(\frac{d_{pY}}{2}\right)^2 = A_{pU}, \quad (16)$$

jossa d_{pY} on pystyselkeyttimen sisähalkaisija pituus (1,4 m). AutoCAD-ohjelmalla laskettu 0,8 m sisähalkaisijaltaan olevan putkiselkeyttimen rungon, jota on kallistettu 60 astetta vaakatasoon nähden, vesipinnan pinta-ala A_{VP} on noin 0,91 m². Lamelliilta vaadittavan tehollisen laskeutuspinta-alan määrä saadaan laskettua kaavalla

$$A_{tp} = \frac{A_{pY} - A_{VP}}{0,3}. \quad (17)$$

Kaavassa 17 jakajana oleva 0,3 kuvastaa lamellin todellista tehoa, joka kirjallisuuden mukaan voi olla jopa 70 prosenttia teoreettista tehoa pienempi (Coleman ym. 2005, 67). Näin ollen lamellin tarvittavan tehollisen pinta-alan tulee olla teoreettista pinta-alaa saman verran suurempi.

Kun lamellille tarvittava todellinen tehollinen pinta-ala on saatu määritettyä, voidaan sen rakenne suunnitella vastaamaan tätä kriteeriä. Kaavan 13 perusteella voidaan putkimaisille lamellirakenteille laskea tehollisen laskeutuspinta-alan suuruus. Tässä kaavassa on kuitenkin kolme tuntematonta muuttujaa, joista vähintään kaksi täytyy määrittellä, jotta kolmas voidaan ratkaista. Aluksi lamellin suunnittelussa päätettiin, että lamellin putkien pituus L on 1,0 m. Seuraavaksi tarkasteltiin eri putki-toimittajien hinnastoja, joiden perusteella päädyttiin valitsemaan lamelliputkien ulkohalkaisijaksi 40 ja 50 mm, niiden ollessa edullisia vaihtoehtoja. 50 mm putkien seinämäpaksuuden d_e ollessa 3,8 mm ja 40 mm putkien seinämäpaksuuden ollessa 2,0 mm saatiin ratkaistua tarvittavat sisähalkaisija d_i . Tämän jälkeen tarvittava lamelliputkien lukumäärä n (kpl) pystytään ratkaisemaan kaavasta 13 seuraavasti:

$$n = \frac{A_{tp}}{d_i * L * \cos \alpha}. \quad (18)$$

50 mm putkilla lukumääräksi saadaan 99 kappaletta ja 40 mm putkilla vastaava luku n on 117 kappaletta.

Varsinaisena opinnäytetyön tavoitteena ei kuitenkaan ollut pelkästään verrata selkeyttimien tehokkuuksia, vaan rakentaa samalla myös mahdollisimman pieni ja tehokas lamelliselkeytin. Näin ollen päätettiin suunnitella putkiselkeyttimestä rakenteeltaan sellainen, että se pystyisi käsittelemään vähintäänkin 2,5 m³/h virtaaman vesiä, eli puolet alkuperäisestä mitoitusvirtaamasta.

Oletetaan, että tarvittava pintakuorman suuruus kiintoaineiden erottamiselle käsiteltävästä vedestä on aikaisemmin mainittu hietahiukkasen laskeutumisnopeus, eli 0,5544 m/h. Kun tavoiteltu virtaama on myös tiedossa, voidaan laskea selkeyttimelle tehollisen laskeuttavan pinta-alan määrä:

$$A = \frac{Q}{v_{SOR}} = \frac{2,5 \text{ m}^3/h}{0,5544 \text{ m/h}} = 4,5094 \text{ m}^2 \approx 4,5 \text{ m}^2. \quad (19)$$

Lamelliilta vaadittavan todellisen tehollisen laskeutuspinta-alan määrä saadaan tämän jälkeen lasket-
tua kaavalla:

$$A_{tp} = \frac{A - A_{VP}}{0,3} = \frac{4,51 \text{ m}^2 - 0,91 \text{ m}^2}{0,3} = 12,0 \text{ m}^2. \quad (20)$$

Kaavan 13 avulla voidaan edelleen laskea tarvittavien lamelliputkien määrä. Tarkastellaan kahdesta
lamelliputkivaihtoehdosta suurempaa ($d_e = 50 \text{ mm}$), jolloin

$$n = \frac{A_{LA}}{d_i * L * \cos \alpha} = \frac{12,0 \text{ m}^2}{0,0424 \text{ m} * 1,0 \text{ m} * \cos 60^\circ} \approx 566 \text{ (kpl)}. \quad (21)$$

AutoCAD-ohjelman avulla saadaan piirrettyä ja laskettua, montako tietyn halkaisijan omaavaa, täy-
sin pyöreää lamelliputkea saadaan asennettua ympyräkartion muotoisen rakenteen sisäpuolelle. Jos
lamellipakassa tulee olla yhteensä 566 kappaletta lamelliputkia, tarvittavan selkeyttimen rungon si-
sähalkaisijaksi tulisi 1,4 m. Näin suuri putkiselkeytin tulisi painamaan paljon, se veisi paljon tilaa ja
sen kallistaminen turvallisesti vaatisi rakenteeltaan todella kestävästä tukirakenteesta.

Jos oletetaan, ettei lamellissa tapahdu ollenkaan tehollista häviötä, saadaan lamelliilta vaadittavan
teoreettisen tehollisen laskeutuspinta-alan määräksi:

$$A_{tp} = A - A_{VP} = 4,51 \text{ m}^2 - 0,91 \text{ m}^2 = 3,6 \text{ m}^2. \quad (22)$$

Tällöin lamelliputkien lukumääräksi tulee

$$n = \frac{A_{tp}}{d_i * L * \cos \alpha} = \frac{3,6 \text{ m}^2}{0,0424 \text{ m} * 1,0 \text{ m} * \cos 60^\circ} \approx 170 \text{ (kpl)}. \quad (23)$$

AutoCAD-ohjelmalla määritetty tällainen lamellipakka vaatii rungon, jonka sisähalkaisija on 0,8 m.
Teoriassa kyseisen rungon sisälle mahtuu yhteensä 199 kappaletta lamelliputkia, mutta mahdollisia
impedanssitomografiomittauksia varten lamellipakan keskelle tullaan asentamaan ulkohalkaisijaltaan
160 mm kokoinen putki, joka vie tilaa lamelliputkilta. Seuraavissa laskuissa käytetäänkin lamelliput-
kien lukumääränä niiden todellista määrää, jonka avulla saadaan laskettua aluksi lamellin putkien
tuoma teoreettinen tehollinen laskeutuspinta-ala

$$A_{PUTKET} = n * d_i * L * \cos \alpha = 185 * 0,0424 \text{ m} * 1,0 \text{ m} * \cos 60^\circ = 3,922 \text{ m}^2, \quad (24)$$

joka on suurempi, kuin kaavan 22 tarvittava teoreettinen tehollinen laskeutuspinta-ala ($3,6 \text{ m}^2$).

Vaikka käytännössä lamellin tehokkuus saattaa olla jopa 70 prosenttia pienempi kuin teoriassa, on
kuitenkin otettava huomioon, että lamelliputkien väliin jäävät kanavat toimivat myös laskeuttavana
pinta-alana. Yhden tällaisen kanavan virtaussuuntaan kohtisuora pinta-ala on AutoCAD-ohjelmalla

laskettuna 100 mm^2 , kun vastaava ala lamelliputkella on noin $1\,400 \text{ mm}^2$. Tämän kokoisia virtauskanavia on mahdollisimman tehokkaasti täytetyssä lamellipakassa 336 kappaletta, jos oletetaan lamelliputkien lukumääräksi 199 kappaletta ja lisäksi oletetaan rungon ja reunimmaisten lamelliputkien väliin jäävät pinta-alat samansuuruisiksi kuin muidenkin kanavien.

AutoCAD-ohjelmalla laskettuna yhden tällaisen virtauskanavan keskimääräinen kahden seinämän välinen kohtisuora etäisyys b on noin 17 mm , eli $0,017 \text{ m}$. Näin ollen lamelliputkien väliin jäävien virtauskanavien yhteenlaskettu teoreettinen tehollinen laskeutuspinta-ala on

$$A_{KANAVAT} = n * b * L * \cos \alpha = 336 * 0,017 \text{ m} * 1,0 \text{ m} * \cos 60^\circ = 2,856 \text{ m}^2, \quad (25)$$

Yhteensä lamellin teoreettinen tehollinen laskeutuspinta-alan suuruus on siis:

$$A_{tp} = A_{PUTKET} + A_{KANAVAT} = 3,922 \text{ m}^2 + 2,856 \text{ m}^2 = 6,778 \text{ m}^2 \quad (26)$$

ja tästä koko selkeyttimen teoreettiseksi teholliseksi laskeutuspinta-alaksi saadaan:

$$A_S = A_{tp} + A_{VP} = 6,778 \text{ m}^2 + 0,91 \text{ m}^2 \approx 7,69 \text{ m}^2. \quad (27)$$

Jos edelleen oletetaan, että tarvittava pintakuorman suuruus v_{SOR} veden käsittelylle on $0,5544 \text{ m/h}$, saadaan kallistetun putkiselkeyttimen teoreettiseksi maksimivirtaamaksi 50 mm lamelliputkilla:

$$Q_{MAX} = A_S * v_{SOR} = 7,688 \text{ m}^2 * 0,5544 \text{ m/h} \approx 4,26 \text{ m}^3/\text{h}. \quad (28)$$

Käytännössä virtaaman Q arvo on kuitenkin tehokkaan selkeytyksen kannalta lähempänä arvoa

$$Q_{TOD} = (A_{tp} * 0,3 + A_{VP}) * v_{SOR} = (6,778 \text{ m}^2 * 0,3 + 0,91 \text{ m}^2) * 0,5544 \text{ m/h} \approx 1,63 \text{ m}^3/\text{h}. \quad (29)$$

Näin saatiin selkeyttimen sisähalkaisijaksi $0,8 \text{ m}$ ja ulkohalkaisijaltaan 50 mm lamelliputkien yhteismitaksi 199 m . Kallistettavan putkiselkeyttimen tehokkuutta pystytään lisäämään, jos lamellipakka kasataan ulkohalkaisijaltaan 40 mm putkista. Niitä mahtuu selkeyttimen rungon sisälle yhden metrin mittaisina putkina teoriassa yhteensä 327 kappaletta, jolloin niiden ja selkeyttimen vesipinnan yhteinen teoreettinen maksimaalinen tehollinen laskeutuspinta-ala on kaavojen 24–27 mukaan laskettuna $11,45 \text{ m}^2$. Tämän lamellirakenteen ansiosta selkeyttimen teoreettinen maksimivirtaama on kaavan 28 mukaan $6,35 \text{ m}^3/\text{h}$ ja todellisen virtaaman arvo kaavan 29 perusteella noin $2,26 \text{ m}^3/\text{h}$. Lamellien tuoma laskeutuspinta-alan lisä verrattuna putkiselkeyttimen omaan laskeuttavaan vesipintaan on 50 mm lamelliputkilla noin $7,4:1$ ja 40 mm lamelliputkilla noin $11,6:1$.

5.5 Selkeyttimen rungon ja lamelliputkien tilaus

Valmiiden rakennekuvien ja laskelmien avulla kirjoitettiin tarjouspyyntö putkiselkeyttimen rungosta ja lamellipakan putkista, joka lähetettiin viidelle Suomessa toimivalle muovisia kaivotuotteita valmistavalle yritykselle. Tarjouspyynnön liitteeksi laitettiin myös putkiselkeyttimen rungon leikkauskuvat (liite 1). Lamelliputkien yhteismitaksi päätettiin valita 50 mm putkilla 200 m ja 40 mm putkilla 320 m. Hankinnan ratkaisuperusteena olivat seuraavat kriteerit (kriteerin painoarvo suluissa):

1. toimitusaika (40 %)
2. hinta (40 %)
3. tekninen tuki ja referenssit (20 %).

Saaduista tarjouksista valittiin näiden kriteerien pohjalta paras laitevalmistaja, jonka jälkeen heille lähetettiin tilaus tuotteista. Lamellipakan valmistamista ei sisällytetty tarjouspyyntöön, sillä halusimme rakentaa tuotteen itse, niiltä osin kuin se oli mahdollista. Pitääksemme lamelliselkeyttimen kustannuksen matalalla, tilasimme lamellin putket kieppeinä yksittäisten putkien sijasta.



Kuva 19 Tehtaalta tulleen putkiselkeyttimen runko on kuvassa etualalla ja sen oikealla puolella näkyy 200 m kieppi 50 mm ulkohalkaisijaltaan olevaa PE-putkea (Huttunen 2015-01-07).

5.6 Lamellipakan rakentaminen

Lamellipakka päätettiin kasata aluksi 50 mm ulkohalkaisijaltaan olevasta PE-putkesta, joka oli toimitettu 200 m kieppinä (Kuva 19). Aluksi kieppi pätkittiin noin 50 m pituisiksi osiksi (Kuva 20), jotka jätettiin ulkotiloihin suoristumaan muutamaksi päiväksi. Seuraavaksi putket leikattiin yhden metrin mittaisiksi. Koska lamelliin tarvittavat putket oli tilattu kieppitavarana, eivätkä putket olleet suorina, niitä tuli suoristaa mekaanisesti. Pelkkä taivuttaminen ei toiminut putkien suoristuksessa, sillä ne palautuivat lähes välittömästi alkuperäiseen asentoonsa. Niinpä putkia päätettiin lämmittää ennen suoristusta.



Kuva 20 Kuvassa näkyy noin 50 m pätkä PE-putkea, joka on kieppissä olonsa takia jännittynyt koko matkaltaan kaarelle (Huttunen 2015-01-07). Kiepin takana seisoo Jussi Pulliainen.

Aluksi kokeiltiin kahden putken lämmittämistä $+60\text{ }^{\circ}\text{C}$:ssa kiertoilmauunissa noin kahden tunnin ajan, mutta lämpötila ei aivan riittänyt putkien taivutukseen. Seuraavaksi lämpötila säädettiin noin $+80\text{ }^{\circ}\text{C}$:een, joka osoittautui sopivaksi lämpötilaksi putkien taivutukselle (Kuva 21). Tämän jälkeen kuumensimme kaikki 200 kappaletta yhden metrin mittaisia lamelliputkia kolmessa suuressa kiertoilmauunissa, jonka jälkeen suoristimme putket välittömästi taivuttamalla niitä.



Kuva 21 Kuvassa on yksi 50 mm ulkohalkaisijaltaan olevista PE-putken testikappaleista vuorokausi lämpökaappikäsitellyn ja suoristuksen jälkeen (Huttunen 2015-01-07).

Kun lamelliputket oli saatu suoristettua, laitettiin ne niin sanottuun asennusmuottiin jäähtymään (Kuva 22). Tämä muotti oli 60 cm pituinen pätkä samanlaista kaivorakennetta, mistä putkiselkeytti-

men runko oli valmistettu. Teoriassa lamelliputkia olisi pitänyt mahtua kyseiseen asennusmuottiin yhteensä 199 kappaletta, mutta koska lamellipakan keskiosaan asennettiin 160 mm ulkohalkaisijaltaan oleva putki impedanssitomografiämittauksia varten, ja koska lamelliputket eivät olleet edelleen täysin suorina, saatiin siihen asennettua 185 kappaletta lamelliputkia. Myös mahdollisia impedanssitomografiämittauksia varten asennettu suurempi putki täytettiin pienemmillä lamelliputkillä.



Kuva 22 Lamelliputkia mahtui putkiselkeyttimen rungon kokoisen asennusmuotin sisään yhteensä 185 kappaletta (Huttunen 2015-01-07).

Seuraavaksi lamelliputkien päät hakattiin 30 asteen kulmaan, jotta niiden päät olisivat vaakatasossa putkiselkeyttimen sisällä silloin, kun koko selkeyttinrakenne on kallistettuna. Tämän jälkeen lamelliputket puristettiin kiinni toisiinsa metallisilla vanteilla vannekoneen avulla. Tämä menetelmä ei kuitenkaan kiristänyt lamellipakan keskimmäisiä putkia tarpeeksi. Käytön aikana ne olisivat saattaneet tippua pakasta pois, joka olisi puolestaan hajottanut loputkin lamellirakenteesta. Ongelman ratkaisemiseksi lamellipakan molempiin päihin asennettiin metalliset verkot, jotka ruuvattiin kiinni eri puolille lamellipakkaa. Verkkojen silmäkoko oli riittävän pieni, etteivät putket päässeet luisumaan niiden välistä pois. Verkon rakenne oli kuitenkin joustava, jonka seurauksena lamelliputket olisivat ajan myötä saattaneet hieman liikkua lamellipakan sisällä. Tämän estämiseksi ja lamellipakan rakenteen tukevoittamiseksi asennettiin pakan pohjalle vielä jäykkä, metallinen ritilä (Kuva 23). Sen avulla lamellipakka ei pääse muuttamaan muotoaan missään vaiheessa ja lamellin liikuttelu, laskeminen selkeyttimen rungon sisään, sekä ankkurointi onnistuvat helpommin.



Kuva 23 Valmis lamellipakka pohjaan asennettu metallinen ritilä ylöspäin (Huttunen 2015-01-07)

Kun putkiselkeyttimen lamelli oli kasattu, asennettiin se selkeyttimen rungon sisäpuolelle. Lamelli työnnettiin rungon sisään metallinen ritilä edellä, johon oli kiinnitetty kaksi kuormaliinaa (Kuva 24). Kun lamelli oli saatu asetettua oikeaan korkoon, ankkuroitiin se kuormaliinojen avulla metallisen tangon varaan. Kuormaliinoja käytettiin tähän ankkurointiin siitä syystä, että lamellipakkaa pystytettiin jatkossa tarpeen mukaan nostamaan tai laskemaan selkeyttimen sisällä.

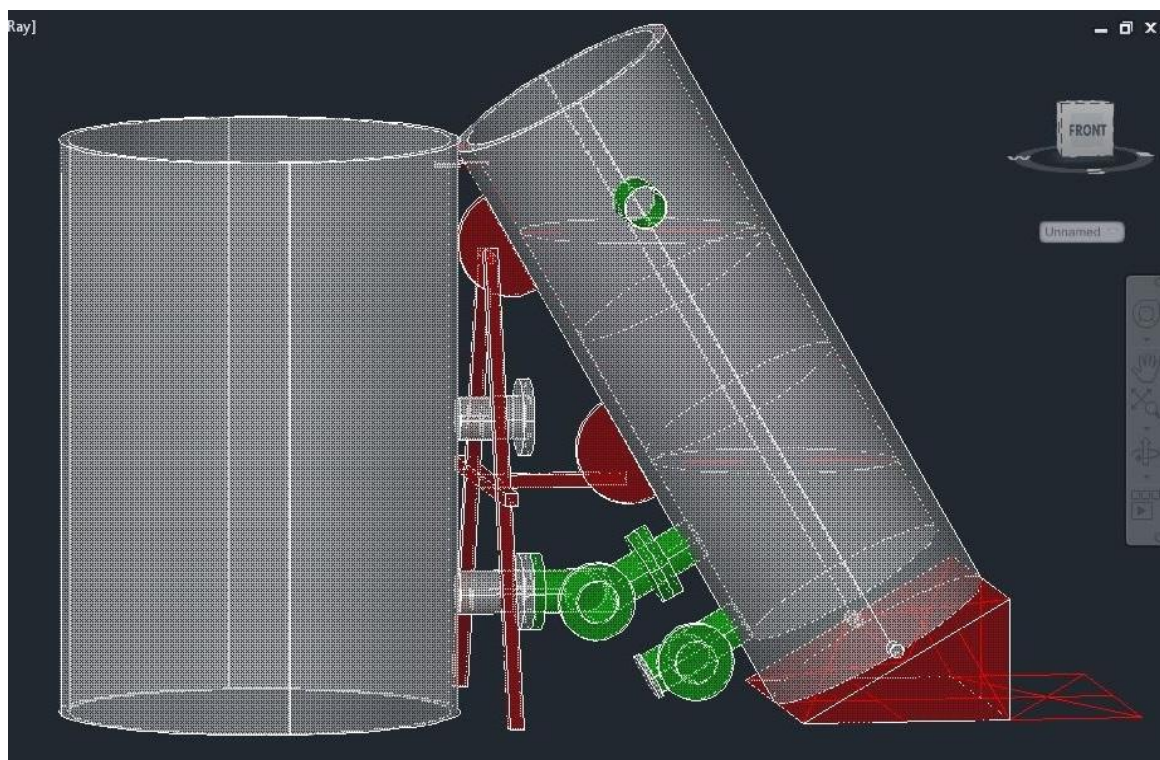


Kuva 24 Lamellipakka putkiselkeyttimen rungon sisällä oikeassa korossaan (Huttunen 2015-01-07)

5.7 Tukirakenteen suunnittelu ja toimintaperiaate

Tukirakenteeseen esitettiin aluksi kaksi erillistä mallia. Ensimmäisessä tukirakennemallissa kallistettu lamelliselkeytin tuetaan hämmennysallasta vasten altaiden yläpäistä molempiin altaisiin menevän tapin avulla (Kuva 25). Lisäksi lamelliselkeyttimen alaosa tuetaan kiilamaisella rakenteella, joka lukitaan lamelliselkeyttimen alareunaan tulevaan metalliseen pantaan. Näiden kahden kiinnikkeen avulla lamelliselkeytin ei pääse liikkumaan mihinkään suuntaan ja oikein mitoitettu kiilarakenne takaa lamellin oikean kallistuskulman. Lisäksi kiila ottaa pannaan kautta vastaan lamelliselkeyttimen alaosaan aiheutuvaa kuormaa ja jakaa sen tasaisemmin maahan. Ilman kiilamaista rakennetta lamelliselkeyttimen massa jakautuu suurimmaksi osaksi sylinterin alaosaan maata vasten olevaan kulmaan, jolloin veden ja lamelliselkeyttimen yhteinen massa saattaa aiheuttaa muutoksia lamelliselkeyttimen rakenteessa, johtaen pahimmillaan selkeyttimen rungon halkeamiseen.

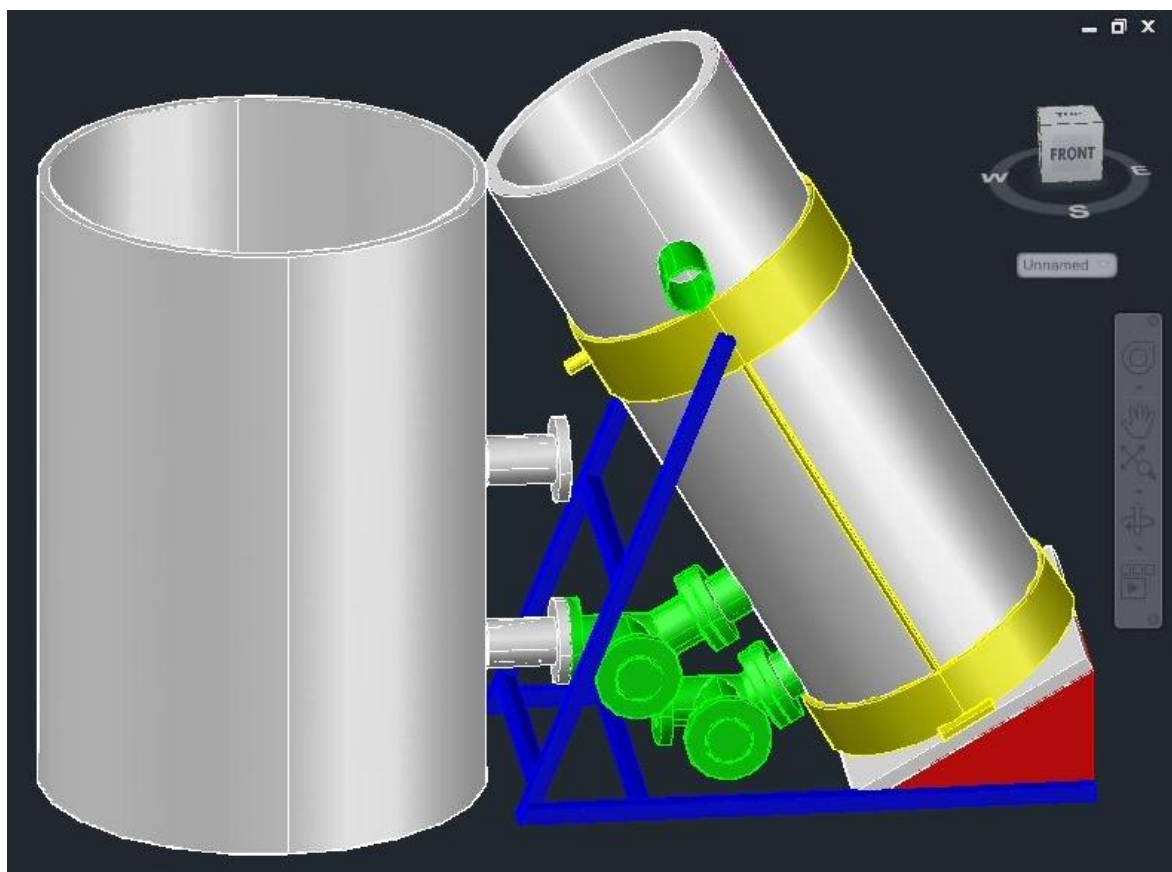
Toisessa tukirakennemallissa altaiden yläpään tapilla oleva tuenta korvattiin A-pilariratkaisulla, joka kiinnitetään lamelliselkeyttimen runkoon kahdesta runkoon hitsattavasta muovisesta puolilympyrän muotoisesta siivekkeestä (Kuva 25). Tällä tavoin hämmennysaltaan ei tarvitse ottaa vastaan lamelliselkeyttimen kuormaa, joka muutoin saattaa aiheuttaa altaiden muodon muutoksia ja halkeamia.



Kuva 25 Kuvassa putkiselkeyttimen tukirakenne A-pilarin muodossa (Huttunen 2015-01-07). A-pilarin kiinnityskohtina pystyselkeyttimen rungossa ovat punaisella merkityt puolilympyrän muotoiset siivekkeet/lipat.

Myöhemmin suunnittelun aikana A-pilarirakenteen ja muovisiin siivekkeisiin tuleva rasitus arvioitiin kuitenkin sen verran suureksi, että A-pilari päätettiin korvata varmuuden vuoksi kahdella teräksisellä RHS-putkella, jotka kiinnitetään pultein kallistetun putkiselkeyttimen yläosaan rakennettavaan metallipantaan (Kuva 26). Metallipanta puolestaan puristetaan altaan ympärille neljän pultin ja ruuvin avulla.

Metallipanta jäykistää kallistetun putkiselkeyttimen runkoa ja ottaa vastaan osan kallistetun rakenteen kuormista, sekä jakaa selkeyttimen yläosan kuorman tasaisesti tukirakenteen RHS-putkille. Tukipalkit kiinnitetään alhaalta kiilamaiseen tukirakenteeseen, ja näin ollen tukijalat eivät pääse liikkumaan selkeyttimen painon vaikutuksesta. Kiilarakenne puolestaan kiinnitetään pultein selkeyttimen nelikulmion muotoiseen pohjalevyyn (Kuva 27). Kuvassa 26 alempana olevaa keltaisella värjättyä metallipantaa, sekä pannat yhdistävää keltaista tukitankoa ei kuitenkaan lopulta teetetty niiden osoittaututtua tarpeettomiksi.



Kuva 26 Kallistettava putkiselkeytin tukirakenteineen suunniteltiin alun perin sijoitettavaksi hämmennysaltaan viereen (Huttunen 2015-01-07).



Kuva 27 Vasemmalla kuvassa on kallistettavan putkiselkeyttimen metallinen tukirunko valmiina HitSavonian tiloissa ja oikealla on kallistettu putkiselkeyttin tukirakenteineen (Huttunen 2015-01-07).

Valmis tukirakenne teetätettiin HitSavoniassa sisäisenä hankintana. Rakenteesta tuli sen verran kevyt, että osissa sitä pystyy liikuttelemaan ilman apuvälineitä. Putkiselkeyttimen ja tukirakenteen liittämisen toisiinsa on melko nopeaa, mutta siinä tarvitaan kuitenkin vähintään kolme ihmistä, jotta sen kasaaminen on turvallista. Rakenteiden yhteen liittämisen tapahtuu seuraavasti:

1. Kiinnitä maata vasten olevat tukijalat pohjakiilaan, sekä tukipilareihin
2. Kiinnitä tukipilareiden päähän toinen puoli metallisesta pannasta niin, että kovera puoli osoittaa ylöspäin
3. Nosta putkiselkeyttin tukirakenteen päälle vaakatasoon lepäämään niin, että lietteenpoistoaukon laippaliitosyhde on maahan päin
4. Nosta/kallista vähintään kahden (2) ihmisen voimin putkiselkeyttimen pohja kiilaa vasten
5. Kolmas henkilö nostaa tukipilarit ja pannan puolikkaan putkiselkeyttimen tueksi siten, että panta asettuu tukevasti ylitteenpoistoputken alapuolelle
6. Kolmas henkilö nostaa myös toisen puolen metallipannasta paikoilleen ja kiinnittää sen putkiselkeyttimen rungon ympärille
7. Lopuksi pulittaa selkeyttimen pohjalevy kiilaan kiinni ja tarkista kaikki liitokset ennen käyttöä

6 MUUN PILOT-LAITTEISTON SUUNNITTELU JA KOKOAMINEN

6.1 Lähtötiedot

Ennen varsinaisen putkiselkeyttimen valmistumista kiintoaineiden laskeuttamista oli tarkoitus kokeilla keväällä 2014 Pohjois-Suomessa sijaitsevalla kaivoksella järjestettävissä koeajoissa. Koeajoja varten olemassa olevien pikasekoitus- ja hämmennysaltaiden lisäksi oli suunniteltava pystyselkeytin, jonka laskeutustehokkuutta verrattaisiin myöhemmin suunniteltavan lamelliselkeyttimen tehokkuuteen.

Kaivoksella tehdyn vierailukäynnin perusteella osoittautui, että paikka josta kaivosvettä tullaan ottamaan koeajoja varten, on allas, jonka pohjalla on paljon kiintoainesta. Näin ollen päätettiin suunnitella pilot-kaivosvedenkäsittelylaitteistoa varten esiselkeytysallas, jonka tarkoituksena on toimia puskurialtaana minne kaivosvesi aluksi pumpataan ennen veden kemikalointia. Esiselkeyttimen pohjalle kertyisi tällä tavoin suurimmat käsiteltävän veden kiintoaineet, jotka muutoin saattaisivat tukkia prosessissa seuraavana olevan pikasekoitusaltaan, sen vesitilavuuden ollessa vain noin $0,15 \text{ m}^3$.

6.2 Esiselkeytin

Esiselkeytysallas päätettiin suunnitella ja toteuttaa samalla tavalla kuin muutkin altaat, eli kaivomaisena rakenteena, jolloin säästyttäisiin ylimääräisiltä valmistuskustannuksilta. Normaalisissa ajotilanteissa altaaseen pumpataan käsiteltävää vettä läheltä altaan pohjaa olevasta yhteestä, johon on kiinnitettynä virtaamamittari ja säätöventtiili (katso kuvat 28, 29 ja 30).

Esiselkeytyksessä käytettävän altaan toisena tarkoituksena on pitää vedenkäsittelyprosessin virtaus ja hydrostaattinen paine vakiona myös häiriötilanteissa. Tämä toteutettiin suunnitteleamalla esiselkeyttimestä hieman muita altaita korkeampi ja sen yläpään suunniteltiin erillinen ylitteenpoistoaukko, josta altaaseen mahdollisesti pumpattava ylimääräinen vesi pääsisi virtaamaan pois ilman altaiden tulvimista. Jos esiselkeyttimeen pääsee jostain syystä virtaamaan enemmän käsiteltävää vettä kuin olisi tarkoitus, ylivuotoyhteen avulla pilot-laitteiston vesipinta ja hydrostaattinen paine pysyvät kuitenkin jatkuvasti vakiona. Koska esiselkeytyks- ja pikasekoitusalaan välinen yhde pystyy todellisuudessa vetämään enemmän käsiteltävää vettä kuin normaaleissa ajotilanteissa on tarkoituksenmukaista, altaiden väliin tilattiin lisäksi muovinen läppäventtiili, jolla virtausta saadaan tarpeen mukaan säädettyä, mikäli virtauksen säätö ei onnistu esiselkeyttimen pohjassa olevan venttiilin avulla.

Koska pilot-laitteisto suunniteltiin vaihtolavan mittojen puitteissa, ei sille jäänyt paljon tilaa pinta-alan suhteen. Tästä syystä esiselkeyttimen halkaisijaksi valittiin 1,0 m. Korkeutta esiselkeyttimelle tuli 2,24 m ja vesitilavuutta yhteensä $1,46 \text{ m}^3$.

6.3 Pystyselkeytin

Pystyselkeyttimen suunnittelussa oli otettava huomioon jo heti alusta asti, ettei sillä pystytä käsittelemään 5,0 m³/h virtaamaa kaivosvesien tapauksessa. Jos näin haluttaisiin tehdä, tulisi altaan pintalan olla pintakuormateorian perusteella noin 9,0 m² ja sylinterimäisen rakenteen sisähalkaisijasta tulisi silloin noin 3,4 m leveä. Tästä syystä päädyttiin suunnittelemaan selvästi pienemmän virtauskapasiteetin omaava pystyselkeytinrakenne. Lisäksi pienemmän halkaisijan omaava muovinen kaivorakenne maksaisi myös vähemmän, painaisi vähemmän ja sitä olisi vielä mahdollista tarvittaessa liikutella ilman hydraulisia nostolaitteita.

Suunnittelupalaverien perusteella pystyselkeyttimestä päätettiin tehdä sisähalkaisijaltaan 1,4 m ja vesitilavuudeltaan noin 2,74 m³, jolloin pystyselkeyttimestä tulisi hämmennysaltaan kokoinen (Kuva 29). Näin altaan tilavuudella saavutettaisiin 0,85 m³/h virtaaman teoreettinen laskeutusteho kiintoainepartikkeleille, joiden laskeutumisnopeus on suurempi tai yhtä suuri kuin 0,5544 m/h. Suuremman halkaisijan ja sitä kautta laskeutustehon omaava pystyselkeytin olisi vienyt liikaa tilaa vaihtolavalta, johon mobiili pilot-mallin kaivosvesienkäsittelylaitteisto oli tarkoitus kasata.

6.4 Varastoallas

Pilot-laitteistoa varten tarvittiin myös varastoallas, johon kaikkien muiden altaiden ylitteet ja alitteet viemäroidään ja josta ne pumpataan takaisin kaivoksen omaan altaaseen. Varastoaltaalla ei ollut muita kriteerejä, joten siitä päätettiin tehdä 1,0 m halkaisijaltaan oleva 1,5 m korkea säiliö (Kuva 29). Kyseiset mitat riittävät hyvin varastoaltaalle, sillä sinne virtaava vesi pumpataan uppopumppuihin kiinnitettyjen pintavippojen (ON/OFF -pinnankorkeusmittari) avulla automaattisesti altaasta pois. Pintavippojen korkeutta ja sitä kautta myös varastoaltaan vesipinnan korkeutta pystytään säätämään tarpeen mukaan manuaalisesti. Varastoaltaan uppopumppujen lukumäärää voidaan lisätä, jos pilot-laitteistolla ajetaan suuria virtaamia vettä.

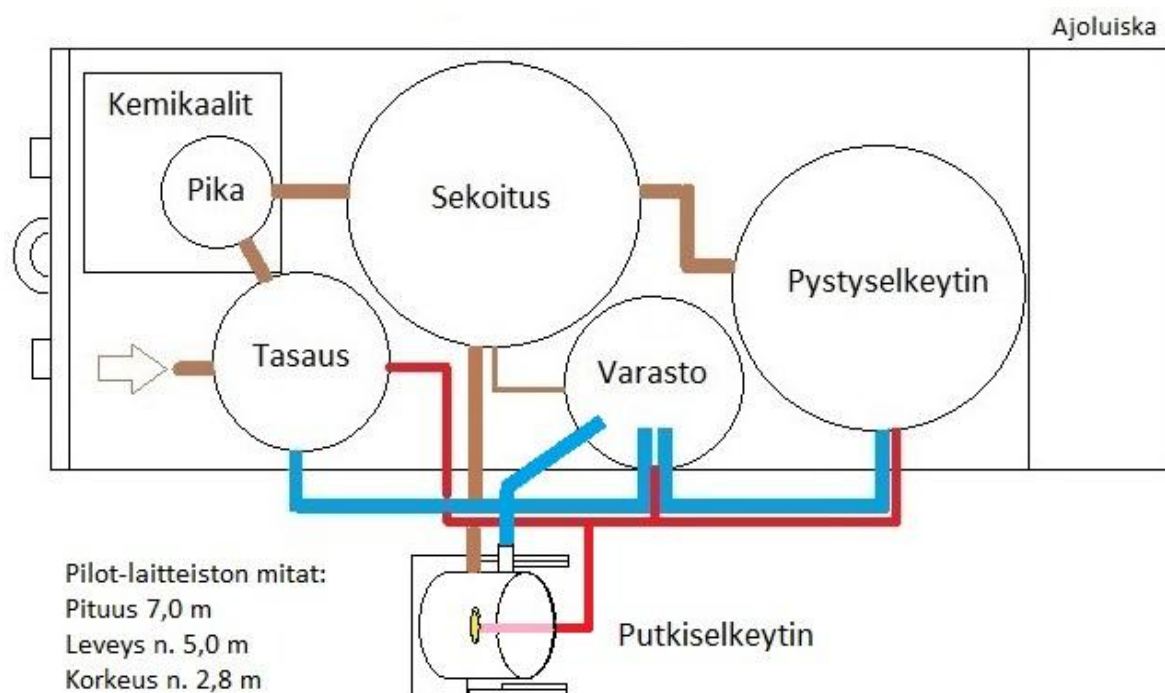
6.5 Vaihtolava ja layout-suunnittelu

Vaihtolavojen koot vaihtelevat käyttökohteiden mukaan, mutta niiden maksimitat ovat rajoitettu Tieliikennelain nojalla leveydeltään 2,6 m:iin ja pituudeltaan kuorma-auton kanssa yhteen laskettuna 12,0 m:iin (Asetus ajoneuvon käytöstä tiellä 1992/1257, § 24–25). Kuorma-auton nupin, eli vetoauton ajotilan ollessa vähintään noin 2,0 m, vaihtolavan maksimipituus on tällöin noin 10,0 m. Pidempiä tai leveämpiä kiinteitä kuljetuksia varten tarvitsee erityisluvan, joka edellyttää lupien hakemista, ajosuunnitelmien ja aikataulujen tekemistä, varautojen vuokraamista, sekä kuljettajan, jolla on lupa kuljettaa ylileveitä tai -pitkiä kuljetuksia (erikoiskuljetuksia). Koska tällainen järjestely on kustannuksiltaan kallis, oli laitteiston suunnittelussa otettava huomioon se, etteivät rakenteet ylitä kuljetuksen aikana kyseisiä rajoja.

Vaihtolava rakenteena mahdollistaa kaivosvesien käsittelyssä käytettävien laitteiden helpomman operoinnin, jos verrataan esimerkiksi merikontin sisään sijoitettavaa laitteistoa. Myös investointikustannukset ovat vaihtolavoilla usein kontteja pienemmät. Lisäksi vaihtolavan rakenne ei rajoita sinne sijoitettavien rakenteiden korkeutta, kun taas konttiin sijoitettavien laitteiden maksimikorkeus on noin 2,2 m.

Pilot-laitteiston sommittelu vaihtolavalle on kuitenkin melko haastavaa, sillä 2,6 m lavaveveys rajoittaa merkittävästi laitteiston sijoittelua. Tästä syystä sijoittelusta piirrettiin aluksi päältä päin kuvattu layout-kuva (Kuva 28), jota varten oli myös huomioitava olemassa olevien ja suunniteltavien altaiden yhteydet, jotka ovat erimittaisia ja vievät osan lavan pinta-alasta. Myös laitteiden operointi oli otettava huomioon laitteiden sijoittelussa, sillä altaiden tulee olla tietyssä järjestyksessä toimiakseen ja viedäkseen samalla mahdollisimman vähän tilaa vaihtolavalta.

Normaaleissa vaihtolavoissa on reunoilla ja takana laidat, joiden korkeus vaihtelee lavasta riippuen noin 0,2–2,0 m. Lavalle sijoitettavien pilot-laitteiden putkiyhteitä ei olisi voinut kiinnittää toisiinsa tällaisella lavalla, sillä tilaa sivuille tuleville putkiyhteille oli suunnitellun kaaviokuvan mukaan liian vähän. Näin ollen päädyttiin investoimaan koneenkuljetuslavaan, jossa ei ole ollenkaan laitoja lukuun ottamatta vaijeri- ja/tai koukkutartuntaa varten olevaa etulaitaa.



Kuva 28 Pilot-laitteiston sommittelusta vaihtolavalle piirrettiin layout-kuva (Huttunen 2015-01-07).

Alustavissa suunnitelmissa 5,5 m pituinen koneenkuljetuslava riittäisi olemassa oleville rakenteille, tiilattaville esi- ja pystyselkeyttimelle, sekä varastoaltaalle, mutta tilaa ei enää jäisi toiselle sekoitusaltaalle tai putkiselkeyttimelle. Näin ollen päätettiin investoida koneenkuljetuslavaan, jonka pituus on 7,0 m. Kyseisessä lavassa tuli olla myös vaijeri- ja koukkutartuntamahdollisuudet, sillä lavalle ei ole varattu mitään tiettyä kuljetuskalustoa, joten sitä joudutaan jatkossa siirtämään mahdollisesti molempaa tekniikkaa käyttävillä ajoneuvoilla.

Rakennekuvien ja suunnitelmien valmistuttua laitteista tehtiin tarjouspyynnöt. Säiliöt kilpailutettiin viidellä eri yrityksellä ja teetettiin kaivorakenteina, säästään samalla kustannuksissa huomattavasti. Vaijeri- ja koukutartunnalla olevat koneenkuljetuslavat kilpailutettiin kolmella eri yrittäjällä. Hankinnoissa huomioitiin hinnan lisäksi yritysten referenssit ja toimitusaika, joiden perusteella toimittajat valittiin.

6.6 Laitteiston sijoittelu vaihtolavalle ja kuljetusten aikainen sidonta

Vaihtolava tilattiin ennen kallistetun putkiselkeyttimen valmistumista, joten lopulta putkiselkeytin päätettiin lisätä muun laitteiston lisäksi erillisenä osana, joka tulee vaihtolavalla olevan laitteiston viereen omaksi yksiköksi (Kuva 28). Muu laitteisto sen sijaan sijoitettiin vaihtolavan päälle layout-kuvan mukaisesti, mutta hämmennys- ja laskeutusaltaan välinen yhde jouduttiin tekemään hieman vinoon hämmennysaltaan vääntyneiden putkiyhteiden takia. Näin ollen hämmennysallas vei vaihtolavalta enemmän pinta-alaa kuin aluksi layout-kuvassa oli suunniteltu. Vaihtolavan peräpäässä oleva 1,0 m mittainen ajoluiska vei myös 2,5 m² tilaa lavalta, jonka seurauksena kallistettu putkiselkeytin ei olisi lopulta mahtunutkaan lavalle.



Kuva 29 Kuvassa sovitellaan pilot-laitteistoa vaihtolavan päälle (Huttunen 2015-01-07). Vasemmalta alkaen kuvassa näkyvät pikasekoitusallas, hämmennysallas, esiselkeytin, varastoallas ja pystyselkeytin.



Kuva 30 Yhtenäisen pilot-laitteiston jokainen yksikkö on varmistettu kuljetuksen aikana kahdella 2 000 kg:n nimellisljuudeltaan olevalla kuormaliinalla (Huttunen 2015-01-07).

Lavalla olevat laitteistot kytkettiin toisiinsa putkiyhteiden avulla siltä osin, kuin yhteen tulivat lavan sisäpuolelle. Tällä tavoin kaikki lavalla olevat laitteistot saatiin kytkettyä toisiinsa ja tuettua siten myös lavan etulaitaa vasten. Laitteistojen alakautta tulevia viemäriputkia ja muhviilitännällä olevia yliteputkia ei kuitenkaan voinut kiinnittää laitteistoon siirtojen ajaksi, vaan ne tuli kuljettaa erikseen niiden vaurioitumisen ehkäisemiseksi.

Painavin yksikkö lavan laitteista oli hämmennysallas, sen ollessa muita kookkaampi. Lisäksi hämmennysaltaaseen kytketty moottori ja sekoittimen lapa, sekä moottorin ohjausyksikkö lisäävät laitteen massaa. Aivan tarkkaa hämmennysaltaan painoa ei ollut tiedossa, mutta sen arvioitiin painavan enimmillään noin 500 kg.

Asetus ajoneuvon käytöstä tiellä (1992/1257) vaatii kuormien sitomisessa seuraavaa:

1. Kuorma ei saa kuormakorissa siirtyä siten, että se voi haitata ajoneuvon liikenneturvallista käyttöä. Kuorma ei saa oleellisesti liikkua kuormakoriin nähden, kun kuormaan vaikuttaa eteenpäin voima, joka vastaa kiihtyvyyttä 10 m/s^2 , tai sivulle tai taaksepäin voima, joka vastaa kiihtyvyyttä 5 m/s^2 .

2. Kuorman varmistamiseksi tulee käyttää kuorman tuentaa, sitomista, lukitsemista tai peittämistä. Kuorman varmistuksen lujuuksia määritettäessä saa kitkan tarjoaman pidätyskyvyn ottaa huomioon. (Asetus ajoneuvon käytöstä tiellä 1992/1257, § 47.)

Kuorman varmistaminen onnistuu tällaisissa rakenteissa parhaiten kuormaliinojen avulla. Kuormaliinoissa tulee olla aina esillä liinan nimellislujuuden arvo, joka kuvastaa suurinta kuormitusta, jonka sidos vielä kestää (Neliveto.fi 2015-02-27). Sidoksen nimellislujuuden on siis oltava vähintään saman verran, kuin Tieliikennelain (Asetus ajoneuvon käytöstä tiellä 1992/1257, § 47) määräämä arvo. Tämä tarkoittaa sitä, että hämmennysaltaan varmistamiseksi sidonnan tulee kestää eteenpäin 500 kg:n voima ja sivuille sekä taaksepäin vähintään 250 kg:n suuruinen voima. Jotta sidoksen nimellislujuus saadaan laskennoissa ottaa huomioon, ei kuormaliina saa olla yli 60 asteen kulmassa vaakatasoon nähden. Jos kuormaliinan sitomiskulma kuitenkin ylittää tämän arvon, huomioidaan sen nimellislujuudesta vain osa seuraavasti (Neliveto.fi 2015-02-27):

1. jos kulman suuruus on 61–70 astetta, niin nimellislujuudesta huomioidaan 70 prosenttia
2. jos kulman suuruus on 71–80 astetta, niin nimellislujuudesta huomioidaan 35 prosenttia
3. jos kulman suuruus on 81–90 astetta, niin nimellislujuudesta huomioidaan 25 prosenttia.

Koska lavalla oli kuormaliinoille vain kolme paikkaa per puoli ja sidottavia yksiköitä yhteensä kuusi, hitsattiin lavan molemmille puolille vielä kahdet sidontalenkit laitteiston sitomista varten. Tämän jälkeen laitteiston jokainen yksikkö sidottiin lavaan kiinni kahdella 2 000 kg:n nimellislujuuden omaavalla kuormaliinalla (Kuva 30). Tällä keinoin turvattiin laitteiston riittävä sidonta lavan nostojen ja kuljetusten ajaksi (Kuva 31). Hyvän liikuteltavuutensa ja pienen kokonsa ansiosta putkiselkeytin pystyttiin purkamaan osiin ja kuljettamaan kohteeseen peräkärryllä.

Kuorman merkitsemiselle on myös omat ohjeet Tieliikennelaissa:

*1. Milloin kuorma ulottuu edessä ajoneuvon ääriviivan ulkopuolelle tai takana yli yhden metrin ääri-
viivan ulkopuolelle, on kuorman uloin osa selvästi merkittävä. Merkintään on käytettävä punaista tai
punakeltaista vähintään 300 mm x 300 mm suuruista merkkilippua.*

*2. Pimeän tai hämärän aikana tahi muulloinkin sääolosuhteiden taikka vastaavan syyn sitä edellyttä-
essä on kuormanulokkeen merkintään käytettävä edessä valkoista valoa eteenpäin näyttävää va-
laisinta ja valkoista heijastinta sekä takana punaista valoa taaksepäin näyttävää valaisinta ja punais-
ta heijastinta. (Asetus ajoneuvon käytöstä tiellä 1992/1257, § 49.)*

Pilot-laitteiston muutamit putkikyhteet ylittivät vaihtolavan ulkoreunan sivuilta, toiselta puolelta noin 15 cm ja toiselta noin 30 cm. Tämän takia lavaan asennettiin kuljetusten ajaksi Tieliikennelain mää-
räämät lisävalot varoittamaan muita autoilijoita lavan reunat ylittävistä osista. Kuljetuksissa käytet-
tiin apuna Savon ammatti- ja aikuisopiston opiskelijoita ja kuorma-autoa, joiden avulla pilot-
laitteistoa pystyttiin siirtämään eri kohteisiin osana oppilaitoksen opintoja.



Kuva 31 Savon ammatti- ja aikuisopisto teki kuljetukset käyttökohteisiin oppilastoina (Huttunen 2015-01-07).

7 VALMIS SELKEYTYSPROSESSI

7.1 Pilot-laitteiston toimintaperiaate

Pilot-laitteiston toiminta perustuu selkeytysvaiheita lukuun ottamatta peräkkäisiin yksikköprosesseihin. Aluksi käsiteltävä vesi otetaan pilot-laitteistolle joko suoraan paineellisesta putkilinjasta tai pumppaamalla se läheisestä altaasta. Mikäli prosessin tarkoituksena on käsitellä vesijaetta nestemäisellä kemikaalilla, käsiteltävä vesi pumpataan ensin esiselkeyttimeen, josta se jatkaa painovoiman vaikutuksesta pikasekoitusaltaaseen, johon vedenkäsittelykemikaalit syötetään (liite 2).

Mikäli vedenkäsittelykemikaalit syötetään kuivajakeina, johdetaan käsiteltävä vesi suoraan pikasekoitusaltaaseen. Pikasekoitusallas on kuivajakeiden syöttöprosessin aikana nostettu alas IBC-säiliön päältä, jolloin sen hallitseva vesipinta on muita altaita matalampana. Tästä syystä pikasekoitusaltaan vedenpinnankorkeutta mitataan ultraäänianturilla, joka on kytketty pikasekoitus- ja hämmennysaltaan väliseen pumppuun taajuusmuuttajan kautta. Pinnankorkeudelle on asetettu taajuusmuuttajan avulla omat ala- ja ylärajat, joiden avulla pikasekoitusvaiheen vedenpinnan korko pystytään pitämään vakiona altaalle tulevasta virtaamasta riippumatta. Taajuusmuuttajaan kytketty pumppu estää näin pikasekoitusaltaan tulvimisen jos virtaama yllättäen kasvaa ja vastaavasti altaan tyhjentymisen, mikäli altaalle tulevan virtaaman suuruus laskee.

Pikasekoitusaltassa kemikaloitu vesi johdetaan seuraavaksi hämmennysaltaseen, jonka tarkoituksena on parantaa vedenkäsittelykemikaalin toimintaa lisäämällä sekoituksen aikaa ja säätämällä sen voimakkuutta. Käsiteltävästä vedestä ja vedenkäsittelykemikaaleista riippuen hämmennysaltaita voi olla yksi tai kaksi kappaletta. Toista hämmennysallasta käytetään apuna niissä tilanteissa, joissa käsiteltävän veden kiintoaineiden, raskasmetalleiden ja/tai ravinteiden saostaminen on haastavaa.

Heiderscheidtin (2011, 39–40) mukaan pikasekoitus- ja hämmennysaltaiden sekoittimien lapojen optimaaliset pyörimisnopeuden voidaan määrittää G -arvon (1/s) eli nopeusgradientin perusteella. Määrittely perustuu Bratbyn (2006, 261) teokseen *Coagulation and Flocculation in Water and Wastewater Treatment*. Sen mukaan G :n lukuarvo kuvastaa hämmentimen lavan veteen aiheuttavaa voimaa. G -arvon suuruuteen vaikuttavat altaan vesitilavuus V (m³), käsiteltävän veden viskositeetti μ (10⁻³ Ns/m²) ja hämmentimen moottorin ottoteho P (Nm/s), joista viimeisimpään vaikuttavat puolestaan käsiteltävän veden tiheys ρ (kg/m³), hämmentimen lavan halkaisija D (m) ja kierrosnopeus n (1/s), sekä dimensioton kerroin ϕ , joka riippuu hämmentimen ja altaan rakenteesta (Heiderscheidt 2011, 39–40, kaavat 30–33):

$$G = \left(\frac{W}{\mu}\right)^{\frac{1}{2}} \quad (30)$$

$$W = \frac{P}{V} \quad (31)$$

$$P = \phi * \rho * n^3 * D^5 \quad (32)$$

$$G = \left(\frac{\phi * \rho * n^3 * D^5}{V * \mu} \right)^{\frac{1}{2}}. \quad (33)$$

G-arvo pystytään määrittämään laboratoriomittakaavan jar-kokeiden avulla. Jar-kokeet ovat tilavuudeltaan alle litran kokoisia panoskokeita, joiden avulla käsiteltävää vettä pystytään tutkimaan ennen varsinaisia pilot-ajoja (katso liite 3). Laboratoriossa tehtyjen jar-kokeiden perusteella valituista optimaajoista saadaan pikasekoitus- ja hämmennysvaiheiden sekoittimien pyörimisnopeuksien arvot. Kertoimen ϕ suuruus vaihtelee jar-laitteistoilla 3,5 ja 4,0 välillä. Muut kaavan 33 arvot ovat mitattavissa. Kun jar-kokeiden optimaaliset G-arvot saadaan laskettua, voidaan niiden perusteella edelleen ratkaista pilot-mittakaavan laitteiden optimaaliset pyörimisnopeudet:

$$n = \left(\frac{V * \mu * G^2}{\phi * \rho * D^5} \right)^{\frac{1}{3}}. \quad (34)$$

Sekoituksen eri vaiheiden viipymille t (s) voidaan myös määrittää optimaaliset arvot jar-kokeiden perusteella. Kun haluttu viipymä ja jar-kokeissa käytetty vesitilavuus ovat tiedossa, voidaan altaan virtaama Q (m³/h) laskea seuraavasti:

$$Q = \frac{V}{t}. \quad (35)$$

Koska käytettävät altaat ovat jo ennalta määrätyn kokoisia ja virtaamaa ei pysty erikseen säätämään eri sekoitusvaiheen osille, ei edellä olevaa optimaalista sekoitusaikaa pystytä välttämättä määrittämään sekä pikasekoitus- että hämmennysvaiheille samanaikaisesti.

Hämmennysvaiheen viimeisestä altaasta vesi johdetaan pysty- ja putkiselkeyttimille. Koska molemmille selkeyttimille vesi otetaan omasta yhteestä ja molemmissa yhteissä on muoviset läppäventtiilit, voidaan käsiteltävä vesi jakaa halutussa suhteessa eri selkeyttimille. Kumpaankin selkeyttimeen tulevan virtaaman suuruus saadaan laskettua selkeyttimien ylitteistä sekuntikellon ja mitta-astian avulla kaavan 35 mukaisesti. Koska tällainen virtaaman mittaustyyli ei ole kovin tarkka, kannattaa mittaukset suorittaa useampaan kertaan. Mittausten tarkkuutta pystytään myös parantamaan suurentamalla mitta-astian kokoa.

Jos selkeyttimien yliteputket ovat jostain syystä eri tasossa, alemmalla tasolla olevasta selkeyttimestä virtaa silloin enemmän vettä. Tämä ongelma voidaan ratkaista nostamalla muhviiliitännällä olevaa, alemmalla tasolla olevan selkeyttimen ylitteenpoistoputkea, kunnes molemmista selkeyttimistä tulee haluttu virtaama ylitettä.

Joissakin pilot-kokeissa saatetaan haluta verrata selkeyttimien toimintaa myös eri virtaamilla. Edustavimmat kokeet saadaan silloin, kun virtaaman suuruus pidetään vakiona kaikissa koeajoissa hämmennysaltaan loppuun saakka, jonka jälkeen vain selkeyttimille tulevien virtausten suuruutta muute-

taan. Tässä tapauksessa pilot-laitteistoon johdetaan vettä jatkuvasti koeajojen maksimivirtaaman verran. Viimeisen hämmennysaltaan pohjalta otetaan tarvittava ohitusvirtaama suoraan varastoaltaaseen, jonka avulla selkeyttimille tulevaa käsiteltävän veden määrää voidaan säätää tarpeen mukaan.

Kun halutut virtaamat on saatu asetettua, annetaan prosessin tasaantua vähintään koko pilot-laitteiston viipymän verran ennen näytteiden ottamista. Koska koko pilot-laitteiston vesimassa ei kuitenkaan käytännössä vaihdu kokonaan yhden laitteiston viipymän aikana, on hyvä antaa prosessin tasaantua vielä tätäkin pidempään. Selkeyttimien ylitteistä otettujen näytteiden pitoisuuksia verrataan toisiinsa, sekä käsittelemättömän veden pitoisuuksiin ja niiden avulla lasketaan reduktioiden arvot. Kun lähtöpitoisuuden Pit_0 (mg/l) arvosta vähennetään reduktion Pit_r (mg/l) arvo, tämä tulos jaetaan edelleen lähtöpitoisuuden arvolla ja osamäärä kerrotaan sadalla prosentilla, saadaan vastaukseksi selkeyttimen erotustehokkuus E (%):

$$E = \frac{Pit_0 - Pit_r}{Pit_0} * 100 \% . \quad (36)$$

Altaista tulevat ylitteet sekä alitteet ohjataan viemäröintinä alempana olevaan varastoaltaaseen, josta kaksi oppopumppua sekoittavat ensin lietteen takaisin veteen ja sen jälkeen pumppaavat nesteen takaisin laitoksen varastoaltaaseen tai muuhun sille määritettyyn pisteeseen.

Kun yksi koeajo on saatu valmiiksi ja näytteet on otettu, tulee kaikki altaat tyhjentää ja huuhdella ennen seuraavaa koeajoa. Näin varmistetaan se, että kaikki koeajot ovat edustavia toisiinsa nähden, eikä esimerkiksi hämmennysvaiheen altaiden pohjalle saostunut eroteltava jae tai kemikaali pääse uudelleen liukenemaan veteen seuraavissa koeajoissa. Lamellirakenteet tulisi tarpeen mukaan puhdistaa myös mekaanisesti vähintään kerran viikossa, jotta lamelliputket eivät pääse tukkiutumaan.

7.2 Riskiarviointi ja turvallisuustoimenpiteet

Pilot-mittakaavan kokeisiin sisältyy usein riskejä, jotka on hyvä tunnistaa ja huomioida kokeiden turvallisuuden ja sujuvuuden kannalta. Yhteistä näillä tekijöillä on se, että ne usein viivästyttävät pilotoinnin aikataulua, joten tärkeimpänä kriteerinä koeajojen suunnittelussa on varata kaikille koeajon vaiheille riittävästi aikaa. Varaamalla koeajoihin riittävästi aikaa, voidaan käyttökohteessa keskittyä paremmin myös turvallisuuteen.

Jo ennen koeajojen aloittamista on hyvä varata laitteistojen pakkaamiselle ja siirrolle riittävästi aikaa. Jos pilot-laitteiston siirto jostain syystä myöhästyy, eikä koeajoille ole varattu muutamaa ylimääräistä päivää, voidaan koeajot joutua keskeyttämään ennen aikaisesti tai huonoimmassa tapauksessa jopa perumaan. Laitteiston siirtoa voivat viivästyttää kuljetusyrityksen aikataulun pettäminen, huonot ajo-ohjeet tai kohteeseen pääsyn estyminen. Ennen kuljetusten tilaamista olisikin hyvä käydä tarkastamassa pilotointikohteen paikka, johon pilot-laitteisto on määrä sijoittaa. Näin pystytään arvioimaan toimenpiteitä, joita laitteiston kuljettamiseen ja laskemiseen kohteessa tarvitaan. Esimerkiksi useimmille kaivoksille ei pääse ilman erillistä lupaa, joka täytyy usein hommata laitteiston

kuljettajalle jo hyvissä ajoin ennen suunniteltua siirtoa. Jos laitteisto aiotaan sijoittaa ahtaisiin tiloihin, esimerkiksi maan alle, vaaditaan tätä varten kuljettajalta erillinen koulutus.

Koska pilot-laitteiston kaikkien altaiden vesipinnat ovat yhtenäisiä, eli samassa korossa merenpintaan nähden, ei vaihtolava saa kohteeseen asennettuna olla kallellaan mihinkään suuntaan. Jo muutamaman asteen heitto lavan pituussuunnassa merkitsee lavan seitsemän metrin matkalla jo kymmeniä senttimetrien eroja laitteistojen normaaleihin vesipintoihin nähden. Tämän takia vaihtolavan sijoituspaikka on käytävä tarkastamassa etukäteen ja jos alusta ei ole tasainen, joudutaan vaihtolavan korkoa jälkikäteen säätämään esimerkiksi trukkien avulla. Vaikka lava ei itsessään ole kuin 2,6 m leveä, lavan viereen sijoitettava putkiselkeytin vie myös tilaa. Näin ollen pilot-laitteistolle olisi hyvä varata noin 5,0 m x 10,0 m kokoinen tila käyttökohteessa.

Pilotointikohteen verkko- ja voimavirran saanti laitteiston yksikköprosesseille on myös tarkastettava ennen pilotoinnin aloittamista. Joissakin kohteissa tarvittavat virtalähteet saattavat olla hyvinkin kaukana, jolloin joudutaan ottamaan mukaan tarpeeksi jatkojohtoja. Useimmiten virran saanti kannattaakin turvata riittävän suuren polttoainekäyttöisen sähkögeneraattorin (agrikaatin) avulla.

Jotta pilot-kokeita pystytään suorittamaan kohteessa, täytyy etukäteen olla myös selvillä mistä käsiteltävä vesi otetaan pilot-laitteistolle. Joissakin kohteissa pilot-laitteisto saatetaan joutua sijoittamaan kauas vedenottopisteestä. On tärkeää tiedustella tuleeko käsiteltävä vesi jostain linjasta, millaiset kytkennät siihen tarvitaan, kuinka pitkä matka vedenottopisteestä on pilot-laitteistolle ja onko virtaus paineellista. Jos käsiteltävä vesi joudutaan pumppaamaan omilla pumpuilla useita kymmeniä metrejä pilot-laitteistolle, on hyvä selvittää matkan lisäksi pumppauspaikan ja pilot-laitteiston väliset korkeuserot. Useimmat uppopumput pystyvät tuottamaan kymmenien kuutiometrien virtaamia tasaisessa maastossa, mutta niiden nostokorkeus ei välttämättä ole aina riittävä käyttökohteeseen.

Koeajojen onnistumisen kannalta on tärkeää laatia hyvä koesuunnitelma. Se pitää sisällään tarvittavat virtaamat, kemikaaliannostuksen määrän, sekoitus- ja hämmennysnopeuden, tavoitellun pH-arvon ja pintakuorman arvon, kertaluonteisten kokeiden keston, sekä yleisesti koeajoihin ja näytteenottoihin liittyvät toimenpiteet ja tavoitteet. Suunnitelman avulla on helpompaa myös arvioida koeajoihin tarvittava aika ja vedenkäsittelykemikaalien määrä. Parhaimmat pilot-kokeet saavutetaan silloin, kun kirjallisuuden pohjalta on tehty aiheesta alustavaa tutkimusta ja käsiteltävää vettä, sekä vedenkäsittelykemikaaleja ja käytettäviä yksikköprosesseja on testattu ja optimoitu ensin laboratoriomittakaavassa esimerkiksi jar-laitteistolla.

Yleisimpiä riskitekijöitä aikataulun venymisen suhteen ovat laitteistoviat joko pilot-laitteistossa tai pilotointikohteessa. Ensimmäiseen mainituista pystytään varautumaan ottamalla mukaan ylimääräisiä osia laitteistoon, sekä niiden asennukseen tarvittavia työkaluja. Jotta kaikki tarvikkeet muistetaan ottaa mukaan, olisi niistä hyvä laatia tarvikeluettelo. Näin säästetään aikaa myös seuraavien koeajojen valmisteluissa. Jälkimmäiseen pystytään puolestaan varautumaan kysymällä kohteen mahdollisista toimenpiteistä, jotka saattavat viivästyttää koeajoja. Tällaisia toimenpiteitä ovat muun muassa laitteistojen määräaikaishuollot tai kaivoskohteissa mahdolliset räjäytykset.

Suurimmat riskit ihmisille aiheutuvat pilot-kokeiden aikana usein laitteiston kasaus- ja purkuvaiheissa. Oikeiden nosto-otteiden avulla vältytään turhilta vammoilta ja raskaita nostoja varten saa paikasta useinkin koneellista apua. Esimerkiksi jauheannostelijan siirtäminen tulee suorittaa jonkin nostolaitteen avulla ja putkiselkeyttimen kasauksessa olisi hyvä käyttää apuna nostotyökoneita, joiden avulla selkeyttimen kaatuminen voidaan estää. Myös käyttökohteeseen oikeiden työkalujen valinnalla voidaan merkittävästi pienentää tapaturmariskejä. Joissain kohteissa esimerkiksi puukon käyttö on kokonaan kiellettyä. Korkealla maanpinnan yläpuolella työskentelyä tulisi myös välttää puutoamisriskin takia. Joitakin toimenpiteitä varten pilot-laitteiston päälle joutuu kuitenkin välillä kiipeämään. Silloin olisi hyvä varmistaa A-tikkaiden kaatuminen niiden jalkoihin asennettavilla poikkiapuilla, jotka tulevat maata vasten. Näin tikkaat eivät pääse kaatumaan sivusuunnassa.

Pilot-kokeiden aikana joudutaan usein käsittelemään erilaisia kemikaaleja, joista useimmat sisältävät terveydelle haitallisia aineita. Mikäli kemikaalit annostellaan jauheena, tulisi silloin käyttää tiiviitä silmä- ja hengityssuojaimia, sekä suojakäsineitä. Vaatteet olisi myös hyvä puhdistaa esimerkiksi paineilmalla jauheesta kemikaalien käsittelyn jälkeen. Jos prosessiin syötettävä kemikaali on puolestaan nestemäistä, tulee kiinnittää erityistä huomiota siihen, ettei kemikaalia pääse roiskumaan silmiin tai iholle. Koska käsiteltävät kemikaalit ovat usein vaarallisia, niiden mukana tulisi olla aina kemikaaliluettelo, joka kertoo aineen kemiallisen koostumuksen ja vaaraluokan, sekä mitä suojaimia kemikaalia käsiteltäessä tulee pitää yllä.

Useimmissa pilotointikohteissa järjestetään laitoksen puolesta myös pakollisia turvallisuuskoulutuksia, joihin menee usein koko päivä. Turvallisuuskoulutukset ovat hyödyllisiä, sillä niissä kerrotaan pilotointikohteen muista riskitekijöistä, niiden tunnistamisesta ja niihin liittyvistä varotoimenpiteistä. Merkittävimpiä riskitekijöitä pilotointikohteissa ovat usein siellä käsiteltävät kemikaalit, mahdolliset räjäytykset ja raskas liikenne. Koulutuksissa annetaan laitoksen oman hälytyksiä hoitavan keskuksen numero (esim. pääportti), jonne pitää ilmoittaa kaikista tapaturmista ja onnettomuuksista. Tätä varten olisi hyvä, jos pilot-laitteiston mukana kulkisi aina varopuhelin, joka on tarkoitettu vain hätätilanteita varten. Puhelin tulisi pitää myös mahdollisuuksien mukaan aina laturissa. Näin vältytään mahdolliselta tilanteelta, jossa tapaturman sattuessa yhdessä siviilipuhelimessa ei ole esimerkiksi virtaa.

8 KALLISTETTAVAN PUTKISELKEYTTIMEN TOIMINNAN TESTAUS

8.1 Kokeiden tarkoitus ja niihin valmistautuminen

Kallistettava putkiselkeytin saatiin rakennettua valmiiksi elokuussa 2014. Jotta sen erotuskykyä päästäisiin kokeilemaan ja arvioimaan myös käytännössä, päätettiin laite ottaa mukaan Yara Oy:n Siilinjärven tehtaalla lokakuussa 2014 järjestettyihin koeajoihin (liite 3). Koeajojen päätarkoituksena oli löytää tehtaan jäteveden kemikaloinnille optimaalinen kemikaalien annostus fosforin erotuksen kannalta. Uutta kemikaaliannostusta tulisi käyttää jatkossa, kun tehtaalle rakennetaan uusi jätevedenkäsittelylaitos.

Ennen varsinaisia pilotointeja kohteen jätevesiä tutkittiin Savonia-ammattikorkeakoulun Ympäristötekniikan opetus- ja tutkimusyksikön laboratorioissa. Jätevesistä otettiin yhteensä kolme kappaletta 60 l näytettä eri ajankohtina. Jokaisesta näytteestä tutkittiin aluksi muun muassa lämpötila, pH, sähköjohtokyky, alkaliteetti, sekä kiintoaineen ja kokonaisfosforin määrä. Alkumääritysten jälkeen jäteveden puhdistamista testattiin ja optimoitiin jar-kokeilla, joiden tarkoituksena oli löytää ennen kaikkea fosforin erotukselle optimaaliset kemikaaliannostukset, sekä hämmennysvaiheiden nopeudet ja ajat.

Yara Oy:n Siilinjärven tehtaalla on yleisesti ollut käsiteltävän jäteveden kemikaaliannostuksena noin $1,0 \text{ kg/m}^3$ jauhemaista sammutettua kalkkia $[\text{Ca}(\text{OH})_2]$. Jar-kokeiden perusteella saimme laskettua tarvittavaa kemikaalimäärää 60 prosenttia, jolloin $0,4 \text{ kg/m}^3$ kemikaaliannos tuotti koesarjojen parhaat tulokset fosforin erotuksen osalta. Panos-tyyppiset, kertaluontoiset laboratoriomittakaavan kokeet eivät kuitenkaan vielä yksiselitteisesti todista, että kyseinen annostelu toimii jatkuvasti virtaavassa jätevedessä, jonka ominaisuudet saattavat muuttua hyvinkin nopeasti. Tästä syystä jar-kokeiden tuloksista saadut arvot muutettiin vastaamaan pilot-laitteiston kokoa ja niiden paikkansäilytävyyttä päätettiin testata jatkuvatoimisena kenttäkokeena Savonian pilot-laitteiston avulla.

8.2 Koejärjestelyt

Koeajoihin hankittiin jauheannostelija jauhemaisen sammutetun kalkin annostelua varten. Koska jauheannostelija ei ollut kovin korkea, ei se olisi yltänyt kahden metrin korkeudessa olevan pikasekoitusaltaan päälle. Jauheannostelijalle erillisen telineen teettäminen olisi tullut maksamaan useita tuhansia euroja, joten pikasekoitusallas päätettiin laskea IBC-säiliön päältä lavalle, jolloin jauheannostelijan korottamiseen riittivät pelkät kuormalavat. IBC-säiliön lisäksi lavalta poistettiin koeajoja varten myös esiselkeytysallas, jonka paikalle jauheannostelija sijoitettiin. Pikasekoitusaltaan ollessa muita säiliöitä selvästi alempana, asennettiin pikasekoitus- ja hämmennysaltaan väliin pumppu nostamaan kemikaloitua vettä hämmennysvaiheeseen. Pumpun pyörimisnopeutta säädettiin tajuusmuuntajan avulla, johon oli kytketty pikasekoitusaltaan pinnankorkeutta mittaava ultraäänianturi.

Kuivien kemikaalien tarkka annostelu kosteissa olosuhteissa on usein haastavaa. Yara Oy:n Siilinjärven tehtaalla pilot-laitteisto jouduttiin sijoittamaan ulkotiloihin nykyisen kemiallisen puhdistamon viereen. Jauhemaisen kemikaalin annostelun turvaamiseksi päätettiin pilot-laitteiston ympärille rakentaa katos, joka estää ulkoilman kosteutta ja tuulta häiritsemästä annosteluprosessia. Samalla katos estää sadeveden pääsyn avonaisiin pilot-laitteiston säiliöihin, mikä voisi mahdollisesti vääristää kokeiden tuloksia. Pressukatoksen ollessa tiivis sen sisäilmaan kertyy kuitenkin kosteutta jatkuvasti haihtuvasta jätevedestä. Jotta ilmankosteus katoksen sisällä ei haittaisi kemikaalien annostelua, päätettiin jauheannostelijan ympärille hankkia kaksi lämpöilmapuhallinta. Niiden avulla estettiin ilman kosteuden kondensoituminen metallisen jauheannostelijan runkoon.

Pikasekoitus- ja hämmennysvaiheiden moottorien lapojen pyörimisnopeudet määritettiin jar-kokeiden perusteella kaavojen 30–34 avulla. Kemikaloitu jätevesi jaettiin hämmennysaltaasta kahtia sekä pysty- että putkiselkeyttimelle. Näin ollen selkeyttimien virtaama oli aina puolet pilot-laitteistoon tulevasta virtaamasta. Selkeyttimistä ylitteenä tulevat kirkasteet ja alitteina tulevat lietteet johdettiin lopuksi varastoaltaaseen, josta kaksi oppopumppua pumppasi veden läheiseen ojaan, jonne kohteen kemiallisen puhdistamon vedetkin laskevat.

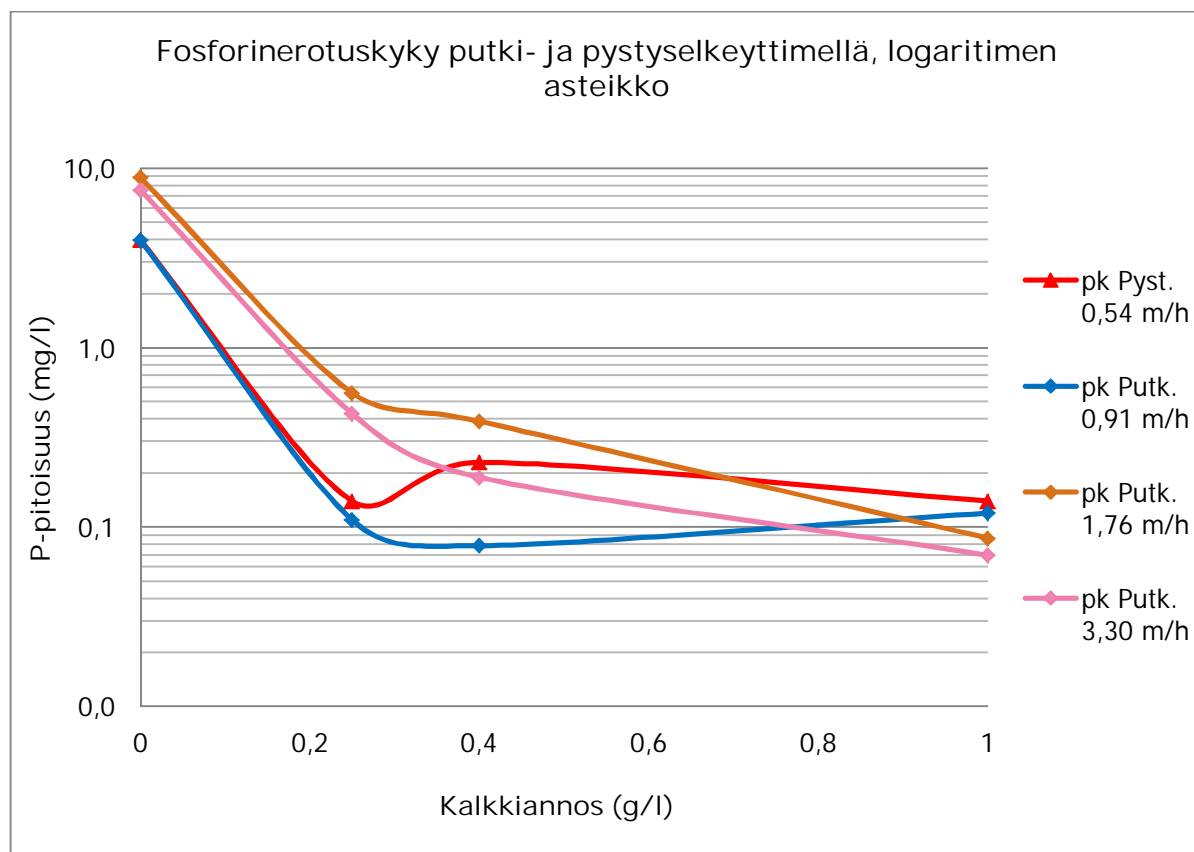
Kemikaalien annosteluina käytimme jar-kokeissa saadun optimaalisen annostuksen $0,4 \text{ kg/m}^3$ lisäksi myös $0,25 \text{ kg/m}^3$ annostelua, sekä laitoksella käytettyä $1,0 \text{ kg/m}^3$ annosta. Vedenkäsittelykemikaalina käytimme samaa sammutettua kalkkia $[\text{Ca}(\text{OH})_2]$, jota myös laitoksella käytetään. Laitteistoa ajettiin kokeissa kolmella eri virtaamalla ($1,6$, $3,2$ ja $6,0 \text{ m}^3/\text{h}$), ja jokaisella virtaamalla testattiin eri kalkkiannoksia. Tällä tavoin erilaisia koeajoja tuli yhteensä yhdeksän kappaletta. Pilot-kokeiden tarkoituksena oli lisäksi testata putki- ja pystyselkeyttintä rinnakkain, jolloin niiden tuloksia voitaisiin verrata keskenään. Tätä varten edellä mainitut virtaamat jaettiin jokaisessa koeajossa hämmennysaltaasta kahtia eri selkeyttimille. Näin ollen selkeyttimien virtaamat olivat noin $0,8 \text{ m}^3/\text{h}$, $1,6 \text{ m}^3/\text{h}$ ja $3,0 \text{ m}^3/\text{h}$, selkeyttimien pintakuormien arvojen vaihdellen $0,52$ – $3,30 \text{ m/h}$.

Jokaisen koeajon päätteeksi selkeyttimien ylitteistä ja jätevedenottopisteestä otettiin kahdet näytteet, joista toinen toimitettiin Yara Oy:n Siilinjärven tehtaan omaan analyysilaboratorioon ja toinen Savonia-ammattikorkeakoulun Ympäristötekniikan opetus- ja tutkimusyksikön laboratorioon. Saaduista näytteistä analysoitiin samat asiat kuin jar-kokeisiin tulleista näytteistä ja tulosten perusteella kaikista muuttujista laskettiin reduktioiden arvot.

8.3 Tulokset ja niiden analysointi

Pilot-kokeiden perusteella putkiselkeyttimellä pienillä pintakuorman arvoilla kalkin annosteluna $0,4 \text{ kg/m}^3$ tuotti parhaat tulokset fosforin erotuksen kannalta (Kuvio 1). $1,0 \text{ kg/m}^3$ kalkkiannoksilla pintakuorman nostaminen putkiselkeyttimessä poisti tehokkaimmin fosforia jätevedestä. Tuloksissa on kuitenkin huomioitava se, että fosforin erotuksessa jo $0,25 \text{ kg/m}^3$ kalkkimäärällä päästään pitoisuuksissa reilusti alle $1,0 \text{ mg/l}$ tuloksiin. Näin ollen suuremmillakin pintakuormilla kalkin lisäys $0,4 \text{ kg/m}^3$ ylöspäin ei tuota enää merkittäviä parannuksia reduktioiden arvoihin, jotka vaihtelivat koko koesarjan aikana 89 ja $99,1$ prosentin välillä.

Kuvioon 1 on otettu vertailun vuoksi pystyselkeyttimen matalimman pintakuorman koeajot, jotka näkyvät kuviossa punaisella viivalla. Lisäksi kuviosta löytyvät kaikki putkiselkeyttimellä suoritettujen koeajojen tulokset. Kalkkiannoksella 0 g/l olevat lähtöarvot tarkoittavat käsittelemättömän jäteveden fosforipitoisuuksia. Kuviota tarkasteltaessa voidaan huomata, että mitä suuremmaksi kalkkiannosta nostetaan, sitä paremmin putkiselkeytin erottaa fosforia käsiteltävästä vedestä verrattuna pystyselkeyttimeen.



Kuvio 1 Fosforinerotuskyky putki- ja pystyselkeyttimellä on kuvattu logaritmisella asteikolla (Huttunen 2015-01-07). Lyhenne Pyst. tarkoittaa pystyselkeyttintä ja Putk. putkiselkeyttintä.

Suurimmalla annostuksella fosforin erotuksen osalta putkiselkeyttimellä päästään parempiin tuloksiin kaikilla pintakuormien arvoilla verrattuna pystyselkeyttimen erotuskykyyn. Myös 0,4 g/l kalkkiannostuksella putkiselkeyttimellä päästään 3,30 m/h pintakuormalla parempaan erotuskykyyn fosforin osalta kuin pystyselkeyttimen 0,54 m/h pintakuormalla. Teoriassa tämä tarkoittaa sitä, että yhdistettynä optimoituun kemikaaliannosteluun, valmistetulla pilot-mallin putkiselkeyttimellä pystytään käsittelemään yli kuusinkertainen määrä vettä selkeyttimen vesipinta-alaa kohti kuin normaalilla pystyselkeyttimellä.

Tulosten tarkastelussa on kuitenkin syytä ottaa huomioon muutama asia. Ensinnäkin, pikasekoitusaltaan jälkeen oleva pumppu saattoi mitätöidä jar-kokeiden perusteella pikasekoitukselle määritetyn optimaalisen G-arvon aiheuttaman hämmennyksen voiman, sillä pumppu toimii myös itsessään eräänlaisena sekoittimena. Toiseksi, hämmennysaltaan moottori hajosi koeajojen alkupuolella, joten jouduimme vaihtamaan sen uuteen. Uuden moottorin pyörimisnopeutta ei saanut säädettyä yhtä matalalle, kuin jar-kokeiden perusteella laskettu hämmennysvaiheen pyörimisnopeuden arvo olisi

tullut olla. Näin ollen hämmennysvaiheen sekoittimen lapa pyöri tasan kaksinkertaisella nopeudella optimaaliseen hämmennysnopeuden arvoon verrattuna. Kolmanneksi, ennen laitoksen kemiallista puhdistusta (EKP) otetut käsiteltävän veden näytteet otettiin samaan aikaan selkeyttimien ylitteistä otettujen näytteiden kanssa. Jotta reduktioille saataisiin laskettua tarkemmat arvot, olisi EKP:n näytteet pitänyt ottaa pilot-laitteiston viipymän verran ylitteiden näytteidenottoa aikaisemmin. Näin verrattavat vesijakeet olisivat kaikkein varmimmin koostuneet samanlaisesta jätevedestä. Neljänneksi, selkeyttimien erotustehokkuuksien vertailun vuoksi koeajoja olisi tullut suorittaa siten, että selkeyttimiin olisi jaettu hämmennysaltaasta saman pintakuorman virtaamat samojen virtaamien sijaan. Silloin virtaama olisi jaettu putki- ja pystyselkeyttimelle niiden vesipintojen pinta-alojen suhteen mukaan, eli 1:1,7.

Fosforinpoistotehokkuus oli kaikkien koeajojen keskiarvona kallistetulla putkiselkeyttimellä sama kuin pystyselkeyttimellä, eli noin 95 prosenttia. Vaikka nuo keskiarvot osoittavat selkeyttimien toimivan lähes yhtä hyvin, niin neljästä koeajosta, joissa fosforin erotuksen osalta lopullisissa pitoisuuksissa päästiin alle 0,1 mg/l lukemiin, kolme saatiin putkiselkeyttimellä. Vastaavat keskiarvot kiintoaineiden reduktioille olivat putkiselkeyttimellä noin 30 prosenttia ja pystyselkeyttimellä 16 prosenttia.

Laskelmien perusteella voidaankin arvella, että tehostetulla selkeytyksellä on merkittävä rooli siinä, kuinka paljon haitta-aineiden erotteluun käytettävää kemikaalia ja muuta kiintoainesta saadaan selkeytyksen aikana eroteltua vedestä ennen seuraavaa prosessia. Tulos on siinä määrin merkittävä, että Yara Oy:n Siilinjärven tehtaan kemiallisen puhdistamon nykyisiä laskeutusaltaita joudutaan ruoppaamaan usein juuri sen takia, että jäteveden käsittelyssä käytettävää sammutettua kalkkia laskeutuu suuria määriä laskeutusaltaiden pohjalle.

9 JOHTOPÄÄTÖKSET

Opinnäytetyön tavoitteena oli suunnitella putkiselkeyttimestä laite, joka soveltuu useisiin eri kairvosympäristöihin, erilaisille vesi- ja kiintoainejakeille. Näin ollen mitoituksessa ei lähdetty normaaliin tapaan liikkeelle tarkoista eroteltavien kiintoaineiden ominaisuuksista, määrästä ja tietyistä erotuskyvystä kuten normaalissa tilanteessa, vaan lähtökohtana oli tietyn virtaaman selkeyttäminen ja tavoiteltu selkeytys tapahtuisi oletetusti kiintoainepartikkeleille, joiden laskeutumisnopeus on 0,5544 m/h tai sitä suurempi. Kyseisen arvon avulla ei kuitenkaan pysty suoraan arvioimaan, minkä kokoluokan partikkelit laskeutuvat missäkin testiympäristössä, sillä kiintoaineiden laskeutumisnopeuteen vaikuttavat kiintoaineiden hiukkaskoon lisäksi niiden tiheys ja muoto, ympäröivän nesteen lämpötila ja tiheys, sekä prosessissa käytettävien saostuskemikaalien toiminta.

Tavoitteina opinnäytetyössä suunniteltavalle ja rakennettavalle putkiselkeyttimelle asetettiin 5,0 m³/h virtaaman käsittelyminen. Lisäksi opinnäytetyössä haluttiin todentaa lamellin tuoma tehokkuus verrattuna perinteiseen laskeutukseen. Muita suunnitteluun vaikuttavia tekijöitä olivat pieni koko, liikuteltavuus ja yhteensopivuus muun pilot-laitteiston kanssa.

Pienen kokonsa ja toimintaperiaatteensa ansiosta putkiselkeyttimen tehokkuuteen eivät haittaa voimakkaat tuulet, jotka voivat suuremmissa selkeytysaltaissa aiheuttaa aaltoja, pyörteitä ja/tai oikovirtaamia. Putkiselkeyttimen vesipinnan pinta-alan ollessa pieni, eivät sen toimintaan vaikuta myöskään pienet kallistukset. Suuremmissa altaissa muutaman prosentin kallistus pituussuunnassa altaan päiden välillä voi merkitä jo useiden kymmenien senttimetrien korkeuseroja altaan vesipinnassa. Lisäksi opinnäytetyön mitoitusparametriksi asetettu virtaama 5,0 m³/h saadaan teoriassa käsiteltyä putkiselkeyttimellä, kun lamellirakenteena käytetään pienempiä, 40 mm ulkohalkaisijaltaan olevia lamelliputkia.

Kallistettava putkiselkeytin pystyy teoriassa erottelemaan 0,5544 m/h ja sitä nopeammin laskeutuvat hiukkaset parhaimmillaan 6,35 m³/h virtaamasta ja huonoimmillaankin 0,85 m³/h virtaamasta, joka on samalla pystyselkeyttimen teoreettinen tehollinen maksimivirtaama. Käytännön koeajot (liite 3, taulukko 12) ulkohalkaisijaltaan 50 mm lamelliputkilla noin 0,85 m³/h virtaamilla osoittivat, että putkiselkeytin erottelee kiintoaineita ja ravinteita käsiteltävästä vedestä pystyselkeyttintä paremmin. Kun selkeyttimien pintakuormia verrataan fosforinerotuskyykyyn (Kuvio 1), huomataan, että parhaimmillaan putkiselkeyttimellä päästään yli kuusinkertaisella pintakuorman arvolla samaan erotustehokkuuteen, kuin pystyselkeyttimellä. Yhteenvedona voidaan todeta opinnäytetyön olleen onnistunut monelta osin, mutta tutkittavaa ja kehiteltävää riittää myös jatkossa.

Putkiselkeyttimen toimintaan kappaleen alussa mainittujen tekijöiden lisäksi vaikuttavat muun muassa lamellirakenteiden puhtaus ja sitä kautta puhdistusväli. Impedanssitomografisilla menetelmillä tai optisen kameran avulla saadaan tulevien koeajojen yhteydessä tarkasteltua virtaamien lisäksi myös lamellin sisällä tapahtuvaa kiintoaineen kertymistä selkeyttimen pinnoille ja näin ollen koeajojen aikana saadaan yleinen käsitys siitä, kuinka usein lamellipakka tulee puhdistaa. Lamellin putkien puh-

distamista varten tulee hankkia tai rakentaa kyseistä käyttötarkoitusta varten oma puhdistusmenetelmä. Yksinkertaisimmillaan rakenne voi koostua WC-harjasta ja jatkovarresta, joiden yhteismitta tulee olla vähintään 1,5 m lamellin puhdistamiseksi. Ongelmana mekaanisessa puhdistuksessa on kuitenkin metallinen verkko, joka peittää lamellin putkia. Toinen vaihtoehto on esimerkiksi täyttää putkiselkeytin vedellä ja laittaa sekaan noin litran verran suolahappoa (HCl), antaa vaikuttaa vuorokauden verran ja tämän jälkeen pestä lamelliselkeytin vielä painepesurilla.

Kaivosvesien lisäksi pilot-laitteisto soveltuu myös muiden vesijakeiden käsittelyyn. Jatkossa putkiselkeyttintä tullaan testaamaan erilaisissa käyttökohteissa ja osa koeajoista suoritetaan yhdessä pystyselkeyttimen kanssa. Koeajojen tarkoituksena on edelleen todistaa lamellin tuoman selkeytyksen lisäteho ja havaita lamelliselkeyttimen rakenteessa olevia puutteita, sekä korjata ne. 40 mm ulkohalkaisijaltaan olevien lamelliputkien kasaaminen yhdeksi lamellipakaksi kannattaa jatkossa toteuttaa myös eri tavalla kuin nykyinen lamellipakka. Yhtenä vaihtoehtona on hitsata lamelliputkia varten valmis muotti, joka voidaan laskea ja lukita putkiselkeyttimen rungon sisälle. Tämän jälkeen tähän muottiin voidaan laittaa käyttökohteeseen ja tarpeeseen soveltuvia, erilaisia lamellirakenteita. Näin kallistettavan putkiselkeyttimen liikuttelusta ja huollosta tulee entistäkin helpompaa.

Suurimpina ongelmakohtina lamelliselkeyttimen toiminnassa tulevat jatkossa olemaan muun muassa lietepesässä olevan lietemäärän seuranta ja sitä kautta oikean selkeyttimen tyhjennysajan määrittäminen. Lietepesän korkeus kullakin hetkellä voidaan määrittää esimerkiksi optisen kameran avulla tai asentamalla lamelliselkeyttimen alaosan kylkeen läpinäkyvästä muovista ikkuna, josta lietepesän lietekerroksen korkeutta pystytään seuraamaan ilman kalliita instrumentteja.

Toinen tarkasteltava asia lamelliselkeyttimen toiminnassa tulee olemaan käsiteltävän veden virtausprofiili selkeyttimen ja lamellin sisällä. Tarkastelu voidaan tehdä impedanssitomografisella menetelmällä, joka mittaa nesteessä olevien partikkelien varauksia ja pystyy näin määrittämään tarkasti, millä kohtaa lamelliselkeyttintä kiintoainesta on eniten, kuinka virtaama jakaantuu selkeyttimen ja lamellin sisällä ja syntykö järjestelmään mahdollisesti haitallisia pyöreitä, tukoksia tai oikovirtaamia. Menetelmässä lamelliselkeyttimen rungon sisäreunaan asennetaan elektronisia lähettämiä ja mittaanturi upotetaan lamellin keskimmäisen putken kautta selkeyttimen sisään halutulle korkeudelle. Mittausdata voidaan kokeen aikana siirtää suoraan tietokoneelle, joka piirtää virtauksista kolmiulotteiden kuvan. Kuvien avulla voidaan havainnoida helposti esimerkiksi nopean ja hitaan virtaaman alueita, joiden avulla pystytään määrittämään mahdolliset tukokset, oikovirtaamat ja pyörteet selkeyttimen sisällä. Jatkossa erityisesti lamellipakan putkien väliin jäävien kapeiden kanavien toimivuutta olisi syytä tarkastella.

Kolmas ja ehkä merkittävin ongelmatekijä putkiselkeyttimen toiminnassa tulee vastavirtaperiaatteen takia olemaan lamellissa laskeutuneen kiintoaineen uudelleensekoittuminen lamellin alapuolella takaisin ylöspäin menevään käsiteltävään vesivirtaan. Putkiselkeyttimiin ei ole tutkimuksissa vielä tällä hetkellä keksitty sopivaa ratkaisua, joka tehokkaasti estäisi laskeutuneiden kiintoaineiden uudelleensekoittumista virtaavaan veteen.

Lamelliratkaisuissa, joissa käytetään putkien sijaan levyjä lamellin rakenteena, voidaan levyihin asentaa laskeutuneelle lietevirralle oma lietekatko ennen lamellin päättymistä. Lietekatko asennetaan sopivaan kulmaan (esimerkiksi 45–60 astetta) lamellihevyn päälle sen alaosaan, jonka avulla alaspäin valuva lietevirta ohjataan erilliseen keräimeen ennen lamellin päättymistä. Näin ollen laskeutuneen kiintoaineen uudelleensekoittumisen osuus lamellin alapuolella ylöspäin virtaavaan veteen on huomattavasti normaalia lamellimallia pienempää ja teoriassa erotuskyky paranee. Lietekatkossa on kuitenkin se huono puoli, että se supistaa hetkellisesti lamellin sisällä virtaussuunnan poikkipinta-alaa aiheuttaen aluksi virtausnopeuden äkillisen suurentumisen ja katkon jälkeisen pienentymisen. Tämä aiheuttaa lamellin sisällä aaltoja, jotka teoriassa saattavat puolestaan huomattavasti pienentää lietekatkon yläpuolisen lamellin toimintaa ja sitä kautta vähentää lamellin tuottamaa erotuskykyä. Maailmalla ei ole tällaisilla lamelliin asennettavilla lietekatkoilla tehty kuin muutama tutkimus ja lisää kokeita tarvitaan todistamaan, parantaako lietekatko lopulta merkittävästi lamelliselkeyttimen erotuskykyä.

Lisäksi kirjallisuudessa (Salem 2012, 84) on mainittu, että käsiteltävän veden tuloaukkojen määrällä, sijainnilla ja optimoidulla virtausnopeuden säädöllä erityisten suuttimien kautta saattaa olla huomattava merkitys erotustehokkuuden paranemisen kannalta. Järkevintä olisi yhden tuloyhteen sijasta jakaa tuleva vesi mahdollisimman monesta kohtaa lamelliselkeyttimen sisään, jolloin välttyttäisiin oikovirtaamilta ja lamelliselkeyttimestä saataisiin mahdollisimman suuri erotusteho. Putkiselkeyttimeen jätettiin tästä syystä tuloyhteelle selkeyttimen sisäpuolelle noin 150 mm pätkä tuloputkea, johon voi testiajajien yhteydessä liittää tarvittavia muhvilisia putkiliitoksia ja kokeilla, kuinka esimerkiksi tulevan veden johtaminen eri kohdista selkeyttintä tai suuttimen kautta vaikuttaa selkeytyksen tehokkuuteen.

Kallistettavan putkiselkeyttimen kilpailukykyä laitteena tai tuotteena on hankala arvioida vielä näin varhaisessa vaiheessa, ainoastaan yhden pilotoinnin perusteella. Jos yllä mainitut ongelmat saadaan tulevaisuudessa ratkaistua ja selkeyttimen toimintakyky voidaan varmentaa usealla eri kokeella, on mahdollista, että kallistettava putkiselkeytin pystyisi toimimaan markkinoilla myytävien lamelliselkeyttimien vaihtoehtona. Polyeteenin ollessa selkeyttimien rakennusmateriaalina yleisesti ottaen metalleja halvempaa, on kyseinen putkiselkeytin mahdollista myös tuotteistaa tulevaisuudessa. Tuotteistamisen myötä tuotantovaiheen kustannuksia saadaan pienennettyä ja valmiin prototyypin, sekä rakennekuvien pohjalta laitteen rakentamiseen kuluu vähemmän aikaa.

Pystyselkeyttimeen verrattuna putkiselkeytin osoittautui kuitenkin tehokkaammaksi vaihtoehdoksi, pystyen samaan fosforinerotuskykyyn yli kuusinkertaisella pintakuormalla. Pystyselkeyttimen hankintahinnaksi tuli tarvittavine laippaliitäntöineen noin 1 250 euroa (alv. 0 %), kun putkiselkeyttimen materiaalikustannukset olivat 50 mm ulkohalkaisijaltaan olevan lamelliputkirakenteen kanssa yhteensä noin 1 400 euroa (alv. 0 %). Pystyselkeytin vie pinta-alaa noin 1,8 m², kun putkiselkeytin tukirakenteineen vaatii noin 2,1 m² tilan. Tukirakenteen hintaa ei ole sisällytetty laskelmaan, sillä se ei ole suuremmakaan mittakaavan laitteistossa välttämätön. Putkiselkeytin pystytään tarvittaessa kallistamaan esimerkiksi patorakennetta vasten, kunhan putkiyhteille kaivetaan reitti maarakenteiden läpi.

Oletetaan lopuksi, että samanlainen putkiselkeytin rakennettaisiin markkinoiden tämän hetken suurimpaan mahdolliseen polyeteenistä valmistettavaan putkeen, jonka sisähalkaisija on 3,0 m. Tällaisen rungon sisään mahtuu teoriassa noin 3 150 kappaletta 50 mm ulkohalkaisijaltaan olevaa lamelliputkea. Lamelliputkien väliin jäävien pienempien virtauskanavien lukumäärä olisi noin 8 380. Jos jokaisen lamelliputken pituus olisi 2,0 m, tulisi lamellipakkaan tarvittavien putkien yhteispituudeksi noin 6,3 km ja hinnaksi vajaa 10 000 euroa. Kun tähän lisätään rungon ja tarvittavien osien materiaalikustannukset, voidaan suuren putkiselkeyttimen valmistushinnaksi arvioida tulevan noin 15 000 euroa (alv. 0 %, henkilöstökustannukset eivät sisälly hintaan). Tällainen lamelliselkeytin pystyisi teoriassa erottelemaan hiedan ja sitä suuremmat laskeutuvat partikkelit noin 160 m³/h virtaamasta. Käytännössäkin, jos otetaan huomioon mahdollinen 70 prosentin tehohäviö lamellissa, se kykenisi käsittelemään noin 55 m³/h virtaaman jätevesiä. Kun prosessiin lisätään vielä optimaalinen saostuskemikaalin annostus pikasekoitus- ja hämmennysaikoineen, saadaan selkeyttimellä erotettua samasta virtaamasta vielä pienempiäkin kiintoaineita. Tämä 3,0 m halkaisijaltaan oleva putkiselkeytin pystyisi siis käytännössä käsittelemään saman verran jätevettä, kuin 100 m² kokoinen laskeutusallas.

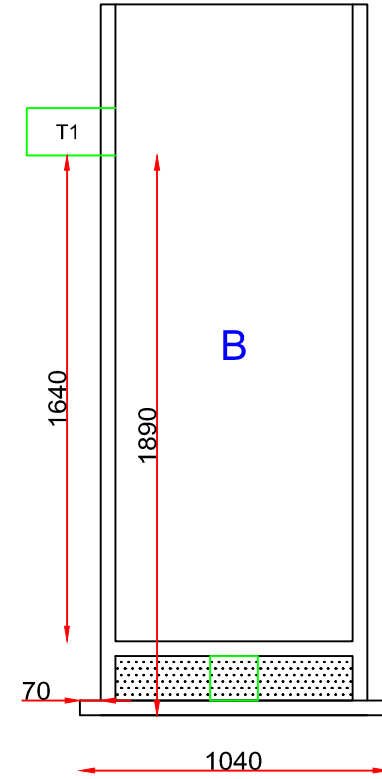
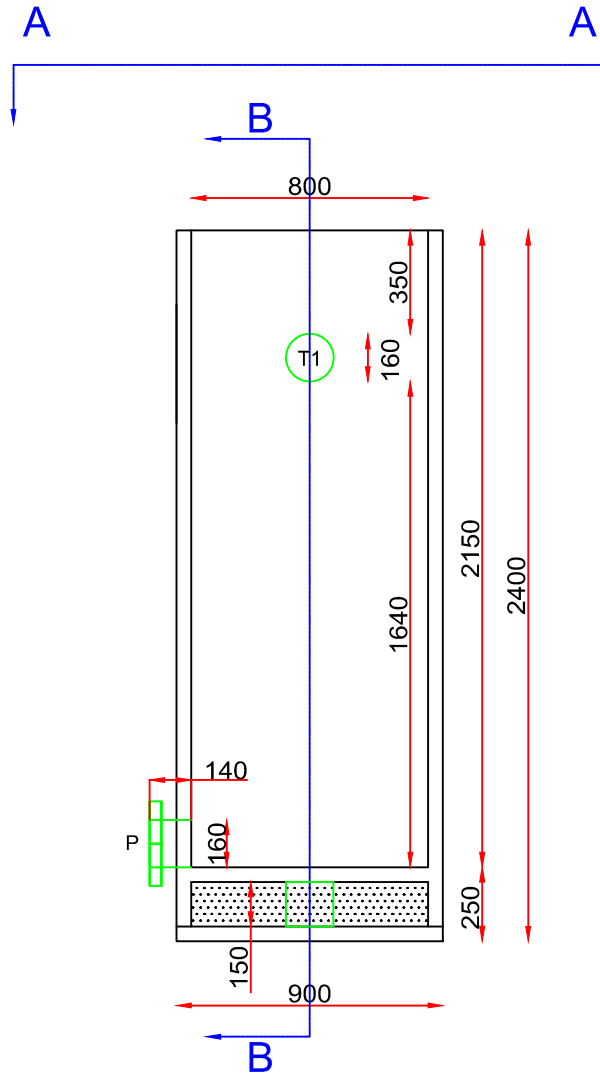
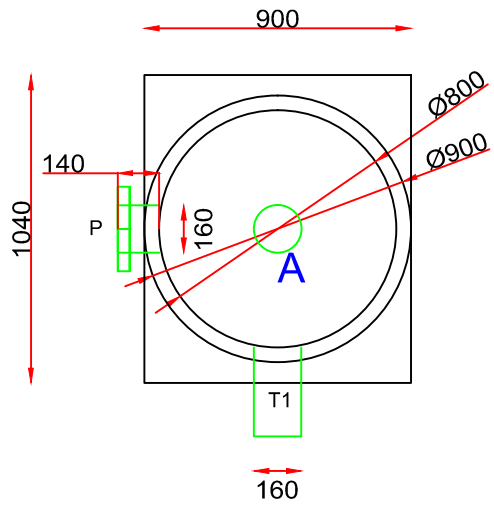
Vuoden 2014 alussa lähetettyjen tarjouspyyntöjen ja niihin tulleiden tarjousten perusteella tehtiin vertailua markkinoilla myytävien lamelliselkeyttimien hinnoista. Halvimmillaan ne ovat noin 10–12 000 euroa (alv. 0 %), vedenkäsittelykapasiteetin ollessa 10 m³/h. Halkaisijaltaan 3,0 m olevan kallistettavan putkiselkeyttimen materiaalikustannusten ollessa noin 15 000 euroa ja vedenkäsittelykapasiteetin ollessa ainakin 55 m³/h, voidaan todeta suuren mittakaavan putkiselkeyttimelle löytyvän markkinoilta varmasti kysyntää. Samalla tavalla myös muu pilot-laitteisto voidaan rakentaa suurempaan mittakaavaan, jolloin koko vedenkäsittelyprosessi kemikaloinnista selkeytykseen voitaisiin tarjota yrityksille yhtenä kokonaisuutena.

LÄHTEET

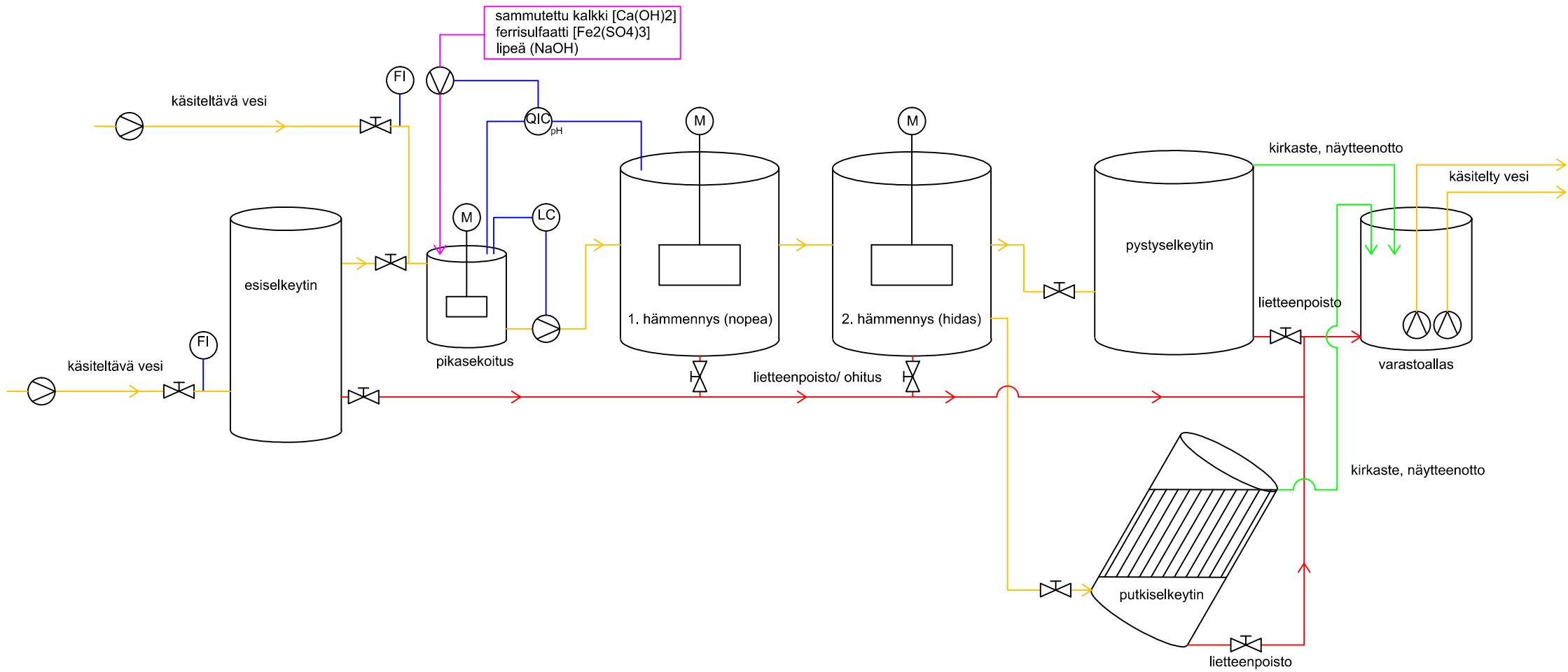
- AALTONEN, Riikka, ALAPASSI, Markus, KARHULA, Mervi, KARHUNEN, Eija, KORHONEN, Iikka, LOUKOLA-RUSKEENIEMI, Kirsti, NYBERGH, Paula, PELTONEN, Petri, UUSISUO, Maija. 2012. Suomen kaivosteollisuuden tilannekatsaus vuonna 2012 [verkkojulkaisu]. TEM-raportti 23/2012 [viitattu 2014-03-01]. Saatavissa: http://www.tem.fi/files/34066/TEMrap_23_2012.pdf
- ADVANCED WATER TREATMENT. Cyclone Separators [verkkoaineisto]. Polku: www-sivut, Products, Cyclone Separators, Read More. [Viitattu 2015-02-27]. Saatavissa: http://www.advancedwatertreatment.co.uk/cyclone_separators.html
- ASETUS AJONEUVON KÄYTÖSTÄ TIELLÄ 1992/1257, 24 §. Finlex. Lainsäädäntö. [Viitattu 2015-02-10.] Saatavissa: <http://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/1992/19921257#L1>
- ASETUS AJONEUVON KÄYTÖSTÄ TIELLÄ 1992/1257, 25 §. Finlex. Lainsäädäntö. [Viitattu 2015-02-10]. Saatavissa: <http://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/1992/19921257#L1>
- ASETUS AJONEUVON KÄYTÖSTÄ TIELLÄ 1992/1257, 47 §. Finlex. Lainsäädäntö. [Viitattu 2015-02-10]. Saatavissa: <http://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/1992/19921257#L1>
- ASETUS AJONEUVON KÄYTÖSTÄ TIELLÄ 1992/1257, 48 §. Finlex. Lainsäädäntö. [Viitattu 2015-02-10]. Saatavissa: <http://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/1992/19921257#L1>
- BRATBY, J. 2006. Coagulation and flocculation in water and wastewater treatment. 2. painos. Lontoo: IWA Publishing.
- BURNETT, Colin. A simple cyclone separator [digitaalinen kuva]. [Viitattu 2015-01-29]. Saatavissa: http://en.wikipedia.org/wiki/Cyclonic_separation#/media/File:Cyclone_separator.svg
- CEICSEP. Lamella clarifier schematic [digitaalinen kuva]. [Viitattu 2015-01-29]. Saatavissa: http://en.wikipedia.org/wiki/Lamella_clarifier#/media/File:Lamella_Clarifier_Schematic.png
- COLEMAN, Patrick, ESLER, John, HALLADEY, Lesley, JEYANAYAGAM, Samuel, MCCORQUODALE, J. Alex, PETTIT, Mark, REARDON, Roderick Jr., RICHARDSON, John, TEKIPPE, Rudy, VOUTCHKOV, Nikolay, WAHLBERG, Eric, WILSON, Thomas, ZHOU, Siping. 2005. Clarifier Design [verkkojulkaisu]. 2. painos. Water Environment Federation (WEF). Manual Practice, nro. FD-8 [viitattu 2014-01-10]. Saatavissa: http://www.researchgate.net/profile/Nikolay_Voutchkov/publication/271205949_Clarifier_Design/links/54c163820cf25b4b807221f8.pdf
- CRITTENDEN, John, TRUSSELL, R. Rhodes, HAND, David, HOWE, Kerry ja TCHOBANOGLIOUS George. 2012. MWH's Water Treatment: Principles and Design. 3. painos. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, Inc.
- DE CLERCQ, B., KINNEAR, D.J., VANROLLEGHEM, P.A. 2002. Hydraulic characterization of a wastewater treatment clarifier by an acoustic doppler current profiler [verkkojulkaisu]. Ghent University. Biomath. [Viitattu 2015-01-10]. Saatavissa: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.15.2195&rep=rep1&type=pdf>
- GC3 SPECIALITY CHEMICALS, INC. Clarification [verkkoaineisto]. Polku: www-sivut, Tech Info, Technical Manual, GC3 Technical Manual: Clarification. [Viitattu 2015-01-29]. Saatavissa: <http://www.gc3.com/Default.aspx?tabid=89>
- HEADWORKS BIO. Tertiary filtration [verkkojulkaisu]. Headworks International. [Viitattu 2015-01-29]. Saatavissa: <http://www.headworksinternational.com/biological-wastewater-treatment/tertiary-filtration.aspx>
- HEIDERSCHIEDT, Elisangela. 2011. Chemical purification of peat harvesting runoff water. Oulun yliopisto. Prosessi- ja ympäristötekniikan koulutusohjelma. Maisterin opinnäytetyö. [Viitattu 2015-01-13]. Saatavissa: <http://www oulu.fi/poves/pages/publ/dipl/elisangelah.pdf>
- HUTTUNEN, Janne 2015-01-07. [Digitaaliset kuvat]. Sijainti: Kuopio: Tekijän sähköiset kokoelmat.

- INVESTING.COM. Kuparin yleiskatsaustaulukko kuukausittain [verkkoaineisto]. Fusion Media Ltd. [Viitattu 2015-01-28]. Saatavissa: <http://fi.investing.com/commodities/copper>
- JORSUN SEPARATION TEC. High efficient inclined plate Lamella clarifier [Slaughter wastewater treatment] [verkkoaineisto]. [Viitattu 2015-01-29]. Saatavissa: http://jorsun.en.alibaba.com/product/355972966-220812169/High_efficient_inclined_plate_Lamella_clarifier_Slaughter_wastewater_treatment_.html
- KAWAMURA, Susumu. 2000. Integrated Design and Operation of Water Treatment Facilities. New York: John Wiley and Sons Ltd. [Viitattu 2015-02-15].
- LUUKKONEN, Tero, RÄMÖ, Jaakko. 13.–14.4.2012. Koagulaatio ja flokkaus osana vedenkäsittelyä [verkkojulkaisu]. Kemian opetuksen päivät. [Viitattu 2015-01-25]. Saatavissa: http://ouluma.fi/wp-content/uploads/2012/04/koagulaatio_ja_flokkaus_osana_vedenk%C3%A4sittely%C3%A4.pdf
- NELIVETOA.FI. Kuorman sitominen kuormaliinalla [verkkoaineisto]. [Viitattu 2015-02-27]. Saatavissa: <http://www.nelivetoa.fi/2014/03/kuorman-sitominen-kuormaliinalla/>
- PAJULA, Pasi 2015-02-04. Yliopettaja. [Haastattelu]. Kuopio: Savonia-ammattikorkeakoulu.
- RETSJA, Liis. 2012. Kalvojen käyttö erittäin happamissa olosuhteissa. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. Teknillinen tiedekunta. Kemiantekniikan koulutusohjelma. Membraanitekniikan ja teknillisen polymeerikemian laboratorio. Kandidaatintyö. [Viitattu 2015-01-29]. Saatavissa: <http://urn.fi/URN:NBN:fi-fe201205295632>
- RÄNKMAN, Esa. 2010. Tekopohjavesiprosessin tarkastelu ja kehittäminen Nokian vesilaitoksella. Tampereen teknillinen yliopisto. Ympäristö- ja energiatekniikan koulutusohjelma. Diplomityö. [Viitattu 2015-03-18]. Saatavissa: http://www.vvy.fi/files/1179/DI-tyo_Rankman.pdf
- SALEM, Ahmed Ibrahim. 2012. On fluid dynamics of lamella separator modelling and process optimisation. Bremenin yliopisto. Tuotantotekniikan osasto. Tekniikan tohtorin tutkinto. [Viitattu 2015-01-30]. Saatavissa: <http://elib.suub.uni-bremen.de/edocs/00102614-1.pdf>
- TARVAINEN, Mika. 1999. Impedanssitomografian mallintaminen sisäisille virtalähteille. Kuopion yliopisto. Luonnontieteiden ja ympäristötieteiden tiedekunta. Sovelletun fysiikan laitos. Pro Gradu - tutkielma. [Viitattu 2015-02-08]. Saatavissa: <http://venda.uef.fi/~mtarvain/gradu.pdf>
- VESIHUOLTO II: RIL 124-2-2004. Helsinki: Suomen Rakennusinsinöörin Liitto RIL ry.
- WISER. Wiser – sykloni [verkkoaineisto]. Polku: www-sivut, Animaatiot, Wiser – sykloni. [Viitattu 2015-03-18]. Saatavissa: <http://www.wiser.fi/sivu.php?id=41>
- WISNIEWSKI, Emilia. 2013. Sedimentation tank design for rural communities in the hilly regions of Nepal [verkkojulkaisu]. Journal of Humanitarian Engineering (2), nro. 1 [viitattu 2015-03-01]. Saatavissa: <http://www.ewb.org.au/jhe/index.php/jhe/article/download/15/15>
- ZHANG, Zhong-guo, CHEN, Zhao-yang, LI, Yan-zhong, FAN, Jing-hua, FAN, Bin, LUAN, Zhao-kun, LU, Dao-qiang. 2006. Performance of a novel vertical-flow settler: a comparative study [verkkojulkaisu]. Journal of Environmental Sciences (2), nro. 5 [viitattu 2014-03-01]. Chinese Academy of Sciences. Research Center for Eco-Environmental Sciences. State Key Laboratory of Environmental Aquatic Chemistry. Peking. Saatavissa: http://www.jesc.ac.cn/jesc_cn/ch/reader/create_pdf.aspx?file_no=20060505

LIITE 1



LIITE 2





SAVONIA

Savonia-ammattikorkeakoulu
www.savonia.fi

LIITE 3

Kemiallisen vedenpuhdistamon kalkinsyötön optimointi - Raportti

Savonia-ammattikorkeakoulu / Yara Oyj

projekti-insinöörit

Janne Huttunen ja Jussi Pulliainen

Ympäristötekniikan opetus- ja tutkimusyksikkö



Sisältö

1	Tausta ja tavoitteet	1
2	JAR - kokeet	2
2.1	JAR – kokeiden toteutus	2
2.2	JAR – Tulokset	4
2.2.1	Koesarja 1	4
2.2.2	Koesarja 2	6
2.2.3	Koesarja 3	8
3	Pilot kokeet	10
3.1	Pilot kokeiden toteutus	10
3.2	Pilot kokeiden tulokset	13
4	Johtopäätökset	14
4.1	JAR- kokeiden johtopäätökset	14
4.2	Pilot kokeiden johtopäätökset	16

1 Tausta ja tavoitteet

Tämä raportti on yhteenveto heinä - lokakuussa 2014 suoritetuista Yara Oyj:n Siilinjärven tehtaan kemiallisen vedenpuhdistamon kalkkisyötön optimointikokeista. Kokeiden tarkoituksena oli optimoida tehtaalla käytettävää kalkkisaostusprosessia fosforin poistossa jätevedestä. Kokeet koostuivat laboratoriomittakaavan panoskokeista sekä pilot-mittakaavan kenttäkokeista.

Panoskokeilla, eli JAR-kokeilla määritettiin fosforin poiston kannalta optimaalinen kalkin annostelu sekä viipymääjat pikasekoitus-, hämmennys- ja laskeutusvaiheissa. Lisäksi tutkittiin pikasekoituksen ja hämmennyksen sekoitustehokkuuden vaikutusta fosforin poistotehokkuuteen. JAR-kokeiden tuloksia käytettiin pilot-mittakaavan kenttäkokeiden laitteiston ohjearvoina. Pilot-kokeiden tarkoituksena oli todentaa laboratoriomittakaavan tulosten toimivuus kentällä suoraan käsiteltävään veteen jatkuvatoimisessa prosessissa.

Kokeiden toteutuksesta ja raportoinnista vastasivat projekti-insinöörit Jussi Pulliainen ja Janne Huttunen Savonia-ammattikorkeakoulun Ympäristötekniikan TKI- yksiköstä.

2 JAR - kokeet

2.1 JAR – kokeiden toteutus

JAR – kokeet, eli panoskokeet suoritettiin Kuopiossa Savonia-ammattikorkeakoulun Ympäristötekniikan vesilaboratoriossa heinä- ja syyskuussa 2014. JAR – koesarjassa tutkittiin kalkkisaostuksen optimointia fosforin poistoon Yaran kemialliselle vedenpuhdistamolle tulevalle jätevedelle. Tutkittavana oli jätevesijakeita kolmesta erilaisesta skenaariosta. Nämä kolme tilannetta olivat:

1. jätevesi ilman tehtaan neutralointivesiä ja ilman sadevesiä,
2. jätevesi jossa tehtaan neutralointivedet mukana ja ilman sadevesiä, sekä
3. jätevesi ilman tehtaan neutralointivesiä sateen aikaan.

Näytteet tuotiin Siilinjärven Yaralta 30 litran pulloissa suoraan Savonian vesilaboratoriolle. Ennen JAR- kokeita jokaisesta näytteestä analysoitiin seuraavat parametrit lähtötason määrittämiseksi:

- sameus
- väri
- kokonaisfosfori
- pH ja johtokyky
- alkaliteetti
- kiintoaine
- sulfaatti

Lähtötason määrittämisen jälkeen jokaisesta näytteestä tehtiin 30 erilaista panoskoetta. JAR-laitteisto koostuu kuudesta (6) 1 000 ml näyteastiasta, eli panoksesta, joissa on ohjelmoitava sekoituslaitteisto. Sekoituslaitteistolle voidaan ohjelmoida eri saostusprosessia kuvaavat vaiheet läpikäytäväksi; pikasekoitus, hämmennys sekä laskeutus. Jokaiselle vaiheelle voidaan säätää erikseen sekoittimen kierrosnopeus sekä toiminta-aika. Kokeissa haarukoitiin optimaaliset arvot jokaiselle muuttujalle erikseen fosforinpoistisuuden aleneman ollessa optimiarvon määräävä tekijä. Kuvassa 1 on havainnollistettuna JAR- laitteisto koeajon aikana. JAR- kokeissa näytevedestä tutkittiin:

- eri kalkkiannosten pH:n nostokykyä
- eri kalkkiannosten fosforinpoistokykyä
- pikasekoitusajan ja – nopeuden vaikutusta fosforinpoistotehokkuuteen
- hämmennysajan ja – nopeuden vaikutusta fosforinpoistotehokkuuteen, sekä
- laskeutusajan vaikutusta fosforinpoistotehokkuuteen

Kokeissa käytetty kalkki oli Nordkalk Oy Ab:n sammutettua kalkkia tuotenimeltään *Nordkalk SL*. JAR – kokeen jälkeen käsitellystä vedestä otettiin näyte josta analysoitiin vertailutuloksiksi

- Sameus
- Kokonaisfosfori
- pH ja johtokyky
- Kiintoaine

JAR- kokeiden analyyseissa käytettiin taulukon 1 mukaisia menetelmiä ja standardeja.

Taulukko 1. JAR- kokeiden analyyseissä käytetyt menetelmät.

ANALYYSI	MENETELMÄ
pH	Käsimittari Hach HQ 40d
Sähkönjohtokyky	Käsimittari Hach HQ 40d
Lämpötila	Käsimittari Hach HQ 40d
Alkaliteetti	SFS 3005
Kokonaisfosfori	HACH Method 8190
Sameus	ISO Method 7027, Hach 2100N IS Turbidmeter
Kiintoaine	SFS 3037
JAR-Kokeet	Kemwater Flocculator 2000
Sulfaatti	HACH Method 8051



Kuva 1. Kemwater Flocculator 2000 JAR-laitteisto panoskokeiden aikaan. Kuvassa kolmannen koesarjan vesijae. (kuva: Jussi Pulliainen 2014)

2.2 JAR – Tulokset

2.2.1 Koesarja 1

Ensimmäinen JAR koesarja testattiin heinäkuussa 2014 jätevesijakeella, jossa ei ollut tehtaan neutralointivesiä, eikä sadevesiä mukana. Vedestä määritettiin lähtötaso, jonka jälkeen näytteestä tehtiin 30 panoskoetta viidessä eri osakoikkeessa. Yhden panoskokeen näytetilavuus oli 800 ml, joista otettiin kokeen jälkeen 200 ml näyte analysointia varten. Ensimmäisessä JAR- koesarjassa testattiin fosforin poistokyvyn tehokkuuden mittaamisessa seuraavia muuttujia

- Kalkkiannosta
- Pikasekoituksen nopeusgradienttia ja sekoitusaikaa
- Hämmennyksen nopeusgradienttia ja hämmennysaikaa

Lisäksi tutkittiin eri kalkkiannosten pH:n nostokykyä ja liukenemistä tutkittavaan veteen. Koesarjassa testattiin eri muuttujia taulukon 2 osoittamalla alueella, joista haarukoitiin optimiarvot fosforin poiston kannalta. Optimiarvot on esitettyinä taulukossa 3. Optimiarvoissa on huomioitava, että kokeessa testatuilla hämmennys- ja pikasekoitusajoilla ei ollut suurta merkitystä fosforin poiston kannalta. Taulukossa 4 on esitetty tutkitun vesijakeen lähtötaso sekä panoskoikkeilla saavutettu lopputaso parhaiten onnistuneen panoskokeen tuloksilla.

Taulukko 2. Ensimmäisessä JAR – koesarjassa testattu muuttuja-alue

Testattu alue	min	max	
Kalkkiannos	100	4000	g/m ³
Pikasekoitusaika	60	300	s
Gradientti (pika)	300	600	s ⁻¹
Hämmennysaika	10	40	min
Gradientti (häm.)	26,7	48	s ⁻¹

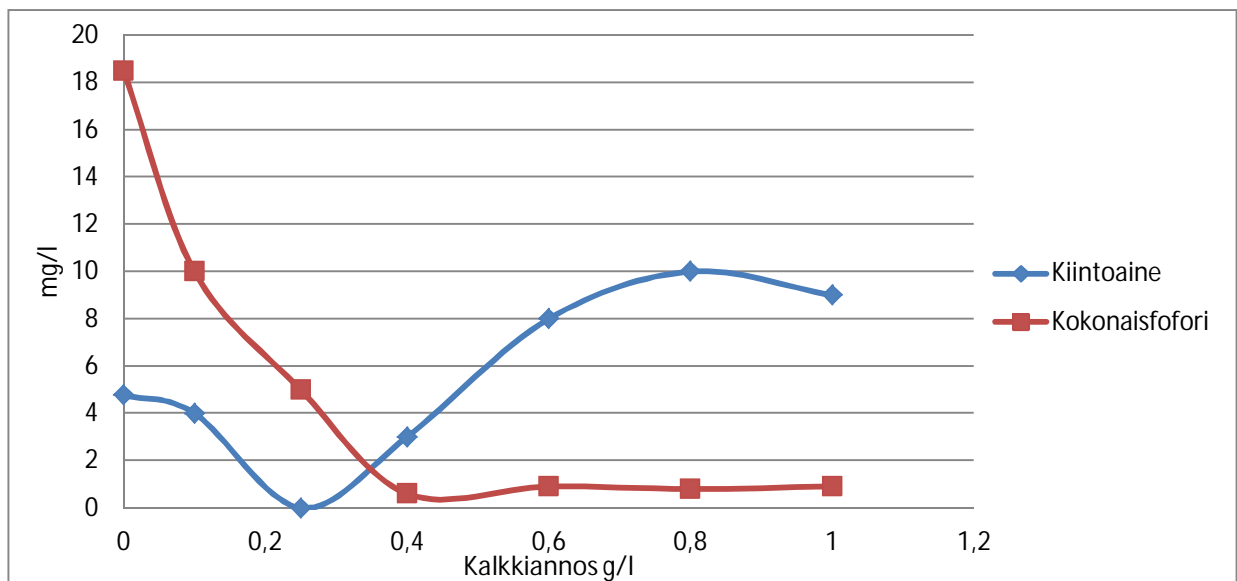
Taulukko 3. Ensimmäisen JAR – koesarjan optimiarvot fosforin poiston kannalta

Kalkkiannos	400 g /m ³
Pikasekoitusaika	60 s
Gradientti (pika)	300 s ⁻¹
Hämmennysaika	30 min
Gradientti (häm.)	26,7 s ⁻¹
Laskeutusaika	60 min

Taulukko 4. Ensimmäisen JAR - koesarjan näyteveden lähtötaso ja panoskoesarjalla saavutettu taso.

	Yksikkö	Lähtötaso	Saavutettu taso	Poisto %
Kiintoaine	mg/l	4,775	1	79,06
Sameus	NTU	4,35	0,413	90,51
Väri	PtCo	95,8		
Sulfaatti	mg/l	175		
pH		3,39	11,05	
Sähkönjohtavuus	uS/cm	1212	1125	
Lämpötila	°C	23		
Asiditeetti	mmol/l	3,12		
Mineraaliasiditeetti	mmol/l	1,52		
Kokonaisfosfori (P)	mg/l	18,5	0,1	99,46

Liitteessä 1 on koko koesarjan laboratoriopöytäkirja, jossa esitettynä koko koesarjan tulokset yksityiskohtaisesti. Koesarjan 1 tuloksissa on huomioitava kalkin liukeneminen vesijakeeseen. Kalkkiannoksen noustessa yli 0,6 g/l kalkki ei enää liuennut kokonaan vaan jäi osittain kiintoaineeksi veteen. Kuvassa 2 on havainnollistettu kiintoaineen ja kokonaisfosforin suhde kalkkiannokseen ensimmäisen JAR – koesarjan toisessa osakokeessa. Fosforin poistolle tarvittava kalkkiannos oli noin 0,4 g/l, mutta kiintoaineen määrä kasvaa mitä enemmän kalkkia jakeeseen käytti. Olennaista on saada liuotettua kaikki lisätty kalkki tehokkaasti veteen ja välttää kalkin liikasyöttöä.



Kuva 2. Kiintoaineen ja kokonaisfosforin määrä suhteessa kalkkiannokseen ensimmäisen JAR-koesarjan toisessa osakokeessa.

2.2.2 Koesarja 2

Toinen JAR – koesarja suoritettiin 2014 syyskuun lopulla. Tutkittava vesijae sisälsi tehtaan neutralointivesiä sateettomalta ajanjaksolta. Taulukkoon 5 on koottu toisessa JAR-koesarjassa testattu muuttuja-alue. Erona ensimmäiseen sarjaan on maksimikalkkiannoksen pienentäminen ja pikasekoitus- sekä hämmennysajan lisääminen. Sekoitusajoissa testattiin pilot-laitteiston vaatimia aikoja, jolloin saatiin verrattavissa olevia arvoja pilot-kokeille.

Taulukko 5. JAR – koesarjassa 2. testatut alueet.

Testattu alue	min	max	
Kalkkiannos	100	1000	g/m ³
Pikasekoitusaika	60	563	s
Gradientti (pika)	300	600	s-1
Hämmennysaika	20	101	min
Gradientti (häm.)	26,7	48	s-1

Taulukkoon 6 on koottu toisen JAR- koesarjan perusteella saadut optimiparametrit fosforin poiston kannalta. Optimiarvot ovat samat kuin ensimmäisessä koesarjassa. Myös tässä koesarjassa huomattiin, että pikasekoitus ja hämmennysajalla ei ole suurta vaikutusta lopulliseen fosforipitoisuuteen. Taulukossa 7 on toisen koesarjan vesijakeen lähtötiedot ja koesarjan parhaiten onnistuneella panoskokeella saavutetut tulokset.

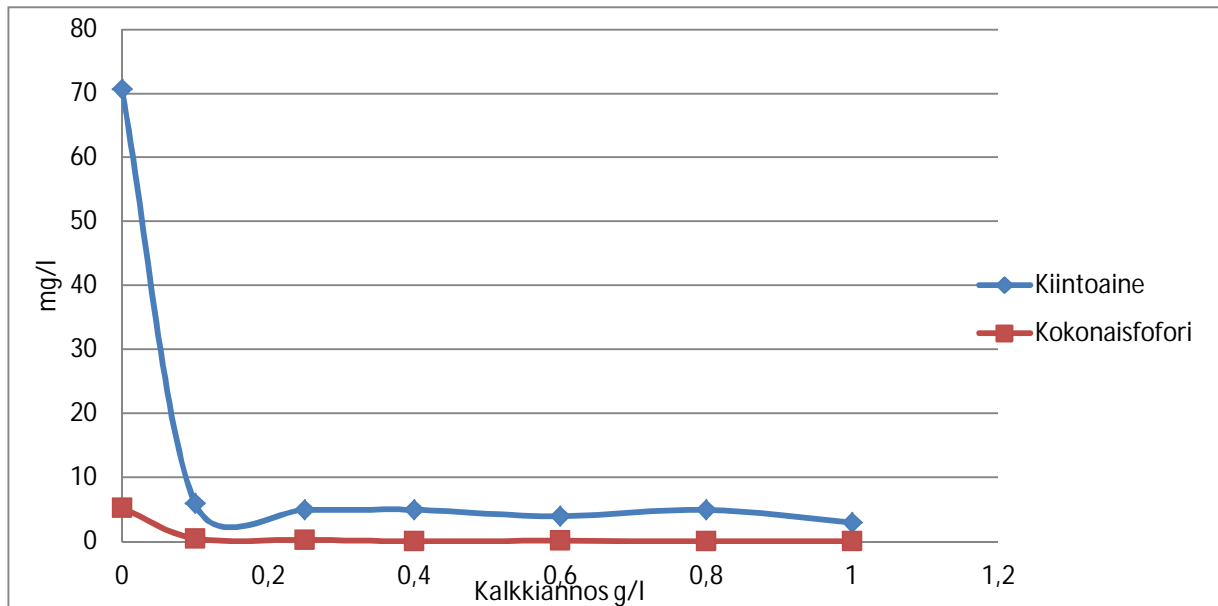
Koesarjan 2 vesi erosi koesarjan 1 vedestä merkittävästi. Vedessä oli huomattavasti enemmän kiintoainetta ja fosforipitoisuus oli pienempi. Lisäksi pH oli 10,21 kun ensimmäisen koesarjan vedessä se oli 3,39. Tässä koesarjassa kalkkiannosta ei tutkittu yli 1 g/l annoksella, johtuen ensimmäisen koesarjan tuloksista. Lisäksi koesarjassa huomattiin, että kalkki ei liuenut veteen niin hyvin kuin ensimmäisessä koesarjassa, vaan kasaantui liukenemattomana sekoittimien alle ennen laskeutusvaihetta. Tämä johtui veden pH:n lähtötasosta, joka estää kalkin liukenemisen veteen suuremmilla annostuksilla.

Taulukko 6. JAR – koesarjan 2. optimaaliset muuttujat fosforin poistoon.

Kalkkiannos	400 g /m ³
Pikasekoitusaika	60 s
Gradientti (pika)	300 s-1
Hämmennysaika	30 min
Gradientti (häm.)	26,7 s-1
Laskeutusaika	60 min

Taulukko 7. JAR – koesarjan 2. vesijakeen lähtötaso sekä koesarjalla saavutettu paras taso.

	Yksikkö	Lähtötaso	saavutettu taso	poisto %
Kiintoaine	mg/l	70,67	2	97,2
Sameus	NTU	26,3	3,95	85,0
Väri	PtCo	138		
Sulfaatti	mg/l	620		
pH		10,21	12,22	
Sähkönjohtavuus	uS/cm	1536	20	
Lämpötila	°C	22,3		
Alkaliteetti	mmol/l	2,74		
Fosfori (P)	mg/l	5,3	0,2	96,2



Kuva 3. Kiintoaineen ja kokonaisfosforin määrä suhteessa kalkkiannokseen toisen JAR – koesarjan ensimmäisessä osakokeessa.

Kuvassa 3 on toisen JAR- koesarjan ensimmäisen osakokeen fosforipitoisuuden ja kiintoaineen pitoisuus kalkkiannoksen suhteen. Kiintoainemäärän ollessa lähtökohtaisesti hyvin suuri, ei pitoisuuksien suhteesta pääse muodostumaan vastaavanlaista kuvaaja kuin ensimmäisessä JAR- koesarjassa. Liukenematon kalkki ei näy lopputuloksessa, koska laskeutusaika kokeissa oli liian pieni veden kiintoaineen laskeutukselle.

2.2.3 Koesarja 3

Kolmas tutkittava vesijae oli samanlainen kuin ensimmäinen, mutta vesisateiden aikaan otettu, eli jae ei sisältänyt neutralointivesiä. Erona ensimmäiseen vesijakeeseen oli myös se että, vedessä oli tehtaalta tulevia pasuttovesiä, jotka nostivat veden kiintoainepitoisuuden hyvin suureksi. JAR-koesarja tehtiin lokakuun alussa. Kolmannessa koesarjassa otettiin mukaan tarkasteltavaksi muuttujaksi laskeutusaika. Taulukossa 8 on kolmannessa JAR-koesarjassa testattu muuttuja-alue.

Taulukossa 9 on viimeisen JAR - koesarjan optimiarvot fosforin poiston kannalta. Optimiarvot eroavat ensimmäisen ja toisen koesarjan arvoista hiukan. Ensinnäkin fosforin poiston kannalta parempiin tuloksiin päästiin 1 g/l kalkkiannoksella. Optimaalinen pikasekoituksen nopeusgradientti oli suurempi kuin aikaisemmissa koesarjoissa. Lisäksi laskeutustajan lisäyksellä näytti olevan positiivinen vaikutus lopputulokseen. Taulukossa 10 on kolmannen JAR- koesarjan lähtöveden tiedot sekä parhaiten onnistuneen panoskokeen lopputulokset. Taulukosta voidaan havaita että lähtöveden kiintoainepitoisuus on huomattavan suuri.

Taulukko 8. Kolmannessa JAR- koesarjassa testattu muuttuja-alue.

Testattu alue	min	max	
Kalkkiannos	100	1000	g/m ³
Pikasekoitusaika	60	210	s
Gradientti (pika)	300	600	s ⁻¹
Hämmennysaika	30	60	min
Gradientti (häm.)	26,7	48	s ⁻¹

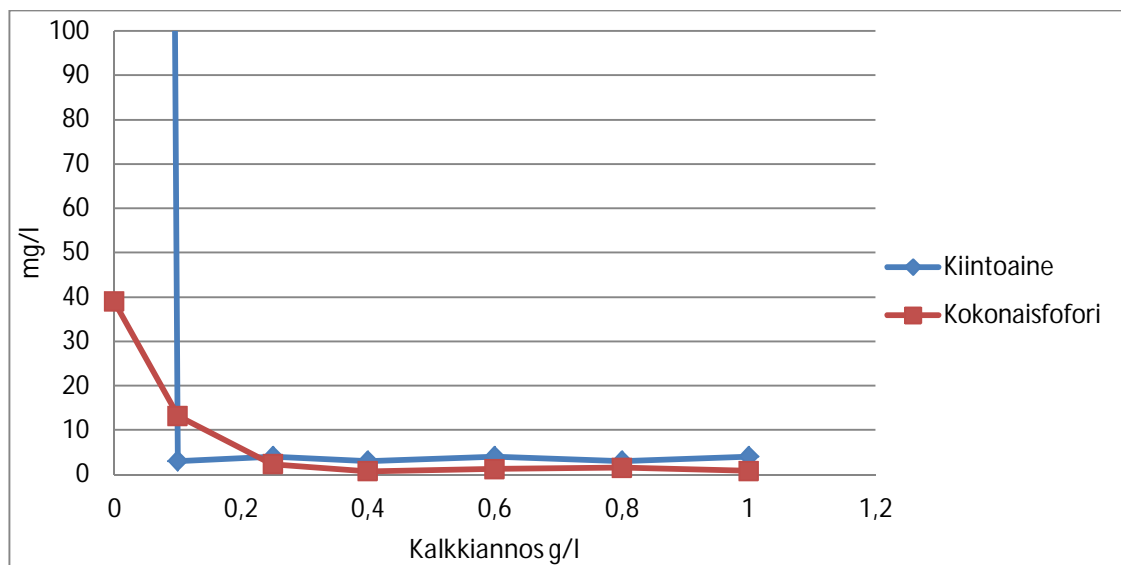
Taulukko 9. Kolmannen JAR- koesarjan optimiarvot fosforin poistoon.

Kalkkiannos	1000 g/m ³
Pikasekoitusaika	60 s
Gradientti (pika)	450 s ⁻¹
Hämmennysaika	60 min
Gradientti (häm.)	26,7 s ⁻¹
Laskeutusaika	120 min

Taulukko 10. Kolmannen JAR- koesarjan vesijakeen lähtötaso sekä parhaiten onnistuneella panoskokeella saavutettu taso.

	Yksikkö	Lähtötaso	saavutettu taso	poisto %
Kiintoaine	mg/l	2207	1	100,0
Sameus	NTU	534	1,94	99,6
Väri	PtCo	1610		
Sulfaatti	mg/l	470		
pH		3,24	12,14	
Sähkönjohtavuus	uS/cm	1945	3470	
Lämpötila	°C	13,5		
Asiditeetti	mmol/l	4,16		
Fosfori (P)	mg/l	39	0	100,0

Kuvassa 4 on kolmannen JAR- koesarjan ensimmäisen osakokeen kiintoaineen ja fosforin lopputaso eri kalkkiannoksilla. Kiintoaineen määrä oli lähtövedessä hyvin suuri ja sen laskeutuminen oli erittäin tehokasta, mikä näkyy loppukiintoaineen vähyytenä.



Kuva 4. Kolmannen JAR- koesarjan ensimmäisen osakokeen kiintoaineen ja kokonaisfosforin määrä eri kalkkiannoksilla.

3 Pilot kokeet

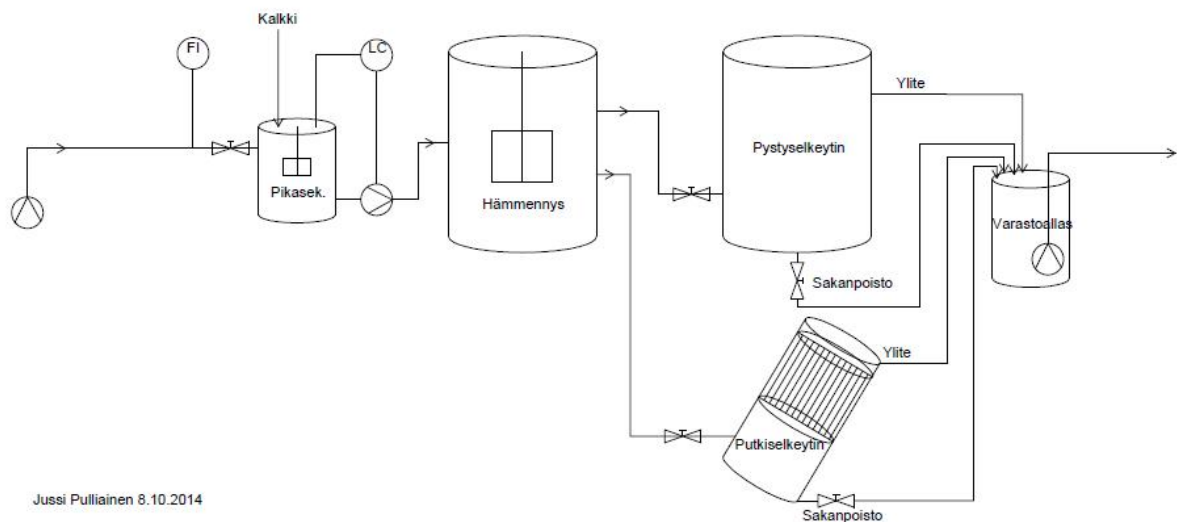
3.1 Pilot kokeiden toteutus

Kemiallisen vedenpuhdistamon kalkinsyötön pilot-koeajot toteutettiin 16. - 27.10.2014 välisenä aikana. Pilot- kokeiden tarkoituksena oli todentaa laboratoriokokeiden tulosten toimivuus pilot-mittakaavassa jatkuvalla virtaamalla.

Käsiteltävä vesi pumpattiin pilot-laitteistoon ennen kemiallista puhdistamaa sijaitsevasta vesilinjasta pikasekoitusaltaaseen. Annosteltava jauhemainen kalkki syötettiin pikasekoitusaltaan yläosasta sisään ruvikuljettimen avulla ja sieltä vesi pumpattiin edelleen hämmennysaltaaseen. Kalkin annosteluna käytettiin JAR-kokeissakin testattuja arvoja:

- 0,25 g/l
- 0,4 g/l
- 1,0 g/l.

Hämmennysaltaasta vesi jaettiin kahdella linjalla virtaamaan puoliksi sekä pysty-, että putkiselkeyttimeen. Tasainen virtaus molempiin selkeyttimiin säädettiin niiden yliteputkien korkoja säätämällä ja mittaamalla molempien ylitteiden virtausta. Laitteiston läpivirranut vesi pumpattiin varastoaltaasta viereiseen uomaan, jonne kemiallisen puhdistamon vedet laskevat. Kuvassa 5 on esitettyä Pilot - prosessi kokonaisuudessaan.



Kuva 5. Pilot kokeiden prosessikokonaisuus.

Käsiteltävän veden viipymä laitteistossa riippui virtaaman Q suuruudesta. Koeajojen virtaamat olivat n. 1,6 m³/h, 3,2 m³/h ja 6,0 m³/h. Pikasekoitusaltan vesitilavuuden ollessa n. 0,15 m³, hämmennys- ja pystyselkeytysaltan molempien ollessa n. 2,74 m³ ja kallistetun putkiselkeyttimen ollessa 0,84 m³, saatiin eri koeajoille laskettua viipymät taulukon 11 mukaisesti.

Taulukko 11. Pilot-laitteiston viipymät vaiheittain.

virtaus Q (m ³ /h)	Pikasekoitus (min)	Hämmennys (min)	Pystyselkeytys PS (min)	Tehoselkeytys TS (min)
1,6	5,6	103	206	63
1,7	5,3	96,7	193,4	59,3
3,2	2,8	51,5	103	31,5
6	1,5	27,4	55	17

Koeajot mitoitettiin kestävästi jokaisen kokeen osalta aina vähintään kaksi kertaa laitteiston koko viipymän verran. Näin pystyttiin varmistamaan siitä, että vesimassa on varmasti vaihtunut koko laitteiston matkalta ainakin kertaalleen. Jokaisen koeajon lopussa analysoidavat vesinäytteet otettiin kahteen kertaan kolmesta eri pisteestä:

- ennen laitoksen kemiallista puhdistusta (EKP)
- pystyselkeyttimestä (PS)
- kallistetusta putkiselkeyttimestä (TS = tehoselkeytin).

Toiset näytteet toimitettiin Yara:n laboratorioon fosforianalyysjä varten ja toiset vietiin Savonian vesilaboratorioon kiintoaineen ja sameuden määrittämistä varten. Näytteenottojen yhteydessä mitattiin samalla veden pH, sähkönjohtokyky ja lämpötila. Tämän jälkeen laitteisto tyhjennettiin vedestä ennen seuraavaa koetta. Kuvassa 6 on esitetty hämmennysallas ja pystyselkeytin kokeiden aikana toiminnassa.



Kuva 6. Pystyselkeytin (vas.) ja hämmennysallas (oik.) toiminnassa koeajoissa.

3.2 Pilot kokeiden tulokset

Taulukko 12. Pilot-ajojen tulokset, jossa sinisellä pohjalla on tehonselkeyttimen (TS) tulokset ja valkealla pohjalla pystyselkeyttimen (PS) tulokset.

Q (m ³ /h)	kalkki (g/l)	Pika- sekoitus (min)	Hämmen- nys (min)	Selkey- tys (min)	pk (m/h)	KA poisto- %	sameus poisto- %	fosfori EKP (mg/l)	fosfori loppu (mg/l)	fosfori poisto- %	pH EKP	pH loppu
1,7	0,25	5,3	96,7	59,3	0,93	48,1	75,3	3,6	0,11	96,9	9,9	11,88
1,7	0,25	5,3	96,7	193,4	0,55	28,6	73,2	3,6	0,14	96,1	9,9	11,76
1,7	0,4	5,3	96,7	59,3	0,93	30,8	17,8	4	0,079	98	8,92	11,9
1,7	0,4	5,3	96,7	193,4	0,55	59,2	26,7	4	0,23	94,3	8,92	12,03
1,6	1	5,6	103	63	0,88	59,1	37,8	3,8	0,12	96,8	9,74	12,26
1,6	1	5,6	103	206	0,52	50,9	47,8	3,8	0,14	96,3	9,74	12,28
3,2	0,25	2,8	51,5	31,5	1,76	-17,4	34,6	5,4	0,56	89,6	9,1	11,58
3,2	0,25	2,8	51,5	103	1,04	-11,5	5,7	5,4	0,5	90,7	9,1	11,61
3,2	0,4	2,8	51,5	31,5	1,76	3,6	43,4	4,4	0,39	91,1	9,62	11,85
3,2	0,4	2,8	51,5	103	1,04	-43,9	30,1	4,4	0,22	95	9,62	11,91
3,2	1	2,8	51,5	31,5	1,76	72,7	57,8	8,9	0,087	99	8,91	12,27
3,2	1	2,8	51,5	103	1,04	81,1	73,3	8,9	0,13	98,5	8,91	12,27
6	0,25	1,5	27,4	17	3,3	9,5	24,8	3,9	0,43	89	9,51	11,48
6	0,25	1,5	27,4	55	1,95	-33,1	9	3,9	0,35	91	9,51	11,46
6	0,4	1,5	27,4	17	3,3	-7,5	61,5	2,7	0,19	93	9,94	11,86
6	0,4	1,5	27,4	55	1,95	-34,2	56,9	2,7	0,1	96,3	9,94	11,83
6	1	1,5	27,4	17	3,3	66,5	65,1	7,6	0,07	99,1	9,32	12,21
6	1	1,5	27,4	55	1,95	49,1	50,2	7,6	0,073	99	9,32	12,19

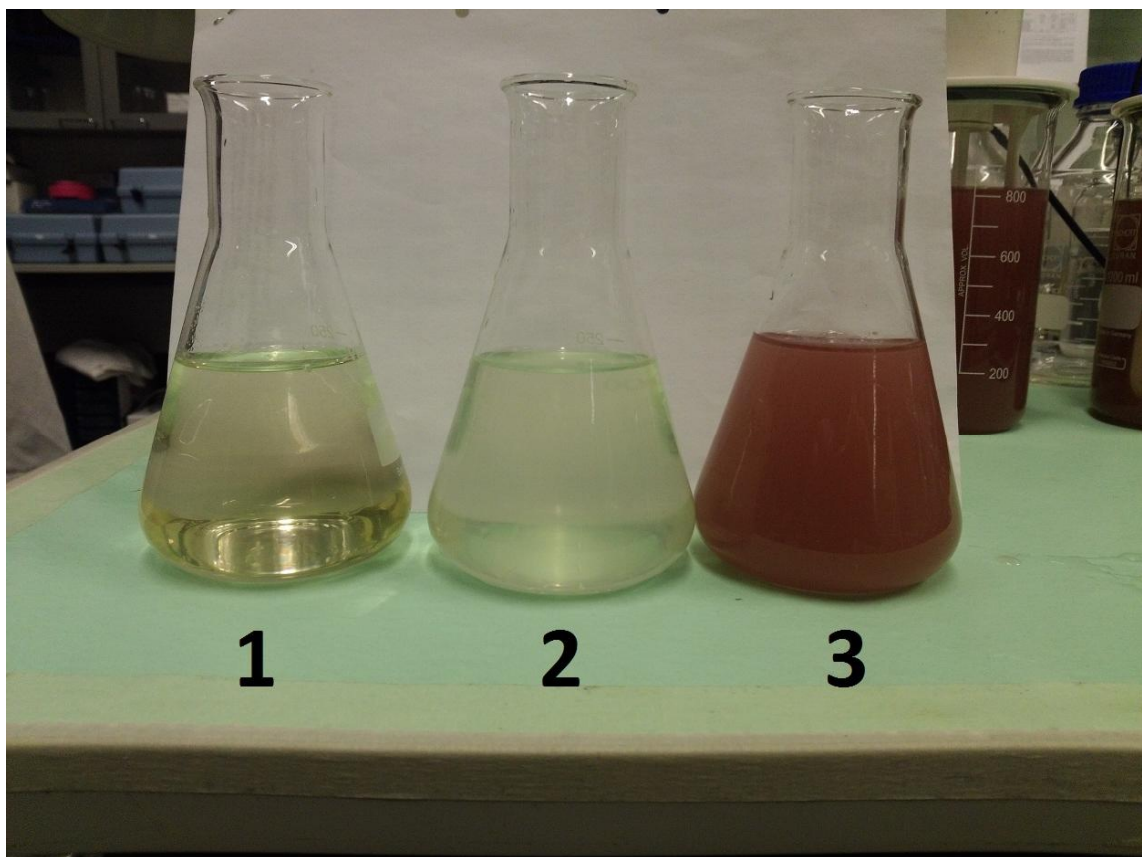
Edellä olevassa taulukossa (Taulukko 12) on esitetty tiivistetysti pilot-ajojen tulokset, jotka on jaoteltu allekkain kolmeen kategoriaan virtaaman mukaan. Tuloksia yleisesti tarkasteltaessa voidaan huomata, että hitaalla virtaamalla/ pienemmillä pintakuormilla kalkin annostuksen ollessa 0,4 g/l, päästään pilot-laitteistolla fosforin erotuksen osalta parhaisiin tuloksiin. Tämä vastaa JAR-kokeiden pohjalta saatuja tietoja. Kuitenkin kovemmilla virtaamilla, jolloin selkeyttimien pintakuormat kasvavat ja viipymä pienenee, kalkin annostuksena 1,0 g/l tuo parhaat tulokset fosforin poistossa.

Yleisenä ohjeena perinteisiä laskeutusaltaita mitoitettaessa on, ettei pintakuorman arvon tulisi ylittää 0,8 m/h. Pilot-ajoissa käytetyt pintakuormien (pk) arvot vaihtelivat kuitenkin 0,5 – 3,3 m/h välillä.

4 Johtopäätökset

4.1 JAR- kokeiden johtopäätökset

JAR- kokeiden vesijakeet erosivat toisistaan hyvin paljon. Kiintoainemäärä vaihteli välillä 5 – 2200 mg/l. pH vaihteli välillä 3,4 ja 10,3 riippuen oliko vedessä neutralointivesiä joukossa. Fosforitaso vaihteli 5 – 40 mg/l välillä ja sulfaattia vedessä oli 175 – 620 mg/l. Nämä vaihteluvälit edustavat kolmea yksittäistä näytettä, joten todellinen vaihteluväli voi olla suurempikin. Selvä kuitenkin on, että kemialliselle puhdistamolle tulevan veden laatu vaihtelee hyvin voimakkaasti ja aiheuttaa osaltaan vaihtelevuutta veden puhdistustulokselle kalkkisaostuksella. Taulukossa 13 on vesijakeiden analyysitulokset kootusti. Kuvassa 7 on JAR-koesarjoissa tutkitut vesinäytteet järjestyksessä vasemmalta oikealle.



Kuva 7. Ennen kemiallista puhdistamoa ilman neutralointia ja ilman sateita (1)
Ennen kemiallista puhdistamoa neutralointivedet mukana ilman sateita (2)
Ennen kemiallista puhdistamoa ilman neutralointia sateiden kanssa (3)

Taulukko 13. Kemialliselle puhdistamolle saapuvan jäteveden analyysitulokset.

		Ei neutralointia Ei sateita	Neutralointivedet Ei sateita	Ei neutralointia Sateet
Näytteenottopäivä		21.heinä	17.syys	29.syys
Analysointipäivä		22.heinä	18.syys	30.syys
Kiintoaine	mg/l	4,8	70,7	2207
Sameus	NTU	4,35	26,3	534
Väri	PtCo	95,8	138	1610
Sulfaatti	mg/l	175	620	470
pH		3,39	10,21	3,24
Sähkönjohtavuus	uS/cm	1212	1536	1945
Lämpötila	°C	23	22,3	13,5
Asiditeetti	mmol/l	3,12		4,16
Alkaliteetti	mmol/l		2,74	
Fosfori (P)	mg/l	18,5	5,3	39

JAR- kokeiden tuloksista voidaan havaita että fosforin poiston kannalta jo 0,4 g/l kalkkia käsiteltävässä vedessä riittää poistamaan lähes kaiken fosforin tehokkaasti. Ainoastaan kolmannessa koesarjassa, jossa fosforin lähtöpitoisuus ja kiintoainemäärä oli huomattavasti korkeampia, päästiin 1 g/l kalkkiannostuksella hieman parempiin lopputuloksiin. Fosforista saatiin kuitenkin jokaisesta vesijakeesta poistettua 0,4 g/l kalkkiannoksella 96,2 – 99,64 prosenttia. Kaikki JAR- kokeiden tulokset on koottu liitteeseen 1.

Ensimmäisen koesarjan kokonaisfosforin analyysituloksissa on huomioitava näytteiden suuri laimennussuhde, joka saattaa vääristää fosforipitoisuuden lopputuloksia. Käytetyllä fosforianalyysimenetelmällä pystytään mittaamaan vain noin 3,5 mg/l pitoisuuksiin asti joten suuremmat fosforipitoisuudet vaativat laimennoksen.

Ensimmäisen koesarjan kalkkiannosten vertailusta tehty kuva 2 osoittaa, että riittävällä kalkin annostelulla saadaan fosfori pois vesijakeesta, mutta liian suurella annoksella veteen jää liukenematonta kalkkia, joka päätyy lopulta saostusaltaan pohjalle. On siis syytä välttää turhan suurta kalkkiannostelua. Tämä ilmiö ei toistunut toisessa ja kolmannessa koesarjassa, kuten kuvista 3 ja 4 voidaan havaita. Näiden kokeiden kiintoainemäärä oli lähtökohtaisesti niin suuri, etteivät käytetyt kalkkiannokset näkyneet kiintoainepitoisuuksissa.

Koesarjassa 2, jossa pH oli lähtökohtaisesti yli 10, huomattiin että kalkki kertyi hämmennysvaiheessa sekoittimien roottorien alle kasaan eikä liuennut veteen samalla tavalla kuin ensimmäisessä ja kolmannessa sarjassa, jossa pH oli lähtökohtaisesti alle 4. Kalkki liukenee veteen vain tiettyyn pH arvoon asti, joten pH:n ollessa yli 10 on kalkin liukenemiskyky luonnollisesti pieni.

Pikasekoitus- ja hämmennysajoilla ei huomattu olevan suurta merkitystä lopputuloksen kannalta. Yhden minuutin pikasekoitus ja puolen tunnin hämmennysaika olivat riittäviä, jotta kaikki lisätty kalkki, joka kykeni reagoimaan veden kanssa, liukeni. Sekoitusnopeuksissa huomattiin, että hitaammat kierrokset paransivat lievästi lopputulosta. Pikasekoituksen optimaaliseksi nopeusgradientiksi valittiin 300 s^{-1} ja hämmennykselle $26,7 \text{ s}^{-1}$.

Laskeutusajalla oli suurempi vaikutus lopputulokseen kuin hämmennysajoilla ja sekoitusnopeuksilla. Kokeissa käytettiin oletuksena yhden tunnin laskeutusaikaa. Viimeisessä koesarjassa testattiin myös puolen tunnin ja kahden tunnin aikoja. Esimerkkinä lausketusajan vaikutuksesta osakoesarjat 2 ja 3, joissa testattiin laskeutusaikaa ja hämmennysnopeuksia, voidaan poimia panoskokeet 2/5, 3/3 ja 3/6, joiden lopputuloksista voidaan havaita loppusameus joka laskee tasaisesti laskeutusajan suurentuessa. Puolen tunnin laskeutuksella loppusameus on 2,69 NTU, tunnin laskeutuksella 2,31 NTU ja kahden tunnin laskeutuksella 1,94 NTU.

Lopullisina mitoitusparametreina voidaan JAR – kokeiden perusteella käyttää seuraava arvoja

- Kalkkiannos oletuksena $0,4 \text{ g/l}$, erikoistilanteissa annosta voidaan suurentaa aina maksimissaan 1 g/l asti, jos fosforipitoisuus ja kiintoainemäärä ovat huomattavan suuria
- Pikasekoituksen viipymä vähintään 60 s ja nopeusgradientti 300 s^{-1}
- Hämmennyksen viipymä vähintään 30 min ja nopeusgradientti $26,7 \text{ s}^{-1}$
 - Pikasekoituksen ja hämmennyksen viipymäajat ovat minimiarvoja, joilla kokeissa päästiin hyviin lopputuloksiin.
- Laskeutusaika 2 h .
 - kokeissa ei testattu pidempää laskeutusaikaa, mutta aikaa lisäämällä lopputulosta voidaan parantaa huomattavasti.

Edellä mainittuja parametreja käytettiin lähtökohtaisina mitoittajina pilot-kokeille.

4.2 Pilot kokeiden johtopäätökset

Pilot-koeajojen tulosten tarkkuuteen ja JAR-kokeiden vertailukelpoisuuteen vaikuttivat mm.

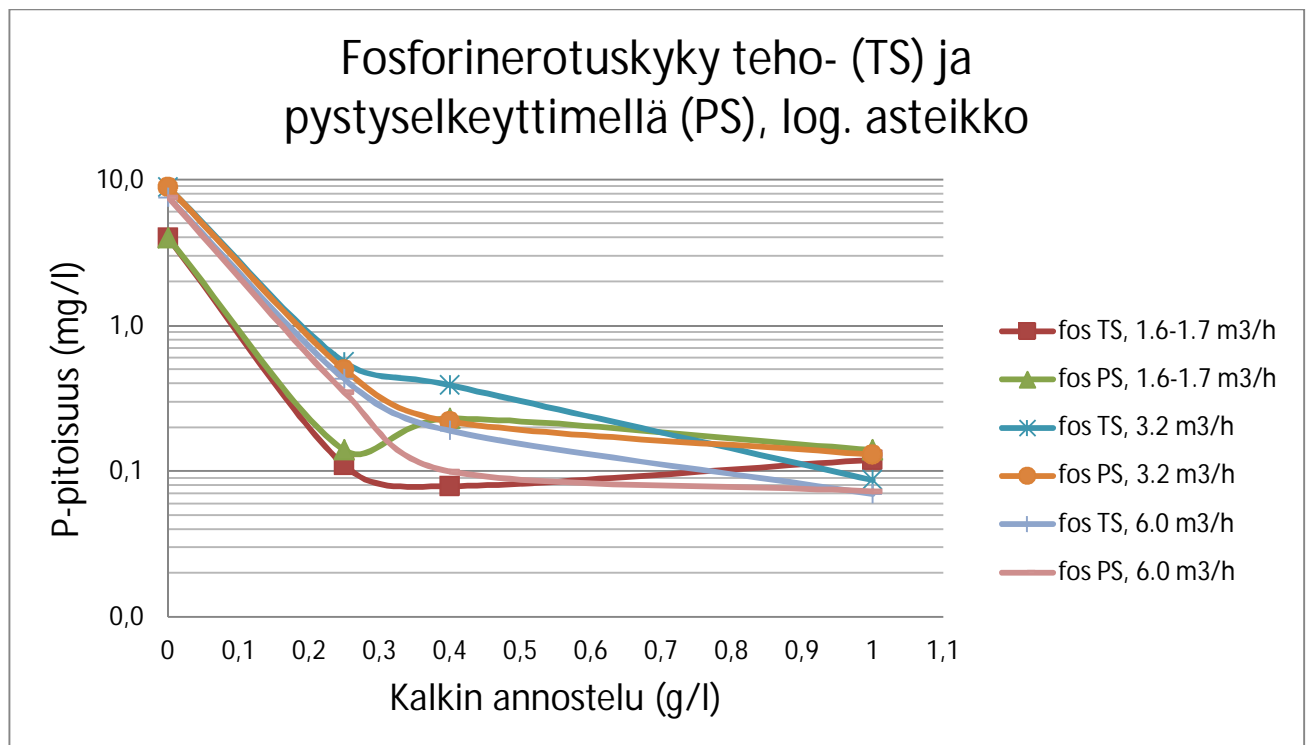
- pilot-laitteistolle virtaavan veden laadun vaihtelu,
- altaiden pohjalle kertyvä kiintoaines ja kalkki,
- hämmennysaltaan moottorin kierrosnopeus ja
- lähtöarvon (EKP) näytteenottoajankohta.

JAR - kokeiden vedet olivat ns. tasalaatuisia panoskokeita, jolloin käsiteltävän veden ominaisuudet eivät vaihdelleet kokeen aikana. Pilot - koeajoissa puolestaan veden laatu vaihteli hieman pitkän koetta, mistä todisteena on altaiden pohjalle kertyneessä sedimentissä oleva punertava kerros, joka vastaa kolmannen JAR - koesarjan vesierää. Tämä altaiden

pohjalle laskeutuva kiintoaines ja kalkki ei lähtenyt altaiden tyhjennysvaiheessa kokonaan pois, joten se saattaa osaltaan vaikuttaa JAR- ja pilot-kokeiden vertailun kelpoisuuteen. Toisaalta tällainen saostuma altaiden pohjalla kuvastaa paremmin todellista jatkuvatoimista puhdistuslaitteistoa.

Eräs tulosten analysointiin vaikuttavista tekijöistä on myös hämmennysaltaan kierrosnopeus ja sitä kautta käsiteltävään veteen kohdistuva hämmennysvaiheen G-arvo, joka kuvaa hämmentimen lavan veteen kohdistavaa voimaa, eli sekoituksen voimakkuutta. JAR-kokeista saaduista nopeusgradientin optimiarvoista laskimme hämmennysaltaaseen tarvittavan G-arvon ja muunsimme sen kierrosnopeuksiksi. Hämmennysallas saavutti ideaalisen kierrosnopeuden, kun määritimme moottorin taajuuden alimmilleen, 5 Hz:iin. Hämmennysaltaan moottori ei kuitenkaan kestänyt tätä pienintä taajuutta ja hajosi koeajojen alussa, jonka takia vaihdoimme tilalle identtisen moottorin ja säädimme pyörimisnopeutta ylöspäin. Tästä seurasi, että 6,3 rpm:n sijaan pyöritimme hämmennintä 13 rpm:llä, joka vastaa laitteistossa 10 Hz taajuutta.

Myös tulevan veden (EKP) lähtöpitoisuuden näytteenottohetki vaikuttaa osittain tuloksiin juuri vedenlaadun vaihtelun takia. EKP:n näyte otettiin samaan aikaan koeajojen päätteeksi, kuin selkeyttimien näytteet. Tarkemman vertailutuloksen olisi saanut ottamalla EKP:n näytteen ensin, jonka jälkeen selkeyttimien näytteet oltaisiin otettu pilot-laitteiston kunkin ajon viipymän verran myöhemmin. Toinen vaihtoehto olisi ollut ottaa EKP:n näyte kokoomänäytteenä, jolloin se olisi kuvastanut parhaiten käsitellyn veden ominaisuuksia.



Kuva 8 Pilot-laitteiston fosforin erotuskyky kallistetulla putkiselkeyttimellä (TS = tehonselkeytin) ja pystyselkeyttimellä (PS) logaritmisella asteikolla.

Kuvassa 8 on esitetty kootusti pilot-laitteiston koeajojen tulokset fosforin poistokyvyn osalta eri selkeyttimillä. Hitaimmalla virtaamalla ($Q = 1,6 - 1,7 \text{ m}^3/\text{h}$) on nähtävissä, että tehostetulla selkeytyksellä kalkin annostuksena $0,4 \text{ g/l}$ toimii paremmin fosforin erotuksessa kuin $1,0 \text{ g/l}$. Kuitenkin suuremmilla virtaamilla kuvaajasta huomataan, että kalkin annostuksena $1,0 \text{ g/l}$ tuo parhaan tuloksen fosforipitoisuuksien osalta.

Lopullisina suosituksina voidaan JAR-kokeiden ja pilot-ajojen perusteella sanoa seuraavaa:

- Oikein mitoitettu tasausallas ennen kemiallista puhdistusta takaisi pienemmät vaihtelut käsiteltävän jäteveden ominaisuuksissa ja virtaamassa
- Kalkkiannos oletuksena $0,4 \text{ g/l}$
 - kalkin syöttö tulisi sitoa jäteveden virtaamaan
 - erikoistilanteissa annosta voidaan suurentaa aina maksimissaan 1 g/l asti, jos fosforipitoisuus tai kiintoainemäärä on huomattavan suuri, eikä veden pH ole korkea
- Pikasekoituksen viipymä vähintään 60 s ja nopeusgradientti 300 s^{-1}
- Hämmennyksen viipymä vähintään 30 min ja nopeusgradientti $26,7 \text{ s}^{-1}$
 - Pikasekoituksen ja hämmennyksen viipymäajat ovat minimiarvoja, joilla kokeissa päästiin hyviin lopputuloksiin
 - Halutessaan tarkentavina tutkimuksina voisi laboratorio-olosuhteissa tutkia hämmennysvaiheessa muodostuneiden kiintoaineflokkien fosforipitoisuutta, ja selvittää, hajottaako selkeästi puolta tuntia pidempi hämmennysaika jo muodostuneet flokit jälleen pienemmiksi partikkeleiksi
- Laskeutusaika
 - pilot-kokeissa testatut laskeutusajat (viipymät) selkeyttimissä olivat $0,3 - 3,4 \text{ h}$
 - laskeutusaikaa edelleen lisäämällä lopputulosta voidaan parantaa.