



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO
TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

ANNAMAIJA ÅHMAN
PROSESSISUODATTIMEN AUTOMAATTISEN PESUMENETEL-
MÄN KEHITTÄMINEN

Diplomityö

Tarkastaja: professori Kari T.
Koskinen
Tarkastaja ja aihe hyväksytty
Teknisten tieteiden tiedekunnan tiede-
kuntaneuvoston kokouksessa 9. huhti-
kuuta 2014

Tiivistelmä

TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

Konetekniikan koulutusohjelma

ÅHMAN, ANNAMAIJA: Prosessisuodattimen automaattisen pesumenetelmän kehittäminen

Diplomityö, 39 sivua, 18 liitesivua

Heinäkuu 2014

Pääaine: Hydraulitekniikka

Tarkastaja: professori Kari T. Koskinen

Avainsanat: Suodatus, suodattimen pesumenetelmä, paine-ero, pesuteho, suodattimen puhtaus

Suodatinmarkkinat kasvavat vauhdikkaasti, sillä maailman väkiluvun kasvun ja tarkempien ympäristösäädösten myötä suodattamista tarvitaan yhä useammissa prosesseissa niin ihmisten kodeissa, julkisessa infrastruktuurissa kuin teollisuudessakin. Suodattamisella pyritään erottamaan väliaineesta epäpuhtauksia tai keräämään haluttuja partikkeleita talteen. Eräs merkittävä ongelma suodattamisessa liittyykin suodatinmateriaalin tukkeutumiseen. Tukkeutuminen aiheuttaa prosessissa paine-eron kasvua ja lopulta prosessi lakkaa toimimasta sille tarkoitetulla tavalla. Tämä voidaan ehkäistä puhdistamalla suodatin säännöllisesti, mutta manuaalisesti suoritettava puhdistus vaatii henkilötyöpanosta ja voi olla fyysisesti kuormittavaa. Tässä työssä on tutkittu suodattimen automaattista pesumenetelmää, jonka toteuttamiseen ei tarvita henkilötyöpanosta.

Työ koostuu kahdesta osasta. Ensimmäinen osa on kirjallisuusselvitys, joka perehtyy suodatusmarkkinoihin ja olemassa oleviin automaattisuodattimiin. Tämän lisäksi ensimmäisessä osassa perehdytään suodattamiseen yleisellä tasolla, sen lainalaisuuksiin ja teorioihin. Kirjallisuusselvitys perustuu kirjoihin, yritysten tuottamaan materiaaliin ja oppikirjoihin ja koulutusmateriaaleihin. Toinen osa käsittelee laboratoriotestit, niiden suoritustavat ja testien tulokset. Testien perusteella on laadittu kehitysehdotuksia tuotteen seuraavalle kehitysversioneille ja tuleviin testeihin.

Työn tavoitteena oli selvittää, toimiiko AF-12 automaattisuodattimen nykyisen kehitysversion pesutapahtuma niin hyvin, että sen avulla pystyy puhdistamaan tukkeutuneen suodattimen. Tämän selvittämiseksi tutkittiin kolmea suodatinkoria, joilla oli eri suodatusaste. Korit ajettiin tukkoon vesi-hiekka –liuoksella ja tukkeutumisen jälkeen ne pestiin suodattimen pesujärjestelmällä. Pesutulosta arvioitiin vertaamalla paine-erokäyriä ennen ja jälkeen käytön, tutkimalla suodattimista pesun aikana irronneen hiekan määrää sekä arvioimalla suodattimien puhtautta näönvaraisesti.

Tutkimusten lopputuloksena voidaan todeta, että pesutapahtuma toimii ja suodatin-korit puhdistuvat lyhyen käytön jälkeen hyvin. Testien jäljiltä jäi kuitenkin avoimeksi, miten pesujärjestelmä toimii pitkäjänteisessä käytössä. Tämän lisäksi kiinnostava jatkotutkimuskohde on selvittää miten pesujärjestelmä selviää erilaisista neste-partikkeli – yhdistelmistä.

Abstract

TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

Master's Degree Programme in Mechanical Engineering

ÅHMAN, ANNAMAIJA: Development of a Cleaning Method for a Self-Cleaning Automatic Strainer.

Master of Science Thesis, 39 Pages, 18 Appendix pages

July 2014

Major: Fluid Power Engineering

Examiner: Professor Kari T. Koskinen

Keywords: Filtration, Filter cleaning method, pressure drop, cleaning efficiency, filter cleanliness

The filtration market is growing rapidly as the world's population and ever increasing environmental regulations lead to situation where filtration is needed more and more, both in households, public infrastructure and industry. Generally, filtration is used either to separate impurities from the medium or to collect desirable particles from the medium. A major problem related to filtering is the clogging of filter media. Clogging causes the pressure difference to rise and eventually the process will stop working in the intended manner. This can be prevented by cleaning the filter media on a regular basis, but carried out manually cleaning requires personal effort and can be physically demanding. This study has examined an automatic cleaning process where no personal contribution is needed.

The work consists of two parts. The first part is a literature review where the focus is on global filtration markets as well as finding out about existing self-cleaning automatic filters and strainers. In addition, the first part looks into filtration in general, including the laws and theories of filtration. Literature review is based on books, information produced by companies, educational material and text books. The second part focuses on the laboratory tests, and results to those tests, that were performed on the AF-12 filter system.

The objective was to determine if cleaning method of AF-12 automatic filter works well enough to be able to clean a clogged filter. To determine this, three filter baskets of different filtration ratio were tested. Baskets were clogged running water-sand –solution through them and then washed with the cleaning system that was integrated in the filter. Washing results were assessed by comparing the pressure drop curves before and after use, measuring the sand that was removed from the filters during wash as well as evaluating the cleanliness of the filter basket visually.

After the tests it can be stated that the cleaning process is working and the filter baskets are clean after a short period of use. However, it remains unclear how the cleaning system works in longer periods of use. Also, an interesting follow-up study is to find out how the washing system works when the solution is something else than water-sand –mixture.

Alkusanat

Tämä diplomityö, *Prosessisuodattimen automaattisen pesumenetelmän kehittäminen*, on tehty yhteistyössä Tampereen teknillisen yliopiston kone- ja tuotantotekniikan laitoksen, Tuotekehitys Oy Tamlinkin ja Turun Asennusteam Oy:n kanssa. Työn tavoitteena on tutkia uutta prosessisuodattimen pesumenetelmää sekä sen jatkokehitysmahdollisuuksia.

Tämän diplomityön tekoa on ollut mahdollistamassa suuri joukko ammattilaisia. Eri-tyiskiitoksen ansaitsevat ohjaajani, projektipäällikkö Jussi Aaltonen kone- ja tuotantotekniikan laitokselta, jolta olen saanut erinomaista ohjausta ja tukea työn teon aikana, käyttöinsinööri Jarmo Ruusila, jonka apu laitteiston asennuksissa ja puruissa oli korvaamatonta sekä Vänni Alarotu, joka riensi apuun kun muut eivät päässeet. Kiitoksen ansaitsevat myös Turun Asennusteam Oy:n Heikki Tammelin sekä yrityksen muu henkilökunta, joka on osallistunut projektin eri vaiheisiin, sekä työni tarkastaja professori Kari T. Koskinen.

Suurkiitoksen osoitan myös äidilleni sekä appivanhemmilleni, jotka ovat lastenhoitoapuna olleet mahdollistamassa tämän työn valmistumisen.

Rakkaimmat kiitokset osoitan Nirolle ja Pinjalle. Olette tärkeimmät.

Herwannassa, heinäkuu 2014

Annamajja Åhman

annamajja.ahman@gmail.com

Sisällys

1.	Johdanto	1
2.	Prosessisuodatuksen automatisoinnin potentiaali ja merkitys	2
2.1.	Suodattamisen markkinat	2
2.2.	Markkinoilla olevia automaattisuodattimia.....	5
2.3.	Automaattisuodattimien yleisimmät käyttökohteet	7
3.	Suodatuksen teoriaa	9
3.1.	Suodatustekniikan- ja välineen valintaan vaikuttavat tekijät	10
3.2.	Partikkelin liike nesteessä ja kiinnitysmekanismit	11
3.3.	Pintasuodatus ja syväsuodatus	12
3.4.	Suodattimen läpäisevyys	12
3.5.	Suodattimen testausmenetelmät	15
4.	AF-12 automaattisuodattimen prototyyppi ja testausjärjestelyt	18
4.1.	Testausjärjestelmän rakenne	19
4.2.	Testausjärjestelmän toiminnan kuvaus	23
4.3.	Testauksen työvaiheet	23
4.4.	Testaussuunnitelma ja mitattavat asiat	24
4.4.1.	Paine-erokäyrä -testi.....	24
4.4.2.	Pesutehotestit	25
4.4.3.	Tukkeumatestit	25
4.5.	Puhtauden määrittämisen mittarit	26
5.	Laboratoriotestit ja niiden tulokset	27
5.1.	Suodatus- ja pesutestit	27
5.2.	Suodatinkoreille määritellyt paine-erokäyrät.....	33
5.3.	Visuaalisen tarkastelun tulokset	35
6.	Johtopäätökset ja kehitysehdotukset	38
	Lähteet	40

Merkinnät

Q	tilavuusvirta [m^3/h]
A	virtauspinta-ala [m^2]
μ	purkautumiskerroin
Δp	paine-ero [Pa]
ρ	nesteen tiheys [kg/m^3]

1. Johdanto

Teollisissa prosesseissa käytettäviltä nesteiltä, kuten työstökoneen työstönesteeltä tai paperinvalmistuksen kiertovesijärjestelmän vedeltä, odotetaan puhtautta ja tasalaatuisuutta, ja niiden siirtojärjestelmältä luotettavuutta. Kun järjestelmän suodatus on järjestetty oikein, saadaan prosessiin oikeanlaista nestettä, oikeaan aikaan. Suodatuksen yksi merkittävimmistä haasteista on kuitenkin suodattimen säännöllinen puhdistuksen tarve. Prosessisuodatinta voi tarvita puhdistaa useita kertoja päivässä, jolloin sen purkamiseen, kasaamiseen ja puhdistamiseen vaaditaan henkilöresursseja. Hyvin suurten järjestelmien ollessa kyseessä voi suodattimen puhdistamiseen tarvita useiden työntekijöiden panosta.

Tässä diplomityössä perehdytään prosessisuodattimen automaattisen pesumenetelmään ja etsitään jatkokehitystarpeita olemassa olevalle järjestelmälle. Työssä pyritään selvittämään miten suodatus vaikuttaa järjestelmän virtausominaisuuksiin. Lisäksi tutkitaan onko pesujärjestelmällä mahdollista saada riittävän hyvä pesutulos. Työn oheistuotoksena saadaan mitoitusdataa seuraavan prototyypin pyöritysmoottorin suunnittelua varten, mutta moottorin suunnittelua ei käsitellä tässä työssä. Lisäksi mittauksen aikana etsitään kehityskohteita nyt testattavana olevasta järjestelmästä, jotta seuraavien mittausten suorittaminen olisi helpompaa.

Työssä perehdytään aluksi suodattamisen nykyiseen markkinatilanteeseen ja olemassa oleviin teknisiin ratkaisuihin. Testausjärjestelmän pohjalta on luotu testaussuunnitelma, jonka avulla pystytään vastaamaan tutkimuskysymyksiin. Työn lopussa esitellään tehdyt testit, niistä saadut tulokset sekä näiden pohjalta määritellyt jatkotoimenpite-ehdotukset.

2. Prosessisuodatuksen automatisoinnin potenti- aali ja merkitys

Teollisissa prosesseissa käytettävät suodattimet ovat tärkeitä prosessin toiminnalle. Suodattamisella saadaan varmistettua, että prosessineste on laatustandardien mukaista ja että prosessi pysyy katkeamattomana. Esimerkkinä voidaan tarkastella luonnonvesien hyödyntämistä teollisissa prosesseissa. Vaikka luonnonvarannosta otetusta vedestä esi-suodatetaan lehdet, oksat ja muut suuret roskat ennen prosessiin pääsyä, jää siihen silti partikkeleita, joilla voi olla tuhoisia vaikutuksia komponentteihin. Näiden poistamiseksi vedestä tarvitaan tarkempi suodatus. Tukkeutunut suodatin tulee kuitenkin vaihtaa tai puhdistaa ja pintasuodattimille riittää usein puhdistus, jonka jälkeen suodatin voidaan ottaa uudestaan käyttöön.

Perinteisen manuaalisesti puhdistettavan suodatinyksikön ongelma piilee nimenomaan puhdistusvaiheessa, jolloin työntekijä kääntää virtauksen toiselle suodattimelle, purkaa suodatinpatruunan suodattimesta ja pesee sen painepesurilla. Tämän jälkeen suodatinpatruuna asennetaan takaisin paikalleen ja puhdistettu suodatin otetaan jälleen käyttöön, kun toinen suodatin asetetaan puhdistusvaiheeseen. Manuaalisessa puhdistusprosessissa tarvitaan työvoimaa, puhdistus on hidasta ja inhimillisten virheiden todennäköisyys kasvaa. Lisäksi purku- ja kasaamistyöhön tarvitaan työskentelytilaa, jolloin järjestelmän vaatiman lattiatilan määrä kasvaa.

Automaattinen, itsepuhdistuva suodatinjärjestelmä on mahdollista ohjelmoida toimimaan siten, että tiettyjen raja-arvojen täytyttyä se ohjaa virtauksen automaattisesti toiselle suodattimelle ja käynnistää likaisen suodatinpatruunan pesusyklin. Näin työntekijälle jää työn suorittajan sijaan valvojan rooli ja puhdistukseen vaadittava aika ja inhimillisen virheen mahdollisuus pienenee. Automaation kautta saadaan myös helposti kerättyä talteen kunnossapitodataa, jolloin järjestelmän vikaantumista ennustavia merkkejä pystytään seuraamaan systemaattisemmin.

2.1. Suodattamisen markkinat

Suodattaminen liittyy likipitään kaikkeen teolliseen, kotitalouksien ja kaupalliseen toimintaan jollain tavalla. Markkinat ovat hajanaiset, sillä toimijoita on tuhansia, samoin kuin erilaisia sovelluksia ilman, kaasun ja veden suodattamiseen. Tuotteiden teknologiat ovat hyvin erilaisia ja suodatuksen taso vaihtelee hiekan jyvistä bakteereihin. Tuoteapplikaatioita on mm. tuotantoprosessien kehittämiseen, lääketeollisuuden kehittämiseen ja tuotantoon, turvallisen juomaveden ja puhtaan sisäilman tuotantoon, jäteveden ja teollisuusnesteiden kierrätykseen, moottorien, polttoainejärjestelmien ja teollisuuden laitteiden vikaantumiselta suojelemiseen. [1]

Suodatinmarkkinoiden maailmanlaajuinen arvo on vuonna 2014 arviolta 77,3 miljardia euroa. Markkinat kasvavat vauhdikkaimmin Kiinassa, Intiassa ja Etelä-Amerikassa. Tälle kasvulle on useita merkittäviä syitä: maailman väkiluvun kasvu ja teollisuuden

lisääntyminen, ympäristösäädösten tiukkeneminen ja vahvistuminen, suodatinsovellusten leviäminen kaikenlaisille loppumarkkinoille, tietoisuuden leviäminen suodatuksen merkityksestä sekä useat kuluttajabrändit. [1; 2]

Suodatinmarkkinoilla on kasvun lisäksi tapahtunut paljon liikehdintää yritysostojen ja uusien toimijoiden myötä. Tähän kehitykseen on ollut merkittävänä vaikuttimina mm.

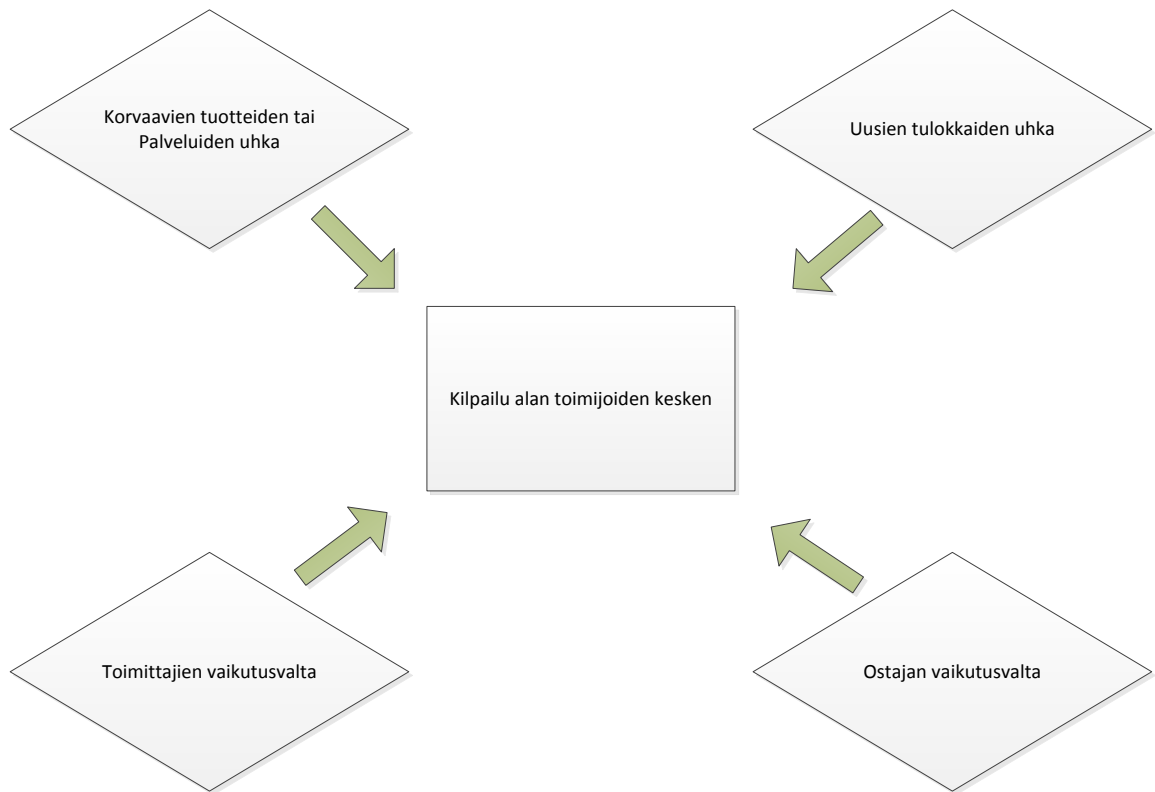
- Monipuoliset kasvutekijät
- Jakautuneet kohdemarkkinat ja maantieteelliset alueet
- Korkean marginaalin kulutustavaroista sekä näiden jälkimarkkinoista syntyvä korkea tuottoprosentti
- Suodatinjärjestelmät tuottavat suhteessa enemmän arvonlisäystä tuotantoprosessille kuin mikä niiden kustannus on
- Kaiken aikaa lisääntyvä kysyntä entistä pienemmille suodatusasteille
- Kehittyvä teknologia ja suotuisa säätelyilmapiiri (ympäristölait)
- Sovelluskohteiden määrän lisääntyminen [1]

Markkinoita voidaan kuvata Michael Porterin mallin (kuva 2.1) mukaisen viiden kilpailuvoiman mallin avulla. Mallilla voidaan analysoida yrityksen kilpailukykyä toimialalla. [3]

Avedon on määrittänyt suodatinmarkkinoiden kilpailutilanteen seuraavankaltaiseksi.

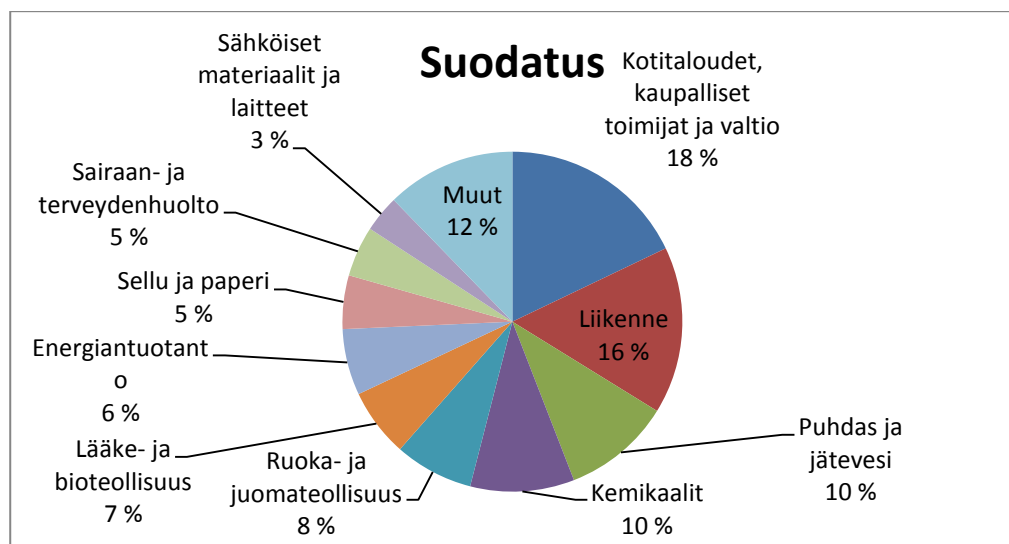
- Toimittajan valta: matala – materiaaleja tarvitaan tuotteiden tekemiseen, joskin tarvittavat materiaalmäärät ovat melko pieniä ja toimittajavalikoima on laaja.
- Ostajan valta: matala/keskitasoa – riippuu pitkälti kohdemarkkinoiden suuruudesta ja tyypistä, sekä siitä onko ostaja kuluttaja vai tukkuliike.
- Uusien tulijoiden uhka: matala – uusien toimijoiden markkinoille tulon esteenä ovat korkeat teknologiset vaatimukset, merkittävät laitteistovaatimukset, suojatut jälkimarkkinat, juurtuneet myyntikanavat sekä brändin merkitys
- Korvaavien tuotteiden uhka: Keskitaso/korkea – riippuu paljon loppukäyttäjistä. Mahdollisuus vaihtaa suodattimet kemikaaleihin, lisäaineisiin tai muihin puhdistusprosesseihin lisää uhkaa.
- Kilpailuaste: matala/keski/korkea – alueellisesti markkinat ovat hajanaiset, mutta globaalisti hyvin vakaat ja yhtenäiset[1]

Kaiken kaikkiaan Avedonin analyysin mukaan suodatinmarkkinoille on tunnusomaista, että arvon luomiselle on korkea potentiaali useilla osa-alueilla. Suodatinmarkkinoita arvioidessa otetaan huomioon kaikki suodattaminen niin yksityiskodeissa kuin teollisuudessa ja kunnallisissa toiminnoissakin. Kaikkiaan noin 70% suodattimista käytetään nesteen tai kaasun suodattamiseen. Nesteen suodattaminen kattaa noin 2/3 markkinoista ja vesi- ja prosessisuodatus 65%. [1]



Kuva 2.1. Porterin viiden kilpailuvoiman malli

Sutherland on jakanut globaalit suodatusmarkkinat kuvan 2.2 mukaisesti. Hän arvioi vauhdikkaimmin kasvavaksi sektoriksi puhtaan veden ja jäteveden käsittelyn, jonka vanavedessä tulevat lääketieteellisyys ja bioteollisuus. [2]



Kuva 2.2. Suodatusmarkkinoiden jakautuminen [2]

Itsepuhdistuvilla automaattisuodattimilla on käyttöpotentiaalia kaikissa suodatusmarkkinoiden segmenteissä, joten markkinapotentiaali on valtava. Sama suodatinkokoonpa-

no ei välttämättä vastaa kaikkien markkinasegmenttien tarpeisiin, joten yksittäisen toimijan kannattaa keskittyä rajattujen suodatusratkaisuiden tuottamiseen ja ottaa näin tuotekehityksestään suurin hyöty irti.

2.2. Markkinoilla olevia automaattisuodattimia

Automaattisuodattimien puhdistustekniikka voidaan jakaa karkeasti kahteen pääryhmään, vastavirtapuhdistukseen ja mekaaniseen puhdistukseen. Näistä yleisempi on mekaaninen puhdistus, jossa suodatinelementin puhdistukseen käytetään veden sijasta mäntää, kaavinta tai muuta mekaanista osaa, joka pyyhkii suodattimen puhtaaksi. Vastavirtapesussa nesteen virtaus käännetään hetkellisesti suodatinelementin läpi vastakkaiseen suuntaan, jolloin virtaava neste irrottaa elementtiin kiinni jääneet partikkelit. Vastavirtapesua voidaan tehostaa lisäämällä suodatusyksikköön erilliset pesusuuttimet, joilla suodatinelementtiä pystytään puhdistamaan tarvittaessa myös ilman nesteen vastavirtausta.

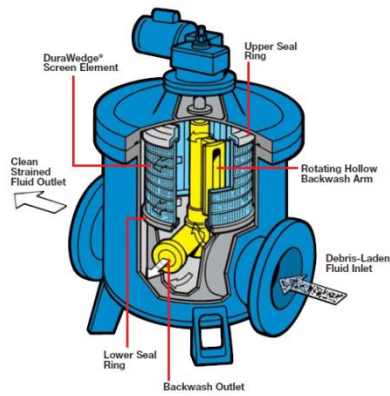
Joissain prosesseissa on tärkeää, että suodatus on jatkuvaa, riippumatta suodattimen puhdistuksesta. Tällöin suodattimia asennetaan kaksi tai useampia rinnakkain, jolloin puhdistettava suodatin voidaan kytkeä pois järjestelmästä puhdistuksen ajaksi, mutta prosessissa on edelleen toimiva suodatin.

Kuva 2.3 on esimerkki mekaanisesta automaattisuodattimesta, joka on jatkuvatoiminen puhdistuksesta riippumatta. Kyseisen suodattimen puhdistukseen käytetään mäntää, joka painaa suodattimeen kertyneen lian suodattimen pohjalle, josta se voidaan poistaa tarvittaessa.

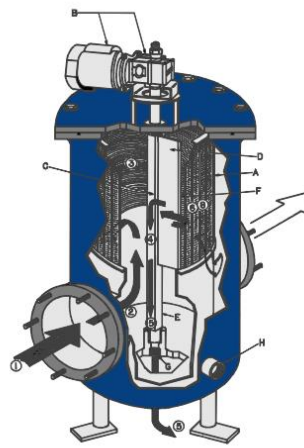


Kuva 2.3. Mekaanisesti puhdistuva automaattisuodatin [4]

Vastavirtasuodattimia on esitelty kuvissa 2.4, 2.5 ja 2.6. Kuvien 2.4 ja 2.5 suodattimissa pesu on toteutettu erillisellä pesuvarrella, joka puhdistaa suodatinelementin sisäpintaa. Jälkimmäinen on suunniteltu siten, että sitä voidaan käyttää jatkuvatoimisesti, jolloin periaatteessa tarvitaan vain yksi suodatin.

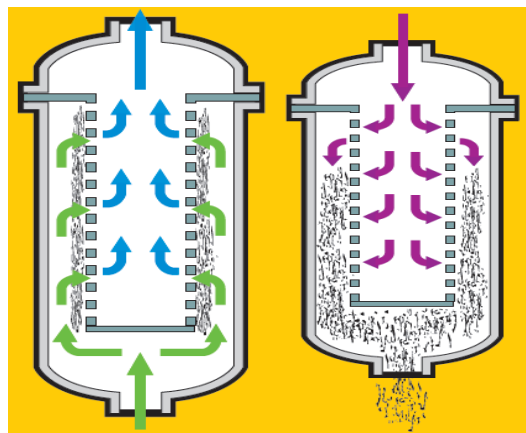


Kuva 2.4. Automaattisuodatin, jossa puhdistus on toteutettu vastapesuvarrella[5]



Kuva 2.5. Vastavirtapesuun perustuva suodatin, jossa pesuvaihe voi olla jatkuvasti päällä.[6]

Vastavirtapesu voidaan toteuttaa myös kuvan 2.6 mukaisesti, jolloin nesteen virtaus käännetään vastakkaiseen suuntaan ja näin saadaan lika irtoamaan suodatinelementin pinnasta. Tätä suodatintyyppiä asennetaan yleensä useampi rinnakkain, jolloin osa suodattimista on pesuvaiheessa ja osa suodatusvaiheessa.



Kuva 2.6. Automaattisuodatin, jossa pesu tapahtuu kääntämällä nesteen virtaus vastakkaiseen suuntaan. [7]

Aiemmin esiteltyjen automaattisuodattimien mitoitusarvoja on kerätty taulukkoon 2.1. yhdessä kehitystyön alla olevan suodattimen kanssa. Tästä nähdään, että tutkittavan suodattimen suodatustarkkuusalue on kapeampi ja virtaus on pienempi kuin vertailutuotteilla, mutta koko samansuuntainen.

Taulukko 2.1. Vertailutuotteiden mitoitusarvot

Tuote	Suodatus-tarkkuus (µm)	Virtaus (m ³ /h)	leveys ^{*)} (mm)	korkeus ^{*)} (mm)
Eaton 2596 - 4”	68-860	15-115	380	1030
Fluid Engineering Malli 721/793 - 2 ½ “	76-6350	15-115	410	930
Eaton AFC-1100 (Duo)	1-1700	NIA	545	657
Tutkittava prototyypisuodatin	100-300	20	~400	~400

**) Mitat viittaavat pelkän suodatinkonstruktioon (suodatin ja sen tukirakenteet) kokoon eivätkä sisällä lietteen tai pesuveden pumppausyksikköä tai muita oheiskomponentteja.*

2.3. Automaattisuodattimien yleisimmät käyttökohteet

Automaattisuodattimia käytetään ja voidaan käyttää lähes kaikissa prosesseissa, joissa käsitellään raakavettä, veden ja lieteaineen seoksia tai prosessissa likaantunutta vettä tai muuta nestettä. Soveltuvia käyttökohteita ovat muun muassa paperi-, prosessi, energia-, metalli- ja valmistavan teollisuuden prosessit sekä veden ja jäteveden käsittely. Oheiseen taulukkoon 2.2 on koottu esimerkkejä prosesseista, joissa automaattisuodattimia on mahdollista käyttää.

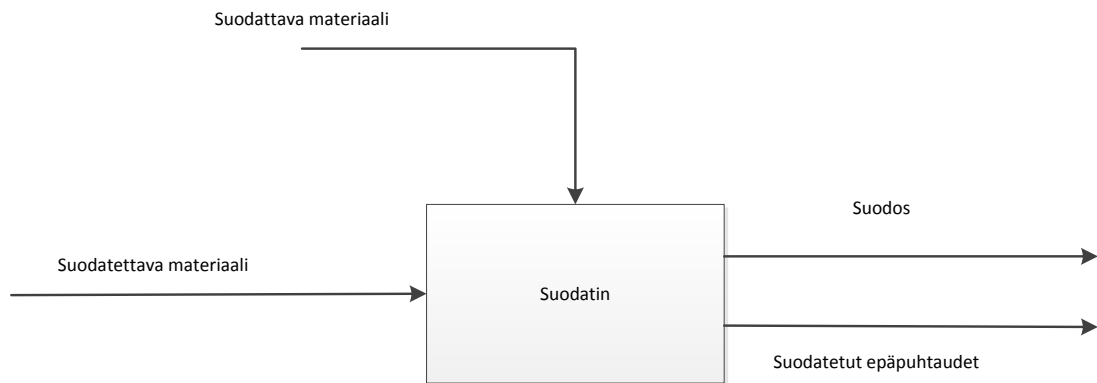
Taulukko 2.2. Esimerkkejä automaattisuodattimen käyttökohteista

Teollisuuden ala	Prosessi
Paperiteollisuus	Polymeeriliuoksen epäpuhtauksien ja liukene-mattoman polymeerin suodatus rententioai-neesta
	Hiekan poisto bentoniittilietteen suodattamalla
	Alunan suodatus
	Epäpuhtauksien poisto tärkkelysliimasta

	Kiertovesien ja jäähdytysjärjestelmän vesien käsittely ja puhdistus
Prosessteollisuus	Epäpuhtauksien poisto pumppujen, venttiilien ja suuttimien tulovirrasta
Energiateollisuus	Voimalaitosten luonnonvarannoista otetun veden suodatus
Metalliteollisuus	Epäpuhtauksien poisto terästeollisuuden raakavesistä
	Prosessin tuottaman veden puhdistus uudelleenkäyttöä tai jätevesiverkkoon laskemista
Valmistava teollisuus	Kiertovesijärjestelmien puhdistus ja vesien käsittely
	Prosessinesteiden suodatus epäpuhtauksien poistamiseksi sekä nesteen tasalaatuisuuden varmistamiseksi.
Veden ja jäteveden käsittely	Laivojen moottorien luonnonvarannoista otetun jäähdytysveden puhdistus ennen käyttöä

3. Suodatuksen teoriaa

Walker et al.[8] Thienin [9] mukaan suodatus on prosessi, jossa partikkeleita sisältävä neste käsitellään siten, että neste ja partikkelit eroavat toisistaan. Kuva 3.1 esittää suodatuksen periaatteen Thienin [9] mukaan. Käytännössä neste tarvitsee suodattaa silloin, kun siinä on alkuperäistä käyttötarkoitusta ajatellen liikaa epäpuhtauksia [2]. Esimerkkinä voidaan tutkia vaikka työstökoneen työstönestettä. Sen tarkoitus on jäähdyttää työstettävää kohdetta, mutta toisaalta myös huuhdella työstöjäte pois kappaleen pinnalta. Neste voidaan, ja hintansa puolesta usein kannattaakin, käyttää uudelleen, mutta ennen kuin se voidaan käyttää uudelleen siitä pitää puhdistaa työstöjäte, jotta se ei riko nesteen syöttöjärjestelmää. Tällöin likainen neste suodatetaan tai seulotaan ennen nesteen palauttamista kiertoon.



Kuva 3.1. Suodatusprosessin periaatekuva

Erottamismenetelmä riippuu erotettavista aineista ja yhdistelmistä ja niitä käsitellään taulukossa 3.1. Partikkelit erotetaan pakottamalla neste suodattavan materiaalin läpi, jolloin ne joko sitoutuvat materiaalin sisälle tai jäävät sen pintaan kerrokseksi, kakuksi. Näitä suodatustekniikoita kutsutaan syväsuodatuksiksi ja pintasuodatuksiksi. Tässä työssä on tutkittu pintasuodatinta, joten jatkossa perehdytään tarkemmin vain sen ominaisuuksiin. [8, katso 9]

Taulukko 3.1. Erillisinä olevien faasien erottelumenetelmiä [2]

Erilliset faasit	
Kiinteä-kiinteä	Elutriaatio, jakautuminen
Kiinteä-neste	Suodatus, sedimentointi, emissio, märkä- tai kuivapesu, elektrostaattinen saostaminen
Neste-neste	Sedimentointi, saostaminen
Neste-kaasu	Sedimentointi, huurteenpoisto
Kaasu-kaasu	Sedimentointi, vaahdonpoisto

Kuten taulukosta 3.1 nähdään, on kiinteän aineen ja nesteen erotteluun olemassa useita menetelmiä. Tässä työssä keskitytään kuitenkin tutkimaan vain suodattamista, sillä tutkittava järjestelmä perustuu nimenomaan suodattamiseen. Kun puhutaan nesteen ja kiinteän aineen suodattamisesta, yksinkertaisimmillaan suodatin on väline, jolla kiinteä aine saadaan erotettua nesteestä. Tähän tarvitaan jokin suodatuksen väliaine, joka sitoo itseensä nesteessä olevat partikkelit. Kiinteän aineen suodattamiseksi nesteestä on olemassa valtava valikoima erilaisia suodatintyyppisiä yksinkertaisista patruunasuodattimista monimutkaisiin suodattaviin koneisiin.

3.1. Suodatustekniikan- ja välineen valintaan vaikuttavat tekijät

Kiinteän aineen erottamiselle nesteestä on kaksi pääsyötä. Toisaalta halutaan poistaa ei-toivottuja partikkeleita, jolloin neste itsessään voi olla joko tavoiteltu tuote, tai jätettä, joka pitää puhdistaa ennen hävittämistä. Toisaalta voidaan haluta kerätä talteen kaikki toivotut partikkelit, jolloin neste on vain väline näiden partikkeleiden kuljettamiseen. Nesteen ja kiinteän aineen erotukseen sopivaa tekniikkaa valittaessa tulee kiinnittää huomiota erotettavaan epäpuhtauteen. Suodatus perustuu täysin partikkelikokoon, ja jossain määrin myös –muotoon, jolloin vain partikkelit, jotka ovat tietyn kokoisia, pääsevät suodattavan esteen läpi, kun taas suuremmat partikkelit jäävät esteen sisään tai sen pinnalle. Tämä tekee suodattavan materiaalin suodatusasteesta merkittävän ominaisuuden. [2]

Erilaisten suodatinratkaisuiden suureen määrään on vaikuttanut tarve käsitellä kerääntynyt lika pois suodatinmateriaalista. [2] Lian poistamisella on kaksi vaikutusta. Ensisijaisesti halutaan puhdistaa suodatinmateriaali, jotta sitä voidaan käyttää uudelleen. Toisaalta, jos suodatettu kiinteä aines on suodatettu siksi, että se on prosessista ulos saatava lopputuote, halutaan se kerätä talteen mahdollisimman tehokkaasti. Puhdistamiseen voidaan käyttää muun muassa lastoja, harjoja ja lian keräämistä vastapesulla, ja se voidaan toteuttaa automaattisesti tai manuaalisesti.

Suodatinsuunnittelussa ja -valinnassa on useita merkittäviä kriteereitä, jotka tulee ottaa huomioon. Yksi tärkeimmistä on mahdollisimman suuri suodattavan pinta-ala. [2] Suodatinjärjestelmälle ei useinkaan pystytä varaamaan paljoa tilaa, jolloin olemassa oleva tila tulee käyttää tehokkaasti. Suodatuspinta-alaa pystytään lisäämään tekemällä suodattimesta levyn sijaan esimerkiksi lieriön mallinen ja kasvattamalla lieriön korkeutta.

Yhden suodattimen sijaan saatetaan järjestelmään tarvita rinnakkaisia suodattimia, jotta likaantuneen suodattimen puhdistaminen on mahdollista ilman järjestelmän toiminnan katkeamista. Toisaalta järjestelmässä saatetaan tarvita myös peräkkäisiä suodattimia. Mitä hienompi suodatin on käytössä, sitä helpommin se menee tukkoon, jolloin kannattaa harkita myös asteittaista suodattamista. Suodatettavien partikkeleiden kokoja-kauma ja keskikoko on tällöin myös oleellista tietää. [2]

Materiaalivalinnassa tulee ottaa huomioon suodatettavan nesteen ominaisuudet. Suodatinmateriaalin ja nesteen tulee olla yhteensopivia ja erityistä huomiota tulee kiinnittää materiaalin lämmönkestoon, korroosionkestoon ja hankauskestävyyteen. Lisäksi ydin-teollisuudessa pitää ottaa huomioon radioaktiivisuus niin materiaalien valinnassa kuin suodattimen huoltojen osaltakin. [2]

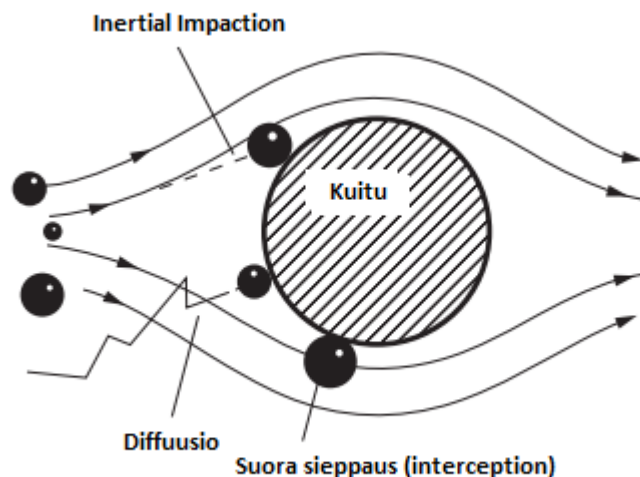
3.2. Partikkelin liike nesteessä ja kiinnitysmekanismit

Stokesin laki kuvaa kappaleen nopeutta sen pudotessa vapaasti nesteen läpi. Nopeus on

- suoraan verrannollinen partikkelin halkaisijaan
- suoraan verrannollinen partikkelin ja nesteen tiheyksien erotukseen
- kääntäen verrannollinen nesteen viskositeettiin

Tämä pätee ainoastaan täysin pallomaisille kappaleille, mutta voidaan soveltaa myös ei-pallomaisille kappaleille, kun käytetään niiden tehollista halkaisijaa. Stokesin laki pätee, kun kyseessä on neste, jossa on matala kiinteiden aineiden konsentraatio. [2]

Suodatuksessa partikkelit jotka ovat liian suuria läpäistäkseen suodatinmateriaalin, jäävät joko suodatinmateriaalin pinnalle (pintasuodatus) tai sisälle (syväsuodatus). Suurin osa suodatinmateriaaleista on kuituisia, joten tutkitaan seuraavaksi miten partikkelit liikkuvat lähestyessään ja läpäistessään suodatinmateriaalia. Kuvassa 3.2 on kuvattu partikkelien yleisimmät kiinnittymismekanismit, kun ne lähestyvät kuitua. [2; 10; 11]



Kuva 3.2. Partikkelin kiinnittymismekanismit [2]

Tullessaan riittävän lähelle kuitua, partikkeli painuu kiinni kuituun, jonka jälkeen se ei enää irtoa kuidusta. Sidokset ovat heikkoja, mutta riittävän vahvoja sitoakseen partikkelin suodatinmateriaalin pintaan. Tästä seuraa, että jos nesteen virtaus on sellaista, että partikkeli suodatuu, on neste suodatettu. Nesteen virtaus suodatinelementissä on usein

laminaarista, jolloin neste virtaa tasaisesti eteensä tulevien esteiden ohi. Myös partikkeli seuraa näitä virtauksia jolloin pienet partikkelit kulkeutuvat suodattimen läpi. Kun virtaus kulkee esteen ohi, partikkelit kulkeutuvat sen mukana ja kulkeutuessaan etäisyydelle, joka vastaa puolta partikkelin halkaisijasta, ne jäävät kiinni suodattimen kuituihin. Tätä kutsutaan **suoraksi sieppaukseksi** (interception) ja sen tulee tapahtua kuidun reunoilla, ei suoraan sen edessä. [2; 10; 11]

Suuret partikkelit eivät massansa vuoksi pysy aina veden virtauksen mukana, jolloin ne oman inertiansa vuoksi joutuvat pois virtauksesta ja kiinnittyvät kuituun. Tätä kutsutaan **Inertial impaction** -mekanismiksi. Kuvassa näkyy myös **diffuusiolla** kiinnittyvä partikkeli. Tämä partikkeliryhmä ei kulje virtauksen mukana, vaan heittelee sen läpi edes takaisin. Tämä koskee lähinnä pieniä partikkeleita. [2; 10; 11]

3.3. Pintasuodatus ja syväsuodatus

Suodatinmateriaali on läpäisevää eli huokoista, jolloin sen läpi virtaavan nesteen partikkelit periaatteessa pystyvät läpäisemään materiaalin myös, mikäli niiden partikkelikoko on riittävän pieni. Suurin osa partikkeleista kuitenkin takertuu suodatinmateriaalin. Mikäli suodatinmateriaali on merkittävästi ohuempaa kuin suodatettavassa nesteessä olevien partikkelien halkaisija, jäävät suodattuvat partikkelit suodatinmateriaalin yläpintaan kiinni. Vähitellen ne tukkivat materiaalin reiät, kunnes virtaus laskee niin paljon, että suodattimen voidaan todeta olevan tukossa. Tätä suodatusmekanismia kutsutaan pintasuodatuksiksi ja se perustuu partikkeleiden ja huokosten kokojen suhteeseen. Se suodattaa nesteestä tismalleen sen kokoiset ja sitä pienemmät partikkelit, kuin mikä sen aukkojen koko on. [2]

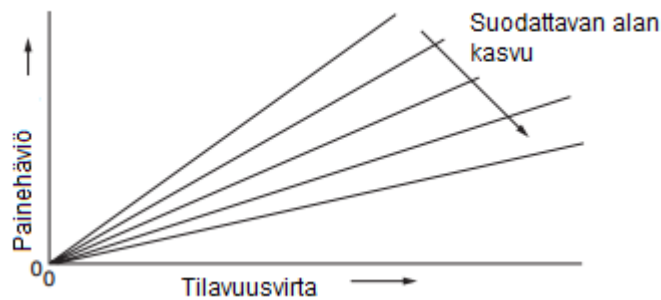
Syväsuodatuksessa taas partikkeli kulkeutuu suodattavan materiaalin läpi kunnes se kohtaa aukon, josta se ei pääse läpi. Partikkeli jää suodattimen sisään ja ajan myötä suodatin tukkeutuu samaan tapaan kuin pintasuodatuksessa. Pintasuodatuksessa esiintyy usein myös syväsuodatusta sillä ennen suodattimen tukkeutumista suodattimen pinnalle alkaa muodostua partikkeleista kerrostuma, kakku, joka toimii kuin syväsuodatin. Tällöin kakun pinta toimii pintasuodattimena ja kakun sisäosat syväsuodattimena. Tätä mekanismia kutsutaan kakkusuodatuksiksi. [2] Kaikissa näissä suodatusmekanismeissa suodatinmateriaali voidaan puhdistaa kääntämällä virtaus hetkellisesti vastakkaiseen suuntaan, jolloin virtaava neste irrottaa suodatinmateriaalin tukkineet partikkelit.

3.4. Suodattimen läpäisevyys

Suodattimen läpäisevyyttä voidaan arvioida paine-erokäyrien avulla suhteessa:

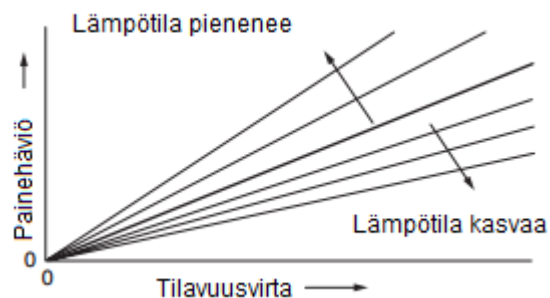
- suodattimen kokoon (suodatusala)
- nesteen lämpötilaan
- suodatusaikaan

Suodattimen suodatusalan kasvu johtaa paine-eron pienenemiseen. Kuvasta 3.3 nähdään, että paine-ero kasvaa tilavuusvirran kasvaessa, mutta pienenee suodatuspinta-alan kasvaessa. Tästä pystytään johtamaan suodattimelle koko, eli vaadittava suodatuspinta-ala, kun tiedetään vaadittava virtaus ja maksimipaine-ero.[2]



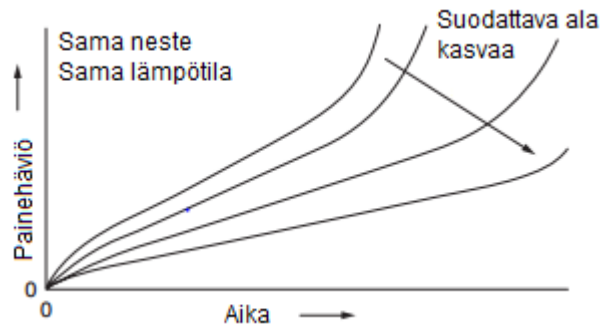
Kuva 3.3. Suodattimen suodatusalan kasvun vaikutus tilavuusvirtaan ja paine-eroon. [2]

Kuva 3.4 esittää lämpötilan vaikutuksen paine-eroon. Lämpötilan muutos vaikuttaa nesteen viskositeettiin ja siten suodattimen läpäisevyyteen. Lämmin neste, jonka viskositeetti on pieni, aiheuttaa pienemmän paine-eron kuin kylmä neste, jonka viskositeetti on suurempi. Paine-ero on täten käänteisesti verrannollinen lämpötilaan, jolloin lämpötilan lasku aiheuttaa paine-eron kasvun. Suodattimelle määriteltävä paine-ero ilmoitetaan aina suhteessa lämpötilaan. Kuvassa 3.4 keskimääräinen käyrä kuvaa tätä tietyssä standardilämpötilassa määritettyä paine-erokäyrää. [2]



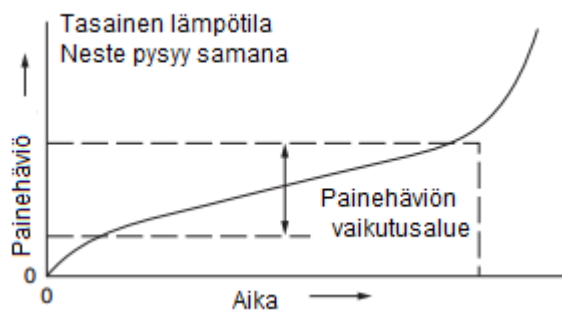
Kuva 3.4. Nesteen lämpötilan vaikutus tilavuusvirtaan ja paine-eroon. [2]

Pitkän suodatuksen aikana suodattimen aukot tukkeutuvat, jolloin partikkeleita kerääntyy suodattimen pintaan ja virtauspinta-ala pienenee. Läpäisevyys heikkenee suoraan verrannollisesti suodattimeen kertyneen lian määrään (kuva 3.5) [2]



Kuva 3.5. Suodattimen läpäisevyyden heikkenemisen vaikutus paine-eroon [2]

Tämän esittäminen kuvaajamuodossa ei anna tarkkaa kuvaa siitä mitä suodattimessa tapahtuu ja toisaalta, koska suodattimen koko valitaan vastaamaan tiettyä virtausta, voidaan tämä esittää myös yhtenä paine-erokäyränä, joka kuvaa liasta johtuvat muutokset yhdessä kuvaajassa. Kuvassa 3.6. on esitetty tämä paine-erokäyrä. [2]



Kuva 3.6. Suodattimen paine-erokäyrä [2]

Alussa paine-ero nousee nopeasti, kunnes se saavuttaa tasaisen vaiheen. Tässä paine-ero jatkaa hidasta kasvuaan, kunnes suodattimen virtauspinta-ala on niin vähissä, että paine-ero nousee jyrkästi. Terävää nousua paine-erossa voidaan käyttää indikaattorina suodattimen puhdistus- tai vaihtotarpeelle. Automaattisessa suodatinkokoonpanossa, jossa on vähintään kaksi suodatinta, terävä paine-eron nousu voi antaa automaatiolle käskyn vaihtaa virtauksen toiselle suodattimelle, jolloin tukkeutunut suodatin saadaan puhdistettu. [2]

Mikäli paine-erokäyrä tunnetaan olemassa olevalle suodattimelle tietyissä olosuhteissa, voidaan erikokoiselle suodattimelle määrittää kyseinen käyrä lähtemällä liikkeelle kuristuksen tilavuusvirran kaavasta (kaava 1). [12] Kuristuksen tilavuusvirran kaava pätee myös suodattimessa, sillä jokainen erillinen suodattimen virtausaukko voidaan ajatella olevan kuristin.

$$Q = \mu A \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}}, \quad (1)$$

jossa Q on tilavuusvirta, μ on purkautumiskerroin, A on suodattimen virtauspinta-ala, Δp on paine-ero suodattimen yli ja ρ on tiheys. Kun oletetaan, että μ ja ρ pysyvät vakioina, saadaan kaavasta (1) yhtälöksi

$$\frac{\mu}{\sqrt{\rho}} = \frac{Q}{A\sqrt{2\Delta p}} \quad (2)$$

Tästä voidaan muodostaa yhtälöpari

$$\frac{Q_1}{A_1\sqrt{2\Delta p_1}} = \frac{Q_2}{A_2\sqrt{2\Delta p_2}} \quad (3)$$

Josta saadaan edelleen

$$\frac{Q_1^2}{A_1^2 2\Delta p_1} = \frac{Q_2^2}{A_2^2 2\Delta p_2} \quad (4)$$

Kaavasta (4) saadaan ratkaistua Δp_2

$$\Delta p_2 = \left(\frac{Q_2 A_1}{Q_1 A_2}\right)^2 \Delta p_1 \quad (5)$$

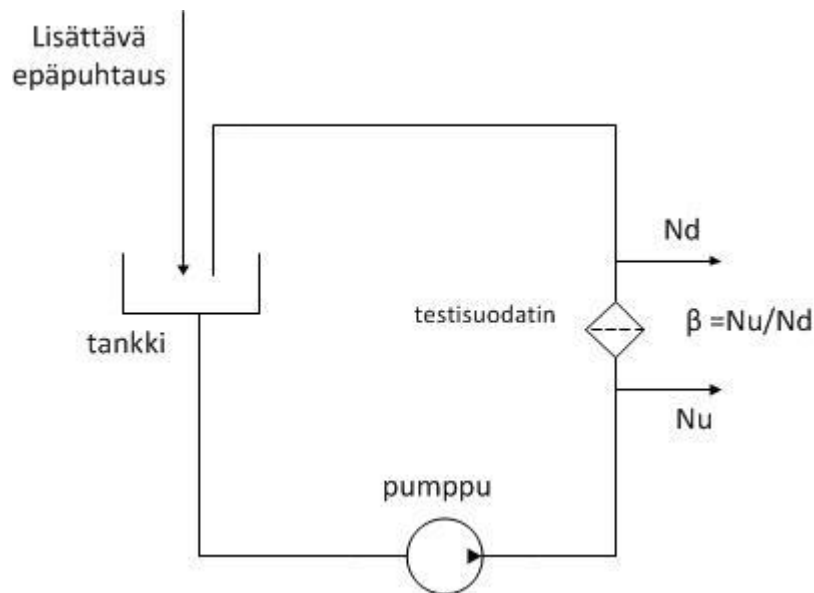
Kaavaa voi käyttää myös siinä tapauksessa, että vain suodattava pinta-ala kasvaa, mutta tilavuusvirta pysyy vakiona tai tilavuusvirta kasvaa ja suodattava pinta-ala pysyy vakiona.

Virtauspinta-ala A voidaan laskea käyttäen apuna suodatinmateriaalin teknisiä tietoja. Tiedoissa kerrotaan virtausaukon koko sekä suodatinmateriaalin langanvahvuus. Näiden tietojen avulla pystytään laskemaan tunnetun kokoisen suodatinverkon virtausala. Jos suodatinverkko on lisäksi kiinnitetty esimerkiksi seulasta tehtyyn runkoon, pystytään seulan pinta-ala laskemaan samaan tapaan, kun tiedetään seulan virtausaukon koko. Nämä tiedot yhdistämällä saadaan ratkaistua suodatinkorin virtauspinta-ala.

3.5. Suodattimen testausmenetelmät

Suodatinta voidaan testata useilla tavoilla. Suodatusaste saadaan määritettyä parhaiten testillä, jossa nesteeseen lisätään soveltuvaa materiaalia olevia helmiä. Helmien kokoja-kauma, määrä ja konsentraatio on tunnettu ja täten testiä pystytään analysoimaan tarkasti. Testissä analysoidaan suodosta ja siinä olevien partikkelien määrää. Yksinkertaisimmillaan testin analysointi voidaan tehdä siten, että suurin suodospuolelta löytynyt helmi määrää suodattimen suodatusasteen. Toisaalta, suodospuolen nesteestä voidaan laskea kaikki partikkelit ja tämän jälkeen kuvaajassa kuvata tulokset prosentteina syötetyistä partikkeleista. Suodattimen suodatusaste voidaan määrittää mikrometreinä siten, että valitaan jokin partikkelikoko, jota on päässyt suodattimen läpi enintään 2-10%. [2]

MultiPass –testi on tarkoitettu erityisesti beta-arvon tutkimiseen. Beta-arvo kuvaa suodattimen suodatussuhteen eli tiettyä kokoa suurempien hiukkasten määrän ennen suodatinta suhteessa niiden määrään suodattimen jälkeen. Järjestelmän periaatekuvassa (kuva 3.7) näkyy testin toimintaperiaate. Testausjärjestelmässä on suljettu kierto johon syötetään nestettä. Nesteeseen on lisätty tietty määrä partikkeleita, tietyllä jakaumalla ja konsentraatiolla. Neste kiertää suodattimen kautta ja palaa sitten takaisin tankkiin. Tankissa siihen lisätään jatkuvasti uutta suspensiota, jotta suodattimeen jääneet partikkelit saadaan korvattua. Virtauksesta otetaan testinäytteitä tietyillä paine-eroilla sekä ennen suodatinta että suodattimen jälkeen ja näistä näytteistä arvioidaan kumulatiivista partikkelikoon jakaumaa yksikkötilavuudessa. Näin saadaan laskettua beta-arvo kullekin partikkelikoolle. Jotta suodattimen koko elinkaaren toiminnasta saadaan realistista tietoa, MultiPass –testi tulee aina päättää korkeampaan paine-eroon, kuin mikä järjestelmälle on suunnitteilla maksimipaine-eroksi, sillä beta-arvo alenee merkittävästi, kun paine-ero kasvaa. [2; 12]

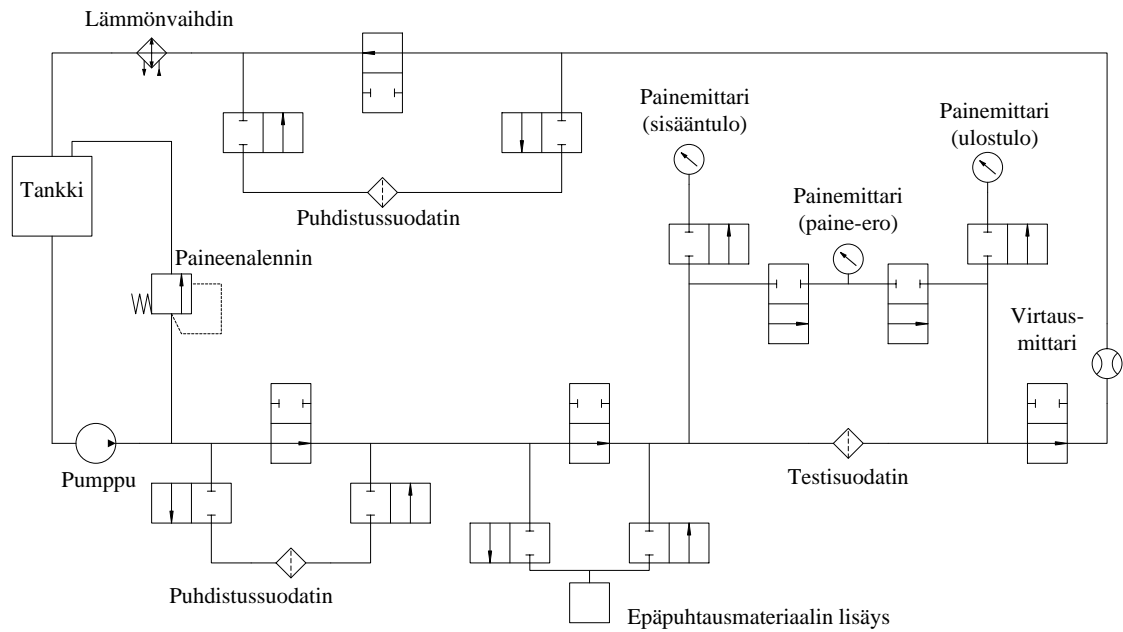


Kuva 3.7. MultiPass –testin toimintaperiaate [3]

Suodattimen liansitomiskyky voidaan testata rakentamalla kuvan 3.8 mukainen testijärjestelmä. Testijärjestelmässä kiertää jatkuvasti suspensio, johon syötetään tietyn väliajoin epäpuhtautta. Paine-ero suodatinelementin yli tallennetaan, jolloin pystytään piirtämään kuvaaja, jossa on paine-ero suhteessa epäpuhtauden määrään. Koska suodattimelle voidaan määrittää maksimi paine-ero, pystytään tämän testin perusteella määrittämään epäpuhtaudelle maksimimäärä ja siten suodattimelle maksimikäyttöaika. [2]

Samoin suodattimelle voidaan määrittää **paine-erokäyrä**, kun suodatin on puhdas ja suodatettavaan nesteeseen ei lisätä epäpuhtauksia. Testi voidaan suorittaa kuvan 3.8 testijärjestelmällä, kun käytössä on puhdas neste, ja testauslämpötila pysyy vakiona. Ensimmäinen testi voidaan suorittaa ilman suodatinelementtiä, jolloin saadaan määritettyä paine-erokäyrä pelkälle suodattimen säiliölle. Tämän jälkeen testi voidaan tehdä

siten, että suodatinelementti on paikallaan. Mikäli suodatinelementin paine-erokäyrä saadaan määritettyä yksinään, saatetaan huomata, että suodatinelementin ja säiliön yhteispaine-erokäyrä ei ole näiden erillisten käyrien summa. [2]

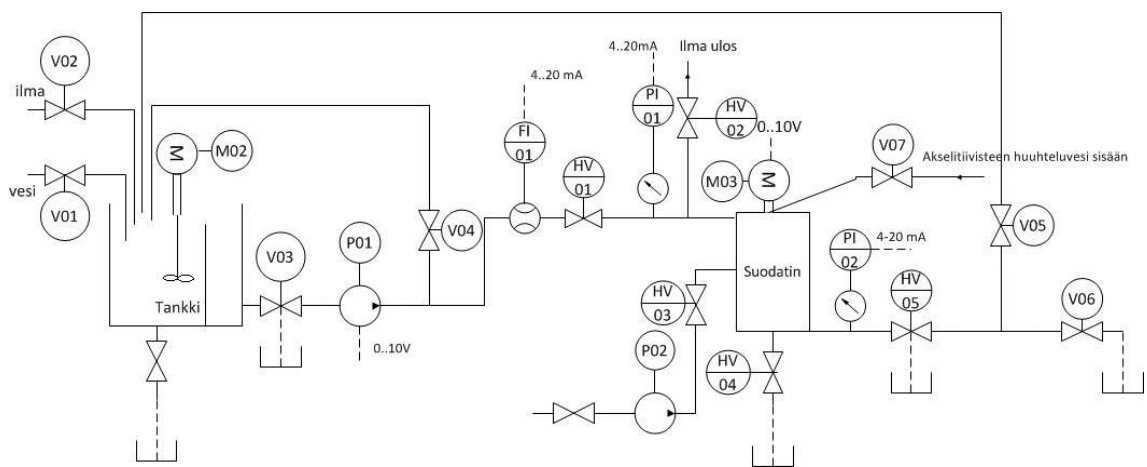


Kuva 3.8. Paine-erokäyrän ja liansitomistestin esimerkkitestijärjestely [3]

Mikäli suodattimen ääriarvoja halutaan testata, voidaan sille suorittaa testi, jossa paineeron annetaan kasvaa niin korkeaksi, että elementti hajoaa. Testi suoritetaan likaisella nesteellä, jonka virtausmäärä on yhtä suuri kuin suodattimelta odotettava virtausmäärä.

4. AF-12 automaattisuodattimen prototyyppi ja testausjärjestelyt

Tutkimuslaitteisto (kuva 4.1) koostuu tutkittavasta osasta, AF-12 suodatinyksiköstä, ja apujärjestelmästä, jonka tehtävänä on sekoittaa ja kierrättää tutkimusliuosta. AF-12 suodatin on itsepuhdistuvan automaattisuodattimen prototyyppi, jossa suodatinelementin puhdistus tapahtuu vesisuihkuilla. Vesisuihkut ovat kiinni suodatinsäiliön reunalla ja moottori pyörittää suodatinkoria, jolloin koko kori saadaan puhdistettua yhdellä vesisuihkukyksiköllä.



Kuva 4.1. AF-12 laitteiston kaaviokuva

AF-12 on suunniteltu käytettäväksi rinnan toisen suodatinyksikön kanssa, jolloin toinen suodatin on pesukierrossa ja toinen suodatinkierrossa. Apujärjestelmä koostuu kiintoainesilosta, sekoitustankista ja pumpusta. Taulukkoon 4.1 on koottu teknisiä tietoja testausjärjestelmästä.

Suodattimen suodatusaste on valittu siten, että se on linjassa yrityksen nykyisen malliston suodatusasteiden kanssa. Suodattimen kapasiteetti ja pesujärjestelmän paine on valittu yrityksen aiemman tuotannon mukaan vastaamaan paperitehtaassa käytettävän järjestelmän arvoja.

Testausjärjestelmässä on seuraavat mittarit/anturit.

- Tilavuusvirtamittari FI-01
- Paineanturit PI-01 ja PI-02

Lisäksi:

- Syöttöpumpun P01 kierrosnopeutta säädetään taajuusmuuttajalla
- Koria pyörittävän moottorin M03 kierrosnopeutta säädetään taajuusmuuttajalla

Taulukko 4.1. Tutkimusjärjestelmän tekniset tiedot

Syöttöjärjestelmä	Paine (max) *)	4 bar
Liettosäiliö	Tilavuus	1 m ³
Testilietteen syöttöpumppu	Tuotto (max)	25,1 L/min
Suodatin	Kapasiteetti	20 m ³ /h
	Korin pyörimisnopeus	10 rpm
	Suodatinsäiliön sisähalkaisija	200mm
	Suodatusaste	100-300 µm
Pesujärjestelmä	Suuttimien lukumäärä	9kpl
	Järjestelmän paine	15-50 bar
	Suuttimien virtauskapasiteetti	1,5l/min/suutin@20 bar
Pesuveden syöttöpumppu	Tuotto (max)	30,3 l/min @ 1450 rpm 20,4 l/min @ 1150 rpm

*) Painetaso rajoitettu 4 bariin suodatinkorin kestävyysperusteella.

Testausjärjestelmä vaatii seuraavat liitännät:

- vesisyöttö: DN25/80-100 l/min/3 bar
- ilmasyöttö: DN15/400 l/min/5-7 bar
- sähkösyöttö: 32A - 400 V
- mittausviestit 4-20 mA
 - FI-01 suodatuksen tulovirtaama
 - PI-01 suodatuksen tulopaine
 - PI-02 suodatuksen lähtöpaine
 - P01 Pumpun pyörimisnopeus
 - M03 moottorin pyörimisnopeus

4.1. Testausjärjestelmän rakenne

Testilaitteiston apujärjestelmä on esitetty kuvassa 4.2. Se koostuu jauhesiilosta (kuvassa vasemmalla), yhden kuutiometrin kokoisesta liettosäiliöstä ja syöttöpumpusta, jonka tuotto on 20 m³/h. Apujärjestelmän toimilaitteiden toimintaa ohjataan manuaalisesti kuvassa näkyvän sähkökaapin säätimien avulla.



Kuva 4.2. Testilaitteiston apujärjestelmä

Liettosäiliön kannessa on ejektori, joka sekoittaa jauhesiilolta tulevan hiekan ja vesi-johtoverkosta tulevan veden lietteeksi liettosäiliöön. Säiliö on jaettu kahteen osaan väliseinällä (kuva 4.3.). Sekoituspölellä on liettosäiliön kannessa sekoitin, jotta hiekasta ja vedestä saadaan muodostettua tasainen seos. Lisäksi järjestelmän suodos palaa putkistoa pitkin sekoituspölelle. Väliseinän toisella puolella on pumpun ottoaukko. Neste nousee sekoituspölelta putkea pitkin ottopölelle, joka alkaa täyttyä, kun sekoituspöle on noin puolillaan seosta. Pumpun imuaukko on tankin kyljessä aivan tankin pohjalla.



Kuva 4.3. Liettosäiliön rakenne

Testattavassa prototyypissä (kuva 4.4) suodatin ja pesujärjestelmä on integroitu samaan osaan. Varsinainen suodatin koostuu suodatinsäiliöstä kansineen, suodatinkorista sekä koria pyörittävästä moottorista. Suodatinsäiliön maksimisisähalkaisija on 200 millimetriä ja siinä on yksi sisääntulo ja kaksi ulostuloa. Ensimmäinen ulostulo on säiliön kyljessä ja siitä menee ulos suodos. Toinen ulostulo on säiliön pohjassa ja sen kautta poistetaan rejektio, joka sisältää suodattimen sisällä olevan veden ja irtonaisen hiekan,

ja pesun tuotos. Lisäksi suodatinrungossa on näkölasit kolmella sivulla, jotta suodatus-
tapahtumaa pystytään seuraamaan ja dokumentoimaan.



Kuva 4.4. Testattava laitteisto AF-12

Suodatinsäiliön sisälle on asennettu suodatinkori (kuva 4.5). Kori on laakeroitu liu-
kulaakereilla ylä- ja alapäästään. Alapäässä liukulaakerit huolehtivat sivuttaissuuntaises-
ta laakeroinnista ja yläpäässä sekä sivuttaisen että alaspäin suuntautuvan voiman laake-
roinnista. Testijärjestelmässä korin pyöritys toteutetaan moottorilla ja hihnavälityksellä.

Suodatinkorien rakenne on kaksikerroksinen. Runko on seulamainen levy, jossa on
24 rivissä kussakin 69 reikää. Rungon sisäpuolelle on kiinnitetty suodatinverkko, joka
varsinaisesti määrittelee suodattimen suodatusasteen. Järjestelmää testataan 100 µm,
150 µm ja 300 µm suodatusasteella. Suodatinkorien sisäverkon tekniset tiedot on eritel-
ty taulukossa 4.2. Taulukossa 4.2. vapaa aukko tarkoittaa suodatinverkon neliön muo-
toisen virtausaukon kyljen pituutta. Näiden tietojen avulla pystytään laskemaan suoda-
tinverkon suodatuspinta-ala.

Taulukko 4.2. Suodatinkorien sisäverkon tekniset tiedot [13]

	100 µm	150 µm	300 µm
Vapaa aukko	0,100mm	0,150	NIA
Langan leveys	0,065mm	0,100	NIA
Materiaali	AISI 316	AISI 316	AISI 316

Pesujärjestelmä on integroitu osaksi suodatinta ja se koostuu yhdeksästä pesusuutti-
mesta, joiden virtaama on 1,5 l/min/suutin@20 bar. Kuvasta 4.6 nähdään miten pesujär-

jestelmä on integroitu suodattimen runkoon. Vesi tulee pumpulta yhtä putkea pitkin ja haarautuu ennen suuttimia kahteen putkeen. Tällä tavoitellaan veden tasaista leviämistä pesusuuttimille sekä tasaista pesupainetta.



Kuva 4.5. Testikorit 300 µm ja 100 µm.



Kuva 4.6. Pesujärjestelmän integrointi suodattimen runkoon

Jotta testituloksista saatiin yhteismitallisia, valittiin kiintoaineeksi aine, jonka kokojakauma on tiedossa. Huomioon piti ottaa myös se, että kiintoaineen piti olla helposti

käsiteltävää halliolosuhteissa ja ympäristölle mahdollisimman turvallista. Valinnassa päädyttiin saatavuuden ja käsiteltävyyden vuoksi käyttämään kahta eri puhallushiekkaa. Käytettyjen hiekkalaatujen raekoot olivat 0,1-0,6 mm ja 0,5-1,6 mm. Myös testipölyn, esimerkiksi ISO MTD:n, käyttämistä tutkittiin vaihtoehtona, mutta tarvittavan kiintoaineen määrä arvioitiin niin suureksi, että testipölyn hinta muodostui rajoittavaksi tekijäksi.

4.2. Testausjärjestelmän toiminnan kuvaus

Järjestelmää käytettäessä tärkeää on, että liettosäiliössä on aina riittävästi nestettä. Testijärjestelmän tapauksessa tankin tulee olla lähes täynnä, jotta imupuoli ei pääse tyhjäksi. Suodatettu neste palaa takaisin sekoitussäiliöön, joka mahdollistaa sen, että kiertoon lisätään nestettä kesken suodatuksen vain tarvittaessa. Kiintoainetta lisätään veteen tasaisin väliajoin suoraan sekoitustankkiin.

Oleelliset seurattavat indikaattorit ovat virtausmäärä FI-01 ja suodoksen paine-ero P01/P02. Rejektointi, jossa tankista tyhjenetään vesi ja irtonainen lika, voidaan asettaa tapahtumaan joko paine-eron P01/P02 ylittäessä asetetun arvon tai aika-asetuksen mukaan. Testilaitteistoa testataan paine-eroasetuksella, jolloin suodatin ajetaan tukkoon ja rejektointi suoritetaan vasta tämän jälkeen. Rejektointi suoritetaan tyhjentämällä järjestelmän suodospuoli ja rejektoimalla suodatin. Näiden toimenpiteiden jälkeen suodattimen pesuvaihe voidaan käynnistää.

Pesuvaiheessa syötetään pesuvettä pesusuuttimille ja pyöritysmoottorilla pyöritetään suodatinkoria. Pesutapahtuman kesto on yhdestä kahteen minuuttia ja sen jälkeen järjestelmä voidaan palauttaa takaisin suodatusvaiheeseen. Suodatus lopetetaan aina rejektointiin ja pesuun eikä suodatettavaa kiintoainetta saa jäädä suodattimeen. Lisäksi sekoitussäiliö tulee puhdistaa käytön jälkeen.

4.3. Testauksen työvaiheet

Testausjakso aloitettiin laitteiston toimituksella maaliskuussa. Ensimmäinen asennus tehtiin siten, että päästiin kokeilemaan toimiiko kaikki anturit ja osat. Tämän jälkeen laitteisto siirrettiin omalle paikalleen tutkimushalliin ja se instrumentointiin. Mittausohjelma tehtiin DasyLab-ohjelmistolla. Mittausohjelma rakennettiin siten, että se muutti jänniteviestit suoraan kuvaaviksi signaaleiksi. Tallennettavat signaalit olivat paine ennen suodatinta (PI-01), paine suodattimen jälkeen (PI-02), tilavuusvirta, pumpun P01 pyörimisnopeus ja moottorin M03 jänniteviesti. Mittakorttina tietokoneessa oli National Instrumentsin NI-DAQmx -kortti, jossa 16 sisääntuloa ja 2 ulostuloa. Sisääntuloista oli käytössä kaikkiaan 5 kappaletta.

Testiajossa käytettiin 0,1-0,6 mm hiekkapuhallushiekkaa ja 150 µm suodatinelementtiä. Testiajossa veden hiekkapitoisuus oli niin suuri, että suodatin alkoi tukkeutua lähes välittömästi. Myöhemmin huomattiin, että suurin osa hiekasta ei ollut kulkeutunut tankista suodattimeen vaan oli laskeutunut tankin ottopuolen pohjalle. Sekoituspuolessa oleva sekoitin pystyi ylläpitämään hiekasta ja vedestä muodostettua seosta, mutta kun seos siirtyi tankin ottopuolelle, laskeutui hiekka välittömästi tankin pohjalle. Testiajon perusteella päädyttiin suorittamaan testit siten, että hiekkaa lisätään suoraan tankin sekoituspuolessa punnittu määrä tietyin väliajoin. Lisäys päätettiin suorittaa, kun tankin koko vesitilavuus on kiertänyt järjestelmän eli tilavuusvirtamittarin läpi on virrannut kuutio vettä.

4.4. Testaussuunnitelma ja mitattavat asiat

Mittausten ensisijaisena tavoitteena oli selvittää miten hyvin pesujärjestelmä puhdistaa tukkeutuneen suodatinkorin. Tämän lisäksi kerättiin momenttitietoa koria pyörittävän moottorin kehittämistä varten. Testeissä kerättiin suodatinkorin puhdistumisen arviointia varten tietoa seuraavista asioista:

- Paine-erokäyrät puhtaalla vedellä kolmella suodatusasteella
- Pestyjen suodatinkorien paine-erokäyrät
- Syöttöpumpun kierrosluku
- Suodatinkorin yläosan laakeroinnin vuodot
- Testeissä käytetyn hiekan määrä
- Puhdistusyklin tulos
 - Rejektiotulos
 - Pesutulos
- Suodatinkorin puhtaus silmämääräisesti tutkittuna.
- Suodatinkoria pyörittävän moottorin jänniteviesti

Kaikille suodatinkoreille suoritettiin samat testit. Aluksi niille määritettiin paine-erokäyrä puhtaalla nesteellä, jotta saatiin tietoa suodattimen alkutilasta. Tämän jälkeen suoritettiin pesutehotestit, joihin sovellettiin MultiPass –menetelmää. Pesutehotestit tehtiin kahdella hiekkalaadulla, jotta saatiin tietoa erityyppisen lian puhdistamisesta. Näiden testien jälkeen suodatinkorille määritettiin uusi paine-erokäyrä. Tässä kohdin suodatinyksikkö purettiin ja suodatinkorista otettiin valokuvat, jotta puhtautta pystyttiin arvioimaan myös visuaalisesti. Lopuksi suodatinkorille tehtiin vielä tukkeumatesti, jonka jälkeen suodatinta ei puhdistettu, vaan suodatin purettiin arvioitavaksi likaisena.

4.4.1. Paine-erokäyrä -testi

Paine-eromittaukset suoritettiin kullekin korille kahdesti - ennen pesutehotestejä ja niiden jälkeen. Testin suorituskaavio on liitteessä 2. Syöttöpumpun kierrosnopeutta, ja

siten tilavuusvirtaa, säädettiin taajuusmuuttajalla. Ttestin alussa taajuusmuuttaja oli asennossa 0, jolloin pumpun pyörimisnopeus oli 150 rpm ja tilavuusvirta noin 1 m³/h. Pumpun pyörimisnopeutta nostettiin tasaisesti maksimiarvoonsa, 3050 rpm, taajuusmuuttajan avulla. Kun maksimipyörimisnopeus, ja maksimitilavuusvirta 14 m³/h, saavutettiin, laskettiin pyörimisnopeus tasaisesti takaisin minimiarvoonsa. Tämän jälkeen mittaus lopetettiin ja tulokset tallennettiin.

4.4.2. Pesutehotestit

Pesutehotestit olivat kaksiosaiset ja testien kulku on kuvattu kaaviossa, joka löytyy liitteestä 3. Ensimmäisessä osassa suodatin ajettiin tukkoon kiintoaineella ja toisessa osassa suoritettiin suodattimen pesu. Tukkeutumisen toteuttamisessa sovellettiin MultiPass -menetelmää, jossa tutkittava neste-kiintoaine -liuos kiertää suljetussa kierrossa ja siihen lisätään kiintoainetta sisältävää nestettä jatkuvasti, jotta saadaan korvattua suodatuksessa järjestelmästä poistunut epäpuhtaus [2]. Pesutehotestissä kiintoainetta ei kuitenkaan syötetty järjestelmään jatkuvasti, vaan hiekkaa lisättiin sekoitinsäiliöön aina, kun tilavuusvirtamittari osoitti, että kuutio vettä oli kiertänyt järjestelmän. Lisäysväli oli pienimmillään 4 minuuttia ja kasvoi, kun paine-ero kasvoi kahden hiekan lisäyksen välissä. Lisätyt hiekka-annokset olivat 100 gramman painoisia.

Ongelmaksi hiekka-vesiseoksen kanssa muodostui hiekan saaminen sekoitustankista syöttöpumpulle. Kaksiosaisen tankin sekoituspuolella sekoitin jaksoi pyörittää vesimassaa niin paljon, että hiekka ei päässyt laskeutumaan tankin pohjalle. Syöttöpuolella ei ollut sekoitusta, joten hiekka lähti välittömästi asettumaan säiliön pohjalle jolloin lisäystä hiekasta suuri osa jäi tankkiin. Osassa testeistä hiekkaa jouduttiin lisäämään suoraan tankin syöttöaukon yläpuolelle, jotta hiekkaa saatiin riittävän nopeasti suodattimeen.

Kun paine-ero suodattimen yli saavutti 3,5 baria, suljettiin järjestelmän syöttö, tyhjennettiin suodospuoli ja sen jälkeen rejektioitiin suodattimen sisältö rejektiosuodattimen läpi. Ennen pesua vaihdettiin rejektiosuodatin ja tämän jälkeen käynnistettiin pesujärjestelmä. Suodattimen pesuvaihe kesti noin 1,5 minuutin ajan ja pesussa irronnut hiekka kerääntyi rejektiosuodattimeen. Pesutehotesti suoritettiin jokaiselle hiekka-suodatusasteparille kerran, jolloin pesutehomittauksia tehtiin kaikkiaan kuusi kappaletta.

4.4.3. Tukkeumatestit

Tukkeumatestit suoritettiin samalla periaatteella kuin pesutehotestien tukkeuttamisosa. Testien suorituskaavio on liitteessä 4. Tällä kertaa jokainen suodatin testattiin kerran ja testeissä käytettiin hiekkasekoitusta, jossa oli tilavuusmittallisesti yhtä paljon 0,1-0,6 mm hiekkaa ja 0,5-1,6mm hiekkaa. Kun paine-ero ylitti 3,5 baria, testi lopetettiin. Tämän jälkeen tyhjennettiin suodospuoli ja avattiin rejektioventtiili, jotta suodatinsäiliö

saatiin kokonaan tyhjäksi. Tällä kertaa suodatinta ei kuitenkaan pesty, sillä tarkoituksena oli nähdä miltä suodatin näyttää, kun se on tukossa.

4.5. Puhtauden määrittämisen mittarit

Pesujärjestelmän pesutulosta voidaan arvioida luotettavasti kahdella tavalla, tutkimalla suodattimen paine-erokäyrää ennen suodatinkorin käyttöä ja käytön ja pesun jälkeen sekä tutkimalla suodatinkoria visuaalisesti ennen ja jälkeen. Paine-erokäyrä piirretään mittausohjelman tallentamisen tietojen pohjalta.

Näiden lisäksi voidaan tutkia miten hiekka liikkuu järjestelmässä. Vertaamalla testin aikana syötetyn hiekan määrää, sekä rejektiossa ja pesussa ulos tulleen hiekan määrää, pystytään arvioimaan sekoitussäiliön toimintaa ja toisaalta saadaan myös tietoa suodattimen liansitomiskyvystä. Tätä varten jokaisesta testistä kirjataan ylös testin aloituspiste (aika, kokonaistilavuusvirta), hiekanlisäyspisteet (aika, paine-ero, kokonaistilavuusvirta, lisätyn hiekan määrä), hetki (aika) jolloin paine-ero alkaa osoittaa merkkiä kasvun lähtemisestä sekä lopetuspiste (aika, paine-ero, kokonaistilavuusvirta).

5. Laborioritotestit ja niiden tulokset

Laborioritotestien kulku tallennettiin sähköiseen muotoon testien mittautiedostojen, mittauspöytäkirjan ja laborioritotestien lokikirjan muodossa. Lisäksi testien aikana on otettu kuvia eri testin vaiheista, jotta jälkepäin voidaan analysoida testien kulkua sekä määrittelemään mahdollisia kehityskohteita tulevia testejä silmällä pitäen. Tässä kappalessa esitellään nämä tiedostot ja käydään läpi testien kulku.

Laborioritotestien lokikirja löytyy liitteestä 5 ja mittauspöytäkirja liitteestä 6. Lokikirjaan on kirjattu kaikki suoritettut testit, niistä tallennetut tiedostot sekä mikä testi kussakin mittauksessa on ollut kyseessä. Testien aikana ongelmia aiheutti se, että mittausohjelma hävitti testitiedostoja eri mittauskertojen välillä. Myös nämä testit näkyvät testitapahtumien lokissa siten, että niiden tallennustiedoston kohdalla lukee ”ei tallennettua dataa”. Mittauspöytäkirjassa taas näkyvät kaikki testit, joista on kirjattu ylös hiekan lisäämispisteet ja hiekkajäämien määrät.

5.1. Suodatus- ja pesutestit

Suodatus- ja pesutestejä suoritettiin kaikille suodatinkoreille vähintään kaksi kappaletta. Toisessa testissä kiintoaineena oli 0,1-0,6 mm hiekkapuhallushiekka ja toisessa 0,5-1,6 mm hiekkapuhallushiekka. Taulukossa 5.1 on eritelty mittauksissa 1-8 käytetyn hiekan laatu, lisätyn hiekan määrä, rejektiossa suodatinkorista poistuneen hiekan määrä, pesussa irronneen hiekan määrä sekä tankista kerätyn hiekan määrä.

Taulukko 5.1. Pesu- ja suodatustesteissä käytetyn hiekan jakautuminen rejektioon, pesuun ja tankiin

Mittaus	suodatin (μm)	hiekkalaatu	Lisätty hiekka (g)	Rejektio (g)	Pesu (g)	Rejektio + pesu (g)	Tankki (g)	Yhteensä (g)
1	300	0,5-1,6mm	350	36	24	60	264	324
2	300	0,1-0,6mm	300	5,5	26	31,5	209	240,5
3	150	0,1-0,6mm	100	16,5	17	33,5	55,5	89
4	150	0,5-1,6mm	300	34,5	14	48,5	197,5	246
5	100	0,1-0,6mm	200	30	35,5	65,5	88	153,5
6	100	0,5-1,6mm	700	246	17,5	263,5	253	516,5
7	100	0,5-1,6mm	800	377	32	409	358,5	767,5
8	150	0,5-1,6mm	700	96,5	21	117,5	509	626,5

Rejektion ja pesun mukana irronnut hiekka kerättiin kuvan 5.1 mukaisille rejektiosuodattimille. Kuvassa oikealla näkyy rejektiotuotoksen kerännyt suodatin ja vasem-

malla pesutuotoksen kerännyt suodatinverkko. Verkko on samaa materiaalia kuin suodatinkorin sisempi verkko. Keräämisen jälkeen hiekan annettiin kuivua täysin tai se kuivattiin uunissa. Lopuksi hiekka punnittiin ja painot kirjattiin ylös.



Kuva 5.1. Mittauksen 1 pesutuotos (vas) ja rejektio.

Taulukosta 5.1 nähdään, että suurin osa hiekasta kerääntyi sekoitustankin pohjalle. Tämä nähdään myös kuvista, joita tankista on otettu ennen ja jälkeen mittauksien. Kuvassa 5.2 on vierekkäin kuvat, jotka on otettu tankista ennen mittausta kolme ja sen jälkeen.



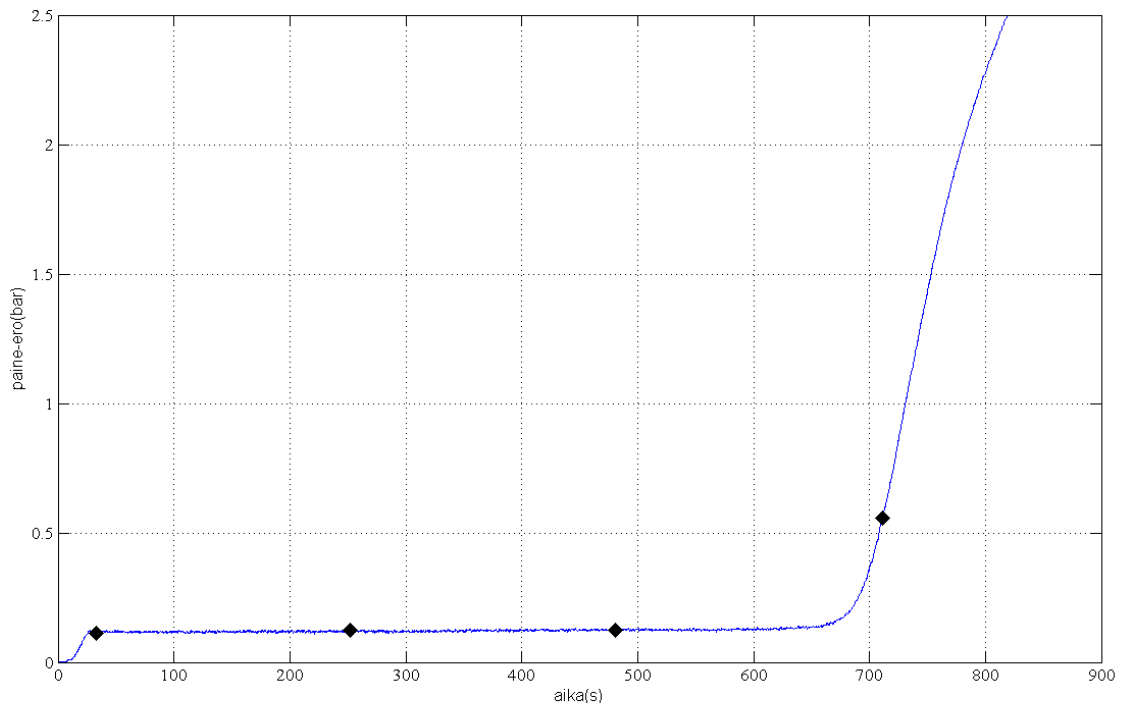
Kuva 5.2. Mittaus 3: Tankki ennen (vas) ja jälkeen

Kuten taulukosta 5.1 nähdään, tarvittiin mittauksen kolme suodattimen tukkimiseen vain 100 grammaa hiekkaa, ja tästä 55,5 grammaa löytyi tankin pohjalta. Tähän tulokseen virhettä tuo tankin tyhjentämisen hankaluus. Kaikkea hiekkaa ei saanut tankin poh-

jalta pois kohtuullisella vaivalla, joten, kuten kuvasta 5.2 nähdään, on tankissa aluksikin ollut hieman hiekkää. Tämä sama virhe toistuu kaikissa mittauksissa.

Kuvaajissa 1-6 on kuvattuna tukkeumakäyrä mittauksista 1-8 sikäli, kun mittauksen tallennustiedosto ei ole testien aikana hävinnyt. Kuvaajat on rajattu 0-2,5 bariin ja x-akselilla juoksee aika. Hiekanlisäyshetket merkattu pisteillä paine-erokäyrän päälle jolloin on helpompi seurata miten hiekan lisääminen vaikuttaa paine-eron kasvuun.

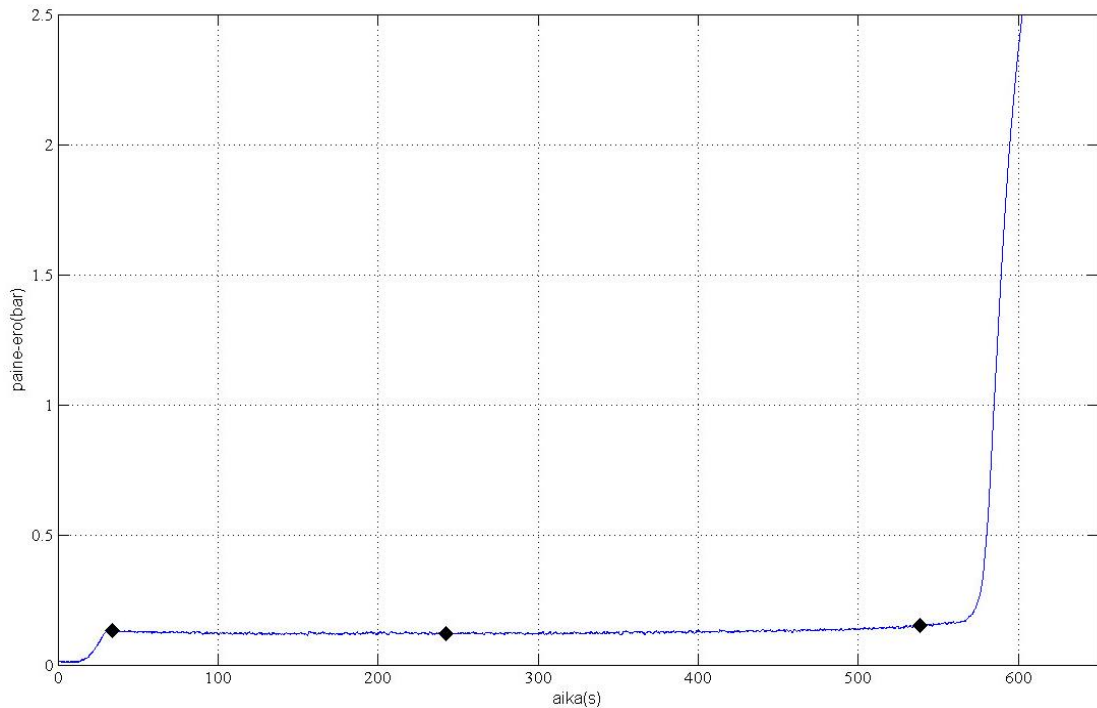
Mittaus 1 suoritettiin 300 μm suodattimelle 0,5-1,6 mm:n hiekalla. Tankkiin lisättiin yhteensä 350 grammaa hiekkää. Viimeinen hiekkalisäys oli vain 50 gramman suuruinen, koska suodattimen tukkeutuminen oli jo alkanut ja viimeisellä hiekkalisäyksellä haluttiin vain varmistaa, että paine-ero nousee riittävän suureksi. Kuvaajasta 5.1 nähdään tukkeumakäyrän muodosta, että suodatin toimii, kuten sen voidaan olettaakin toimivan. Samanlainen muoto on nähtävissä kuvan 3.6 käyrässä.



Kuvaaja 5.1. Tukkeumakäyrä 300 μm suodattimelle 0,5-1,6mm hiekalla

Alussa, kun suodattimen suodatuspinta-alasta on vielä suurin osa auki, paine-ero kasvaa hyvin hitaasti. Kun suodattimen suodatuspinta-alasta alkaa valtaosa olla tukossa, paine-eron kasvunopeus nousee, kunnes tapahtuu suodattimen tukkeutuminen ja paine-ero kasvaa yhtäkkiä ja jyrkästi. Vaikka tankkiin tehtiin viimeinen hiekkalisäys jo paine-eron lähdettyä nousuun, vaikuttaa kuvaajan yläpään muodon perusteella siltä, että nesteessä ei ole ollut riittävästi epäpuhtautta, jotta paine-erokäyrän nousu jatkuisi jyrkästi. Testin rejektiohiekkan paino oli 36 grammaa ja pesun myötä irronneen hiekan paino 24 grammaa.

Mittauksen 2 tukkeumakäyrä on kuvaajassa 5.2. Mittaus 2 suoritettiin 300 μm suodattimelle 0,1-0,6 mm:n hiekalla ja lisätyn hiekan määrä oli 300 grammaa, josta 5,5 grammaa tuli rejektion mukana ja 24 grammaa pesussa. Paine-erokäyrän muoto on tyyppillinen ja paine-ero lähti kasvuun vasta aivan juuri ennen suodattimen lopullista tukkeutumista. Tällä kertaa paine-ero myös jatkoi jyrkkää nousuaan, joten nesteessä oli riittävästi epäpuhtautta.



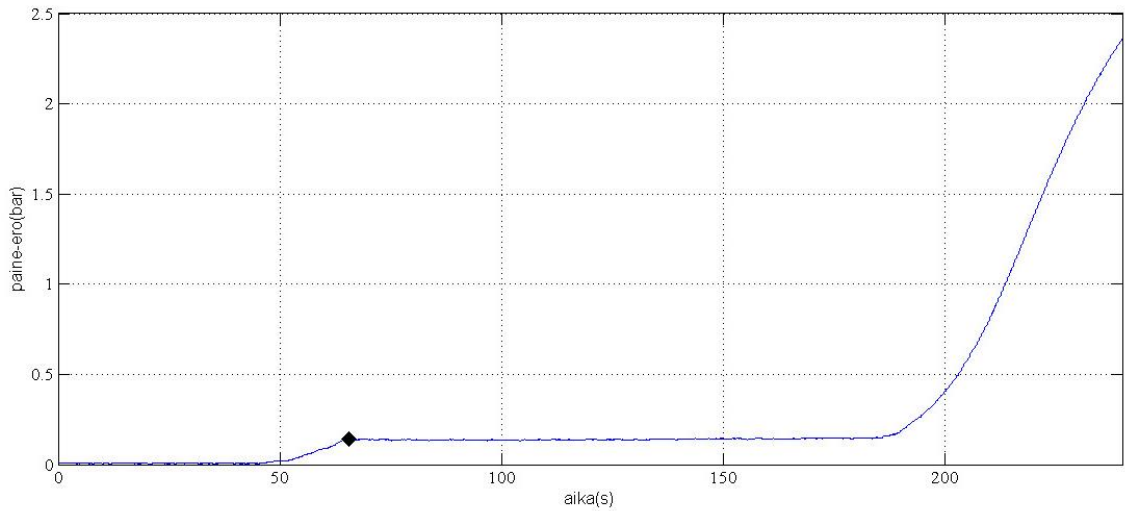
Kuvaaja 5.2. Tukkeumakäyrä 300 μm suodatin 0,1-0,6mm hiekalla

Mittauksessa 3 tarvittiin 150 μm suodattimen tukkimiseen vain 100 grammaa 0,1-0,6 mm raekoon hiekkaa. Mittauksen 3 alussa mittausohjelma oli hetken päällä ennen laitteiston käynnistämistä, josta syystä kuvaajan 5.3 alussa on tyhjää noin 45 sekuntia. Muuten käyrä noudattelee perinteistä kaavaa, vaikka jälleen aivan lopussa paine-eron nousu hidastuu ja käyrä alkaa loiventua. Rejektion massa oli 16,5 grammaa ja pesun mukana suodattimesta irtosi 17 grammaa hiekkaa.

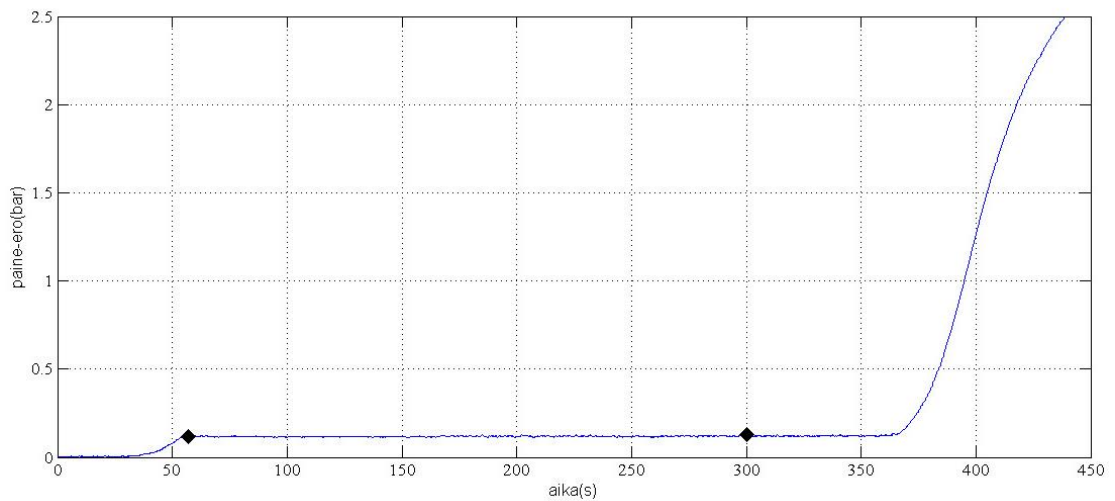
Mittaus 5 tehtiin 100 μm suodattimella ja hiekkana käytettiin 0,1-0,6 mm raekoon hiekkaa. Suodattimen tukkeutumiseen vaadittiin 200 grammaa hiekkaa, tosin vaikka tukkeumakuvaaja (kuvaaja 5.4) on tyyppillisen muotoinen, loivenee käyrä loppupäästään. Rejektionin mukana suodattimesta poistui 30 grammaa hiekkaa ja pesun mukana 35,5 grammaa.

Mittauksessa 7 kokeiltiin uudestaan tukkia 100 μm suodatinta 0,5-1,6 mm:n hiekalta. Testi aloitettiin normaalisti lisäämällä hiekkaa 100 gramman annoksina tankkiin aina, kun koko tankin nestetilavuus oli kiertänyt järjestelmän. Näin jatkettiin 400 grammaan asti, jonka jälkeen hiekkaa lisättiin 100 grammaa kerrallaan suoraan pumpun otto-

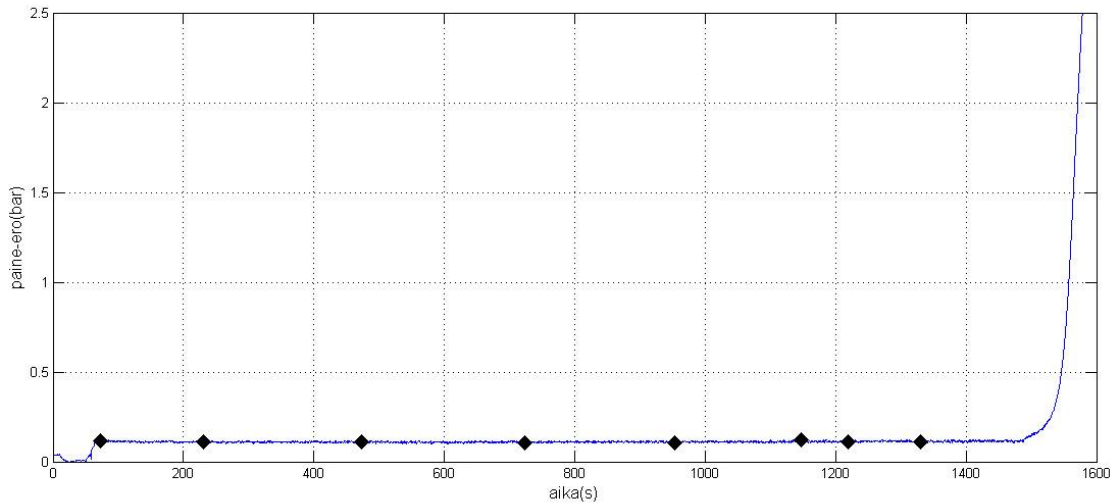
aukon yläpuolelle. Nämä hiekan lisäykset tehtiin tiheästi noin kahden minuutin välein. Loppujen lopuksi tankkiin lisättiin kaikkiaan 800 grammaa hiekkaa, josta rejektion mukana tuli ulos 377 grammaa ja pesun mukana 32 grammaa. Kuvaaja 5.5 on tämän mittauksen tukkeumakäyrä. Tukkeutuminen alkoi lopulta yhtäkkiä ja käyrään piirtyi jyrkkä nousu.



Kuvaaja 5.3. Tukkeumakäyrä 150 µm suodattimelle 0,1-0,6 mm hiekalla

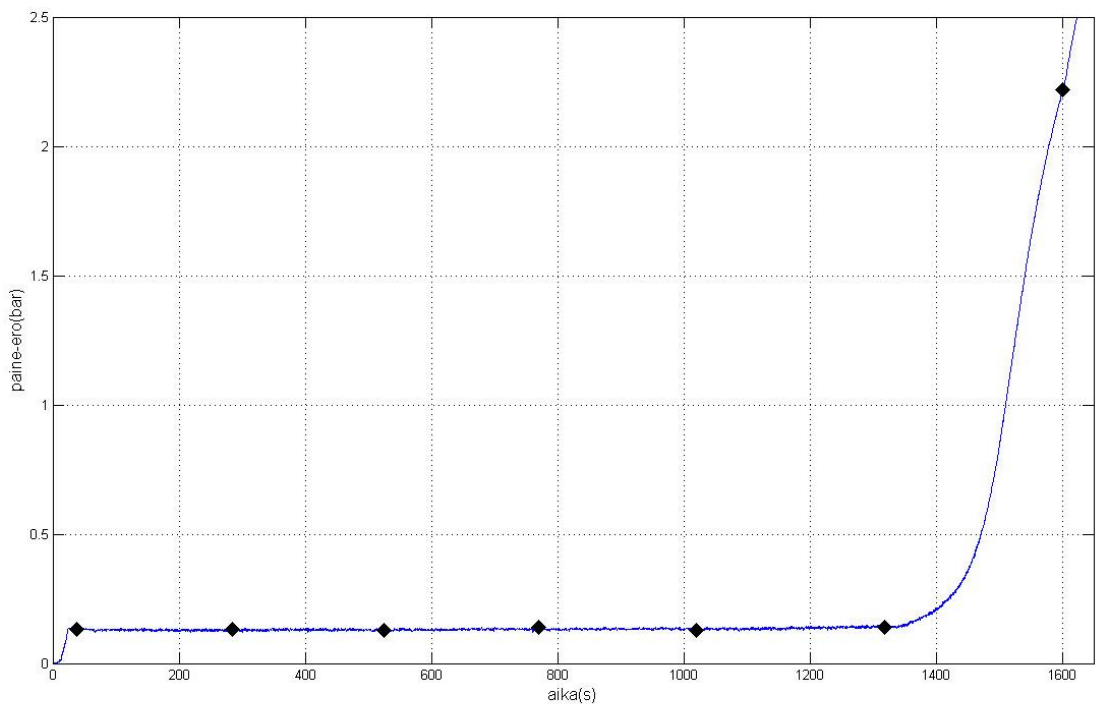


Kuvaaja 5.4. Tukkeumakäyrä 100 µm suodatin 0,1-0,6 mm hiekalla



Kuvaaja 5.5. Tukkeumakäyrä 100µm suodatin 0,5-1,6 mm:n hiekka

Mittaus 8 suoritettiin 150 µm suodattimelle ja hiekka oli raekooltaan 0,5-1,6 mm. Suodatin vaati tukkeutuakseen 700 gramman hiekkalisäykset. Näistä kuitenkin vain 96,5 grammaa tuli ulos rejektion mukana ja pesu irrotti 21 grammaa. Kuten taulukosta 5.1 nähdään, suurin osa hiekasta jäi tankin pohjalle. Kuvaaja 5.6 on mittauksen 8 tukkeumakäyrä ja muoto on tyypillinen tukkeumakäyrälle, joskin paine-ero ei lähde yhtä jyrkkään nousuun kuin esimerkiksi mittauksessa 7.

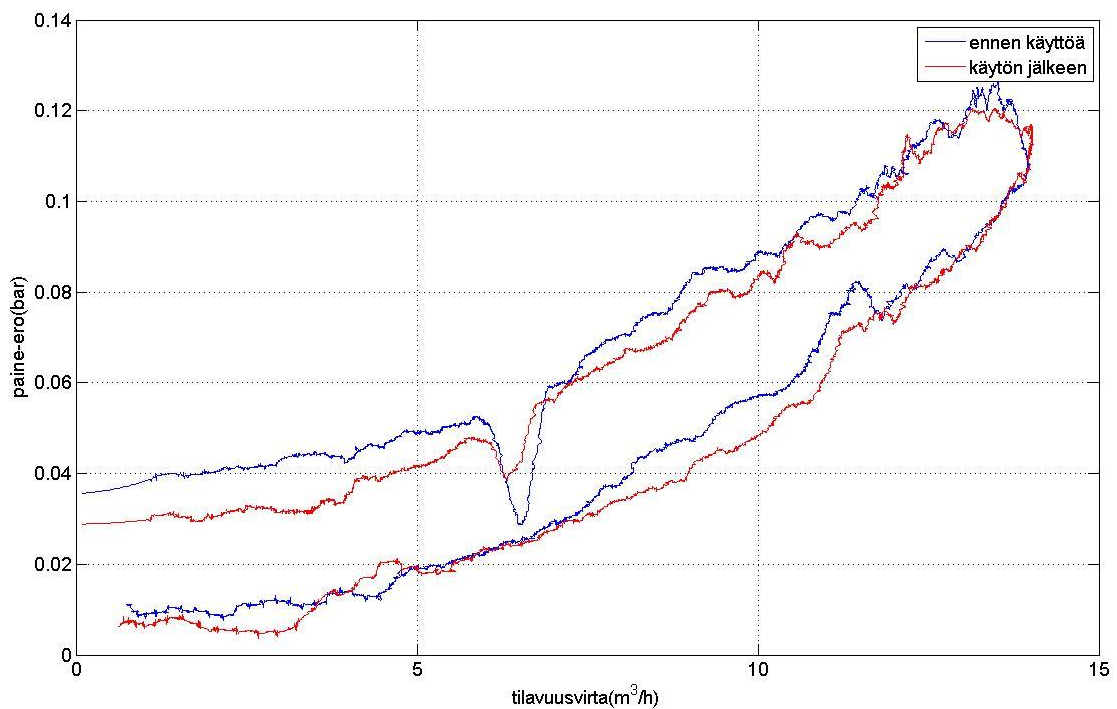


Kuvaaja 5.6. Tukkeumakäyrä 150 µm suodatin 0,5-1,6 mm:n hiekka

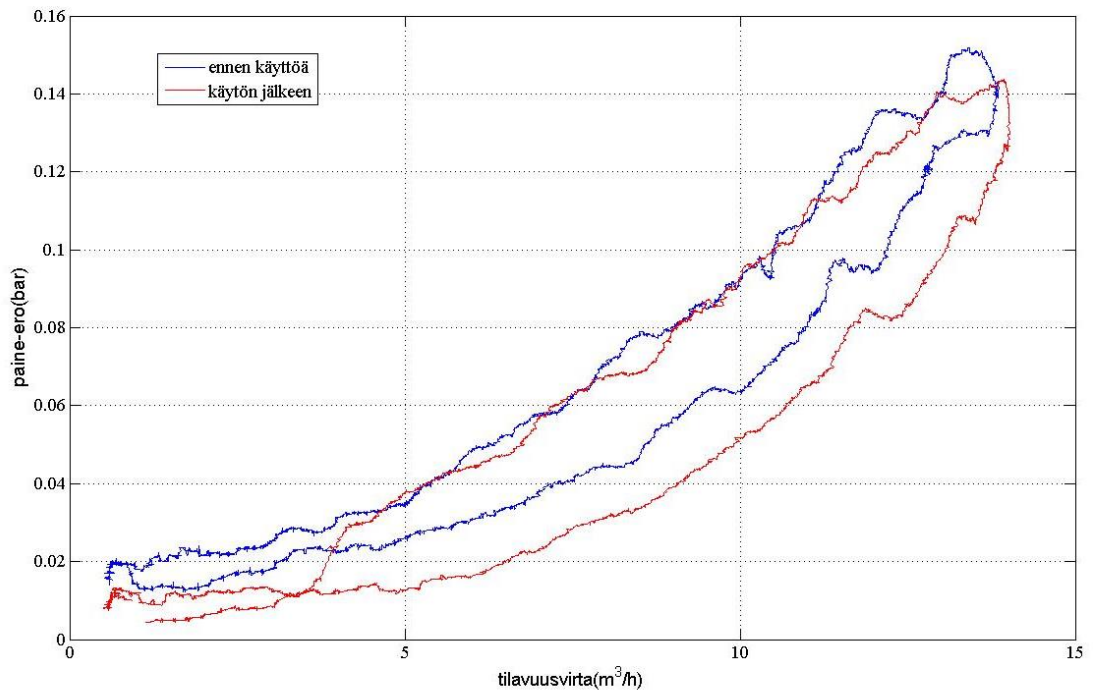
5.2. Suodatinkoreille määritellyt paine-erokäyrät

Suodatinkoreille suoritettiin mittauksia sekä ennen varsinaisia suodatus- ja pesutestejä sekä niiden jälkeen. Alkumittauksessa määritettiin paine-erokäyrä puhtaalle suodattimelle ja loppumittauksissa määritettiin paine-erokäyrä pesusyklin läpikäyneelle suodattimelle. Tämän lisäksi suodatinkoreille tehtiin tukkeumatesti, jonka jälkeen niitä ei pesy vaan ne purettiin likaisina. Näin saatiin selville miten epäpuhtaudet jakautuivat suodatinkorin sisällä ja pystyttiin vertaamaan tätä jakaumaa pestyjen korien epäpuhtausjakaumaan. Paine-erokäyrät esitetään siten, että ennen ja jälkeen kuvaaja ovat samassa kuvassa, jolloin niitä pystytään helposti vertailemaan. Käyrät on piirretty Matlab R2013b –ohjelmalla.

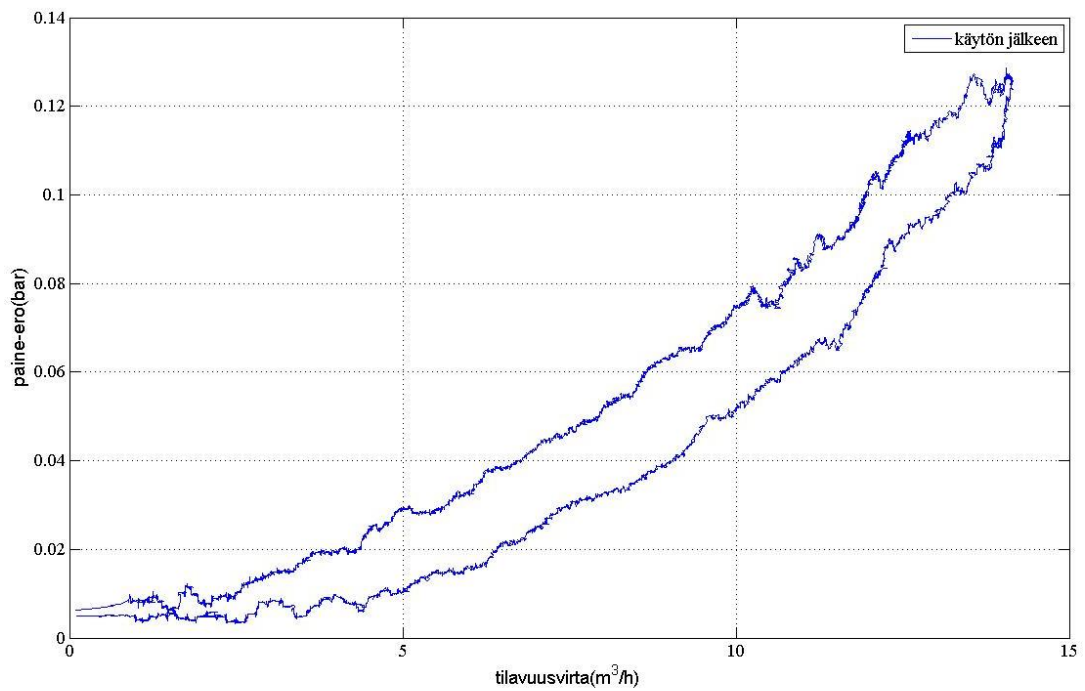
Paine-erotestin tuloksena saatiin 100 μm suodattimelle kuvaajan 5.7 mukaiset käyrät. Kuvaajasta nähdään, että nousevan tilavuusvirran ollessa 6-7 m^3/h tapahtuu paine-erossa romahdus. Kiinnostavaa on, että tämä sama romahdus tapahtuu molemmilla testikerroilla. Toisaalta jos verrataan 100 μm suodatinkorin paine-erokäyriä 150 μm suodatinkorin vastaaviin käyriin (kuvaaja 5.8), huomataan, että samanlaista romahdusta ei tule.



Kuvaaja 5.7. Paine-erokäyrä ennen ja jälkeen 100 μm suodatinkorille



Kuvaaja 5.8. Paine-erokäyrä ennen ja jälkeen 150 µm suodatinkorille



Kuvaaja 5.9. Pesun jälkeen määritetty paine-erokäyrä 300 µm suodatinkorille

Kuvaajassa 5.9 on esitetty 300 µm suodattimesta vain käytön jälkeinen paine-erokäyrä, sillä käyttöä edeltävä mittaustiedosto katosi tietokonevirheen vuoksi. Myös

hiekkia aiheutti haasteita mittausten alussa, joten tämä käyrä on mitattu, kun sekoitus-tankin syöttöpuolen pohjalla on ollut runsaasti hiekkaa. Hiekkojen puhdistuksen haastavuuden huomioon ottaen voidaan olettaa, että hiekkaa ei ole juurikaan lähtenyt säiliöstä liikkeelle veden mukana, mutta kuvaaja ei ole vertailukelpoinen muihin paine-erokuvaajiin. Kuvaajasta nähdään kuitenkin, että paine-ero palautuu käytön jälkeen hyvin samansuuntaisiin arvoihin kuin kahdella muulla suodattimella.

5.3. Visuaalisen tarkastelun tulokset

Suodatinpatruunat tutkittiin silmämääräisesti ja kuvattiin sekä pesutestien että tukkeumatestin jälkeen. Silmämääräisen tutkimisen tavoitteena oli selvittää miten hyvin pesu puhdistaa suodatinkorin ja puhdistuuko se tasaisesti. Kronologisesti tarkasteltuna kuvat on otettu siten, että suodatus- ja pesutestien jälkeen on otettu kuvat puhtaasta suodattimesta ja tämän jälkeen tehty tukkeumatesti, jonka jälkeen on kuvattu likainen suodatin. Koska tukkeumatestissä paine-eron annettiin nousta samalle tasolle kuin suodatus- ja pesutesteissä, voidaan tehdä varovainen oletus, että suodatin on tukkeumatestin jälkeen yhtä likainen kuin suodatus- ja pesutestin jälkeen. Lisäksi nähdään miten suodatinkori on puhdistunut pesussa. Kuvassa 5.3 on suodatinkori suodatus- ja pesusyklin jälkeen odottamassa kuvausta.

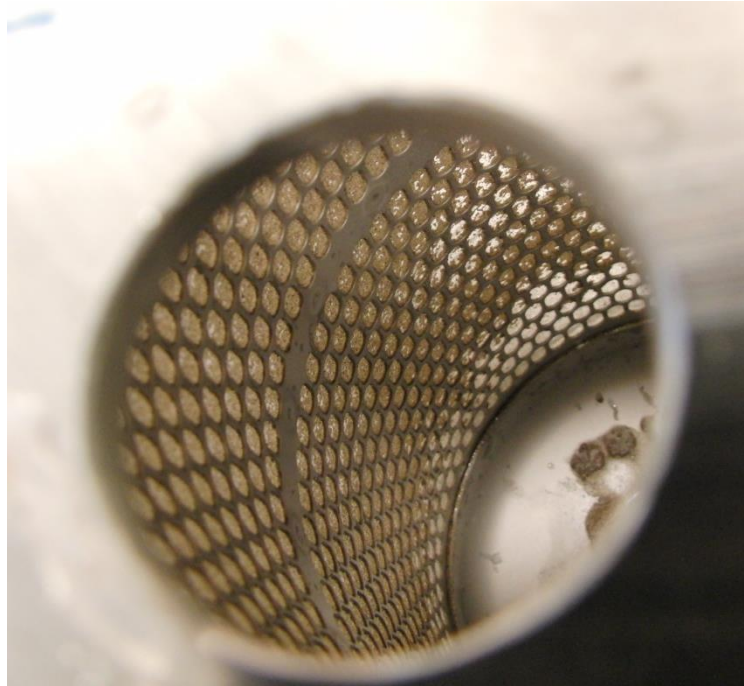


Kuva 5.3 Suodatinkori pesun jälkeen

Tutkitaan ensin 100 μm suodatinta tukkeumatestin jälkeen. Liitteessä 7 olevissa kuvissa on suodatinkori kuvattuna ulkopuolelta päin. Kuvista ensimmäinen on otettu suodatinkorin yläosasta ja toinen suodatinkorin alaosasta ja niissä näkyy kuinka suodatinverkko on tukossa laajoilta alueilta. Suodattimen likaisuus nähdään paremmin, kun tutkitaan kuva 5.4, jossa on kuvattu 100 μm suodatinkoria sisältä. Kuvassa näkyy hyvin,

kuinka korissa on lähes täysin tukossa olevia alueita ja toisaalta puhtaita alueita. Tukkeumatestin jälkeen suodatinkorista on täysin tukossa noin 80 %.

Liitteestä 8 voidaan tutkia kuvia, jotka on otettu 100 µm suodatinkorista pesun jälkeen. Liitteen ensimmäisessä kuvassa on korin yläosa kuvattuna lähietäisyydeltä. Toisessa kuvassa on vastaavasti korin alaosa. Kuvista nähdään, että suodatinkori on puhdistunut pääasiassa hyvin. Samalla on havaittavissa, että suodatinkorin yläreunassa on edelleen noin 5% virtausaukoista tukossa ja 100 µm suodatinkorissa epäpuhtaus keskittyy selvästi neljään ylimpään seulariviin.

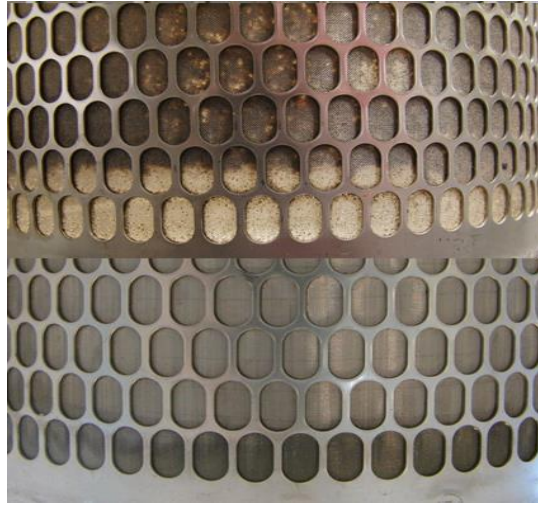


Kuva 5.4 100 µm suodatin sisältä tukkeumatestin jälkeen

Kun vastaavat tarkastelut tehdään 150 µm suodattimelle, nähdään että liitteessä 9 olevissa tukkeumatestien jälkeisissä kuvissa epäpuhtaudet ovat jakautuneet hieman epätasaisemmin. Ensimmäinen kuva on otettu suodatinkorin yläosasta, toinen kuva on suodatinkorin keskiosasta ja kolmas kuva suodatinkorin alaosasta. Kuvissa näkyy hyvin kuinka sekä aivan suodatinkorin yläosassa että alaosassa kori on erittäin tukossa. Toisaalta korin kaksi alinta seulariviä ovat lähes puhtaat. Kaiken kaikkiaan suodattimen virtauspinta-alasta noin 95% on hiekkakerroksen peitossa.

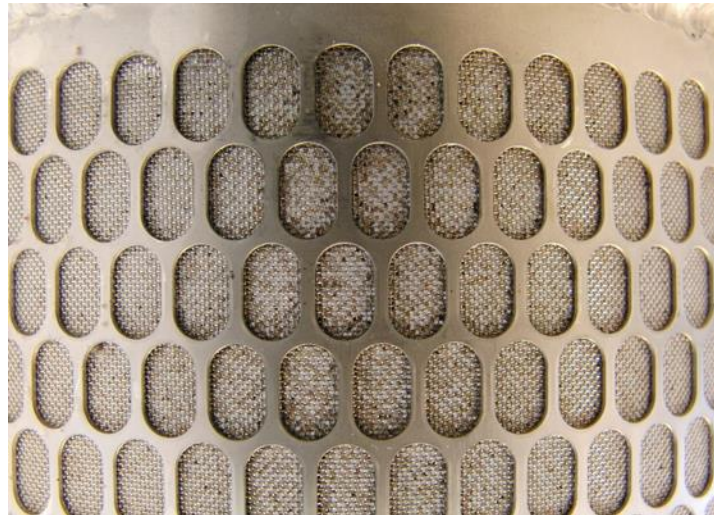
Pesusyklin läpikäynyttä 150 µm suodatinkoria voidaan tarkastella liitteen 10 kuvista. Ensimmäinen kuva on otettu suodatinkorin yläosasta ja toinen kuva suodatinkorin alaosasta. Samoin kuin 100 µm suodatinkorilla, on 150 µm suodatinkorissa selkeä ero korin puhtaudessa yläosan ja alaosan välillä. Yläosan kuvaa tarkastellessa on havaittavissa, että virtausaukkoista noin 1-5% on tukossa koko suodatinkorin yläosan matkalla. Toisaalta kuvasta nähdään, ja silmämääräinen tarkastelukin sen vahvasti, että korin yläosan keskivaiheilla on yksi seularivi, joka on selkeästi enemmän tukossa kuin ympärillä olevat seularivit. Tämä viittaa siihen, että pesusuuttimien pesuteho on ollut tässä kohdassa heikentynyt. Siihen on voinut vaikuttaa esimerkiksi suuttimen tukkeutuminen, sillä

suuttimiin tuleva vesi tulee suoraan vesijohtoverkosta eikä sitä suodatettu. Suodatinkorin alaosa sen sijaan vaikuttaa, ja kuva 5.5 tämän myös vahvistaa, puhdistuneen pesussa erittäin hyvin.



Kuva 5.5 150 µm suodatinkorin alaosan vertailua ennen pesua (ylempi) ja pesun jälkeen.

Lopuksi tutkitaan vielä 300 µm suodatinkoria. Liitteessä 11 on tukkeumatestin jälkeä otettuja kuvia. Kuvat osoittavat saman kuin kahden muunkin suodattimen kohdalla eli suodatin on laajasti tukossa ylhäältä alas, mutta hiekkapeite ei ole yhtä paksu kuin muilla koreilla. Pesusyklin jälkeen suodatin on puhdistunut, mutta kuten kuvasta 5.6 voi huomata, varsinkin suodatinkorin yläosassa on edelleen paljon epäpuhtautta.



Kuva 5.6 300 µm suodattimen yläreuna pesun jälkeen.

Tämä nähdään myös liitteen 12 kuvista, joista voidaan todeta, että suodattimen alaosa on puhdistunut pesussa hyvin, mutta suodattimen yläosassa on paikoin jopa 20-30 % virtauspinta-alasta tukossa. Paine-erokäyrien valossa tämä ei ole ongelma, sillä paineero palaa normaalille tasolle pesun jälkeen. Mikäli kuitenkin suodattimeen kertyy lisää likaa jokaisen pesusyklin myötä, muodostuu tämä ongelmaksi jossain vaiheessa.

6. Johtopäätökset ja kehitysehdotukset

Työn tavoitteena oli selvittää miten AF-12 automaattisuodattimen prototyypin pesusykli toimii suodatinkorin puhtauden näkökulmasta. Asiaa tutkittiin suorittamalla suodatinkoreille sarja suodatus- ja pesutestejä, joiden lopputuloksena koreille määriteltiin painehäviökäyrät ja niiden puhtautta arvioitiin silmämääräisesti.

Jos suodattimen puhtautta arvioidaan ainoastaan ennen mittauksia ja mittausten jälkeen tehtyjen paine-erokäyrien perusteella, voidaan todeta, että 100 µm ja 150 µm suodatinkorit ovat puhdistuneet käytön jälkeen suoritettussa pesussa, sillä paine-ero palautuu molemmissa alun tasolle pesun jälkeen. Sen sijaan 300 µm suodatinkorin puhdistumisesta ei pystytä tekemään johtopäätöksiä paine-erokäyrien avulla verrokkikäyrän puuttuessa. Paine-erokäyrien lisäksi suodatinkorien puhdistumista voidaan arvioida tutkimalla niitä silmämääräisesti. Silmämääräinen tarkastelu paljastaa, että kaikki suodatinkorit pääsääntöisesti puhdistuivat pesun myötä.

Koreihin jääneet epäpuhtaudet voivat kuitenkin muodostua ongelmaksi, mikäli ne jatkavat kasaantumista toistuvien pesujen jälkeen. Mikäli näin käy, alkaa suodattimen käyttöaika ja siten pesuväli ennen pitkää lyhentyä. Tämä taas vaikuttaa järjestelmän toimintaan ja kunnossapitokustannuksiin, jos suodatinkoria joudutaan purkamaan manuaalista puhdistusta varten tai vaihtamaan useammin kuin alun perin on ollut tarkoitus. Järjestelmän puhdistumista saa tutkittua parhaiten pitkän suodatustestin kautta. Suodatinprototyypin seuraavan kehitysversion tutkimuksissa pitäisikin keskittyä tutkimaan tämän epäpuhtauden vaikutusta järjestelmän toiminnalle. Toistamalla suodatus- ja pesusykli esimerkiksi kymmenen kertaa, voidaan arvioida suodattimen puhtautta jälleen paine-erokäyrän avulla ja tutkimalla suodatin silmämääräisesti.

Nyt tehdyissä testeissä löydettiin joitakin ongelmakohtia, jotka tulevaisuudessa tulee ottaa huomioon. Ensimmäinen ilmi tullut ongelma oli hiekan sekoittuminen veteen ja ennen kaikkea veden kyky kannatella hiekkaa. Hiekka vajosi tankin syöttöpuolella välittömästi pohjaan, kun taas tankin sekoituspuolella hiekka pysyi hyvin sekoittuneena veteen. Helpoin ratkaisu ongelmaan on tankin väliseinän poistaminen, jolloin tankissa oleva sekoitin sekoittaa koko tankin vesimassaa.

Toinen testeissä ilmennyt ongelma oli hiekan annostelu säiliöön. Nyt tehdyissä testeissä päädyttiin vaihtamaan hiekan annostelumenetelmä siten, että hiekkaa lisättiin 100 gramman annoksina aina kun kokonaistilavuusvirta kasvoi kuutiolla. Tilavuusvirran pienentyessä paine-eron kasvun myötä hiekan lisäämistahti hidastui. Vaikka tällä tavalla suodattimet saatiin tukkoon, niin tukkeumakäyrä lähti loppupäässä loivenemaan, joka ei ole tyyppillistä, mikäli järjestelmässä riittää epäpuhtautta. Tästä syystä hiekka-annokset kannattaa lisätä järjestelmään tietyin aikavälein riippumatta siitä millainen järjestelmän paine-ero tai tilavuusvirta kullakin hetkellä on. Aikaväli pitää valita siten, että sen ajan kuluessa voidaan olettaa koko nestetilavuuden kulkeneen suodattimen läpi ja siten kaiken epäpuhtauden jääneen suodattimeen. Tähän sopiva aika on nykyisellä 14 m³/h vir-

tauksella noin 4-5 minuuttia. Mikäli tankista poistetaan väliseinä, voi hiekka-annoksen suuruutta pienentää, sillä suodatinkorin tukkeutumiseen tarvitaan oletettavasti vähemmän tankkiin lisättyä hiekkaa, kun kaikki, tai lähes kaikki, lisätty hiekkaa lähtee liikkeelle järjestelmään.

Suodatinkorin puhdistumisen kannalta on oleellista, että pesusuuttimet toimivat moitteettomasti. Ennen seuraavia testejä tulee selvittää onko joku suuttimista tukossa ja voiko se selittää suodatinkoreihin jääneet epäpuhtaudet. Mikäli suuttimet tukkeutuvat käytössä, tulee analysoida suuttimen tukkeutumisen riskit ja kuinka vakavasti niihin tulee suhtautua.

Tätä diplomityötä varten tehtyjen testien tulkitsemiseen epävarmuutta ja virhettä loi erityisesti vähäinen tehtyjen testien määrä. Toisaalta testeissä ehdottomasti aikaa vievin osuus oli suodatinkorien vaihto tankin puhdistamisineen. Nämä seikat huomioon ottaen jatkossa on suositeltavaa suorittaa kullakin suodatinkorilla useampi suodatus- ja pesu-testisykli ennen hiekan tai suodatinkorin vaihtoa, jolloin pidemmät testipätkät ja useammat suodatustestit antavat paremman kuvan pitkäaikaisen käytön vaikutuksia suodatimeen. Lisäksi paine-erokäyrä tulee mitata myös eri hiekkalaatujen välissä kullakin suodattimella. Näin saadaan paine-erokäyrädataa ennen suodatinkorin käyttöä, karkean hiekan käytön jälkeen ja hienon hiekan käytön jälkeen. Mittausjärjestyksen tulee olla juuri tämä, sillä karkea hiekka tarttuu koriin huomattavasti nopeammin kuin hieno hiekka, jolloin suodatinkori on aina testin alussa mahdollisimman puhdas.

Myös itse suodatuslaitteiston kokoonpanossa oli haasteita. Kuten todettua, suodatinkorin vaihtaminen oli yksittäisenä toimenpiteenä ehdottomasti aikaa vievin työvaihe mittauksissa. Korin vaihtoon tarvittiin kahta työntekijää ja lisäksi komponenttien yhteensopivuudessa oli haasteita. Kasaamista hidasti esimerkiksi se, että suodatinkoria pyörittävän akselin tapit ja suodatinkorissa tappeja vastanneet reiät eivät olleet samoilla mitoilla ja toleransseilla valmistettuja. Kehitysversion suunnittelussa tulee kiinnittää huomiota mahdollisten huoltotoimien helppouteen.

Vaikka testeissä olikin haasteita ja kehitettävää löytyy, niin testeistä saatiin vastaus niihin kysymyksiin, joihin vastauksia etsittiin ja tästä näkökulmasta testit onnistuivat hyvin. Hyvin suunnitelluilla jatkotutkimuksilla saadaan varmasti lisää vastauksia suodattimen pesutapahtuman tehoon ja kehitettyä tuotetta jälleen eteenpäin.

Lähteet

- [1] Avedon - Capital partners Filtration industry study . Avedon Capital Partners. [viitattu 20.6.2014]. Saatavissa: <http://avedoncapital.nl/>.
- [2] Sutherland, K. Section 1 - Basic Principles. In: Sutherland, K. (ed.). Filters and Filtration Handbook (Fifth Edition). Oxford 2008, Elsevier. pp. 1-40.
- [3] Strategy Train Koulutusmateriaali - Strateginen diagnostiikka. 2009. [viitattu 25.6.2014]. Saatavissa: <http://www.strategy-train.eu/index.php?id=97&L=2>.
- [4] Eaton Mechanically Cleaned Filter DCF-2000. [viitattu 25.6.2014]. Saatavissa: <http://www.eaton.com/Eaton/ProductsServices/Filtration/AutomaticSelfCleaning/MechanicallyCleanedFilters/index.htm>.
- [5] Eaton. Eaton model 2596 Automatic Self-cleaning Strainers 2"-8". [viitattu 31.12.2013]. Saatavissa: <http://www.eaton.com/Eaton/ProductsServices/Filtration/AutomaticSelfCleaning/Model2596CastandFabricatedPipelineStrainers/index.htm>.
- [6] Fluid engineering Automatic Self-Cleaning Strainer/filter systems. [viitattu 21.7.2014]. Saatavissa: http://www.fluideng.com/PDF/Automatic_Strainers.pdf.
- [7] Eaton Eaton Tubulas Backwash Filters AFC-series. [viitattu 21.07.2014]. Saatavissa: <http://www.eaton.com/Eaton/ProductsServices/Filtration/AutomaticSelfCleaning/TubularBackwashingFilters/AFC/index.htm>.
- [8] Walker, W.H., Lewis, W.K., McAdams, W.H. & Gilliland, E.R. Principles of Chemical Engineering. Third edition ed. New York 1937, McGraw-Hill, Inc. 749 p.
- [9] Tien, C. 1 - Introduction. In: Tien, C. (ed.). Principles of Filtration. Amsterdam 2012, Elsevier. pp. 1-6.
- [10] Donaldson Filtration Solutions. HEPA Filtration Facts. [viitattu 24.6.2014]. Saatavissa: <http://www.donaldson.com/en/aircraft/support/datalibrary/042665.pdf>.
- [11] Xygenium. Hepa- ja Ulpa -suodattimet. [viitattu 24.6.2014]. Saatavissa: <http://oxygenium.pro/puhdistustekniikat/hepa-ja-ulpa-suodatus/>.
- [12] Kauranne, H., Kajaste, J. & Vilenius, M. Hydraulitekniikan perusteet. 3. painos ed. Vantaa 2000, WSOY. 346 p.
- [13] Spinea Oy. Vakiokudotut metalliverkot. [viitattu 25.6.2014]. Saatavissa: http://www.spinea.fi/terakset/pdf/spinea_varasto-ohjelmat_kudotut_metalliverkot.pdf.

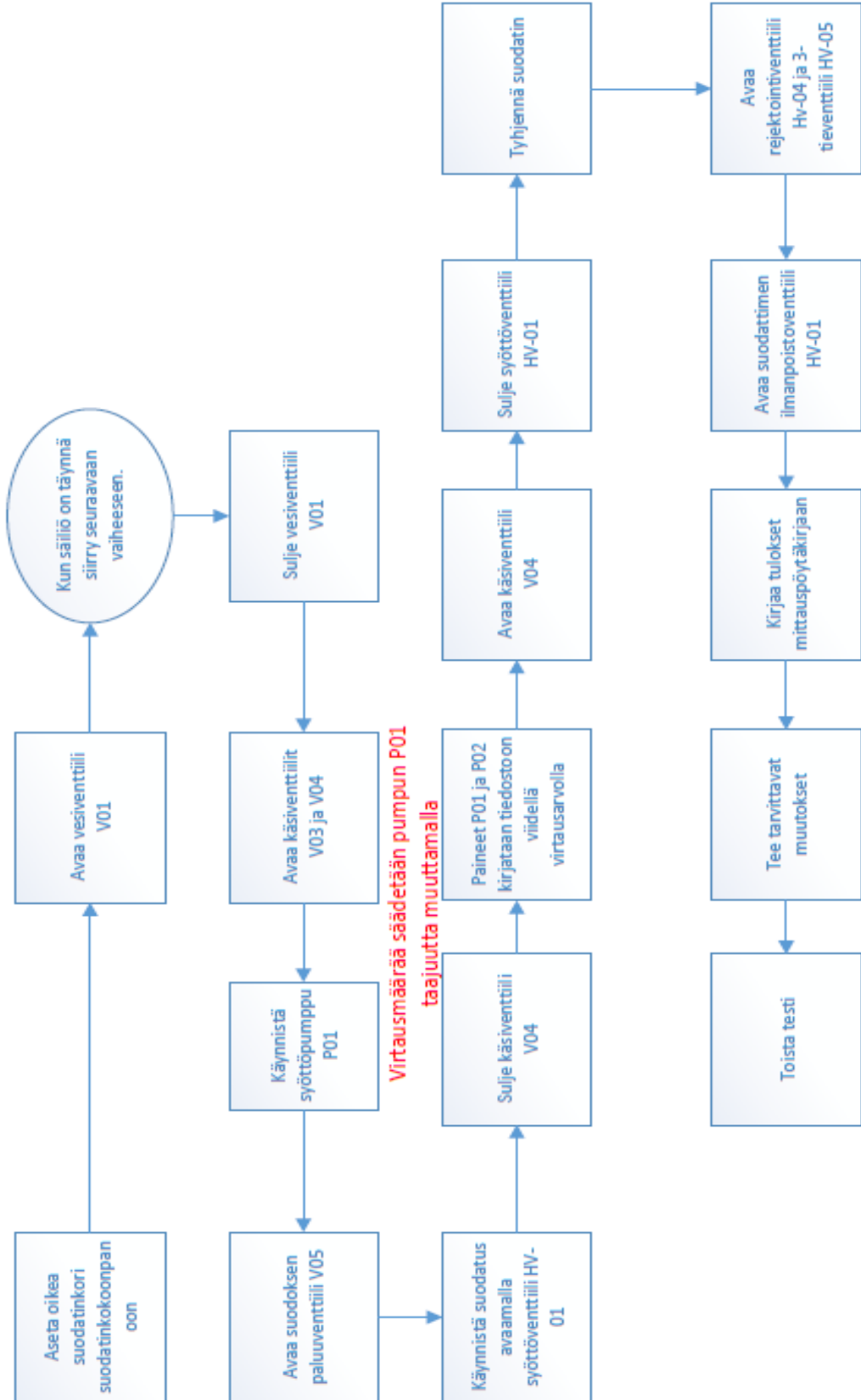
Liitteet

Liite 1: Kuvan 4.1 kaavion komponenttilistaus

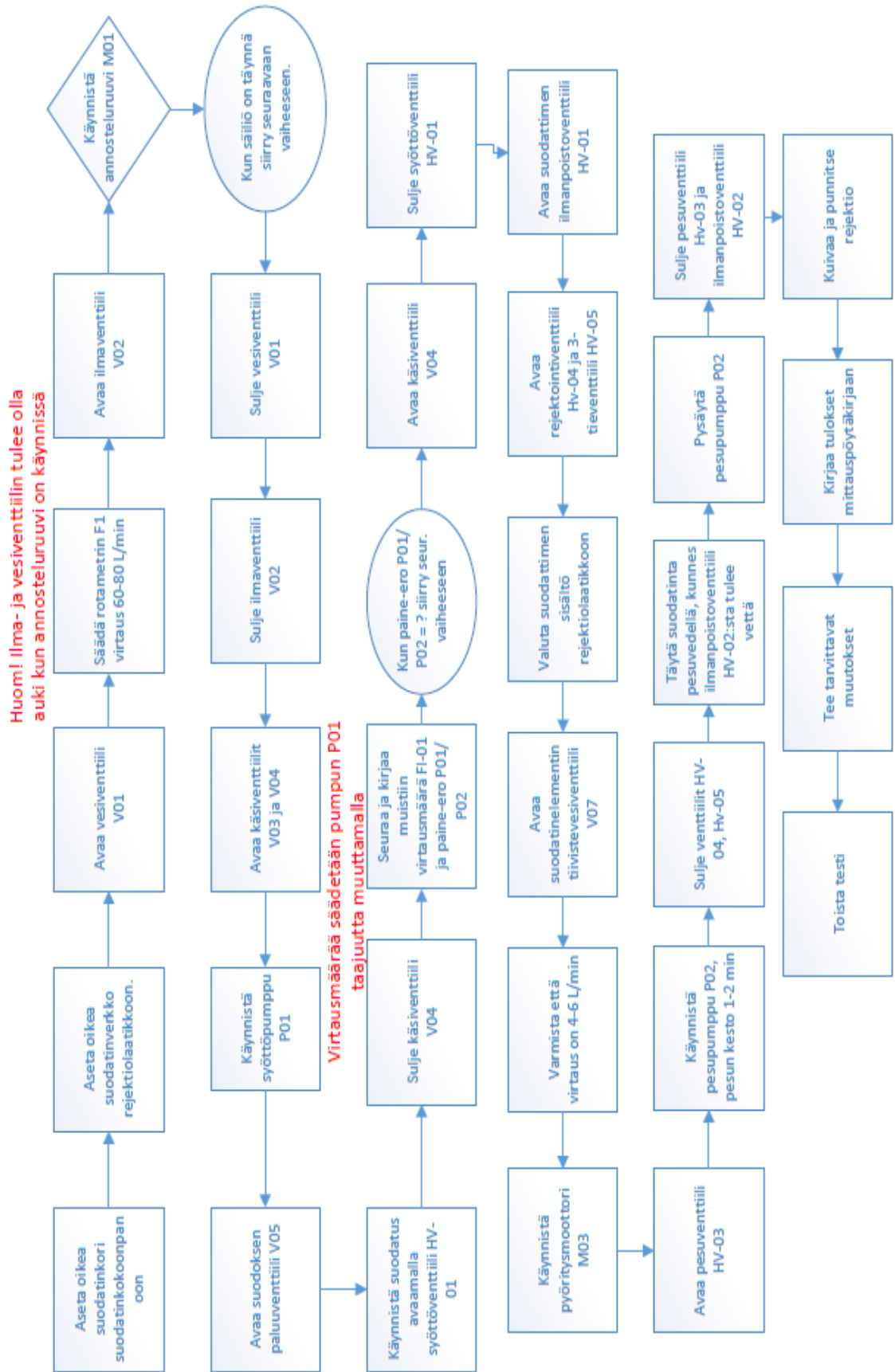
Venttiilit

V01	Vesiventtiili
V02	Ilmaventtiili
V03	Säiliön tyhjennysventtiili
V04	Vapaakierron käsiventtiili
V05	Suodospuolen käsiventtiili
V06	Käsiventtiili
V07	Tiivistevesiventtiili
HV-01	Syöttöventtiili
HV-02	Ilmanpoistovenntiili
HV-03	Pesuventtiili
HV-04	Rejektioventtiili
HV-05	Suodospuolen tyhjennysventtiili
M02	Sekoitussäiliön sekoittimen moottori
M03	Suodatinkoria pyörittävä moottori
P01	Testilietteen syöttöpumppu
P02	Pesuveden syöttöpumppu
PI-01	Painemittari 1
PI-02	Painemittari 2
FI-01	Tilavuusvirtamittari

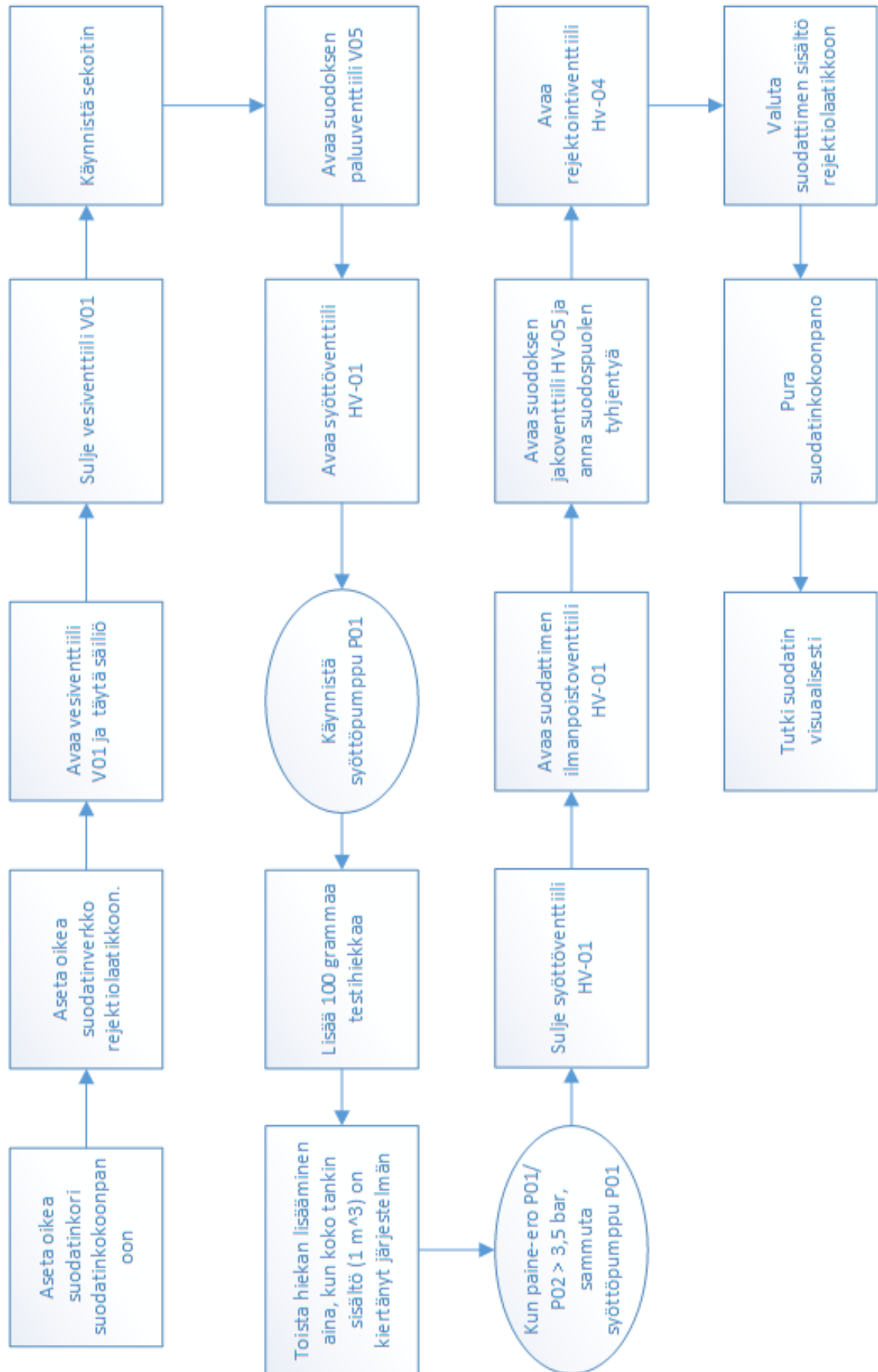
Liite 2 Paine-erokäyrätestin suorituskaavio



Liite 3 Suodatus- ja pesutestien suorituskaavio



Liite 4 Tukkeumatestin suorituskaavio



Liite 5 Laboratoriotestien lokikirja

Pvm	Testitapahtuma	Tallennustiedosto	Lisätietoja
10.4.14	Paine-erokäyrä	Painehaviotesti 2.ASC	150 µm / ennen
	Paine-erokäyrä	Painehaviotesti 3.ASC	150 µm/ ennen
	Tukkimistesti	suodatustesti 4.ASC	150 µm / raekoko 0,1-0,6mm
16.4.14	Paine-erokäyrä	ei tallennettua dataa	300 µm / ennen
	Tukkimistesti+pesu	Suodatustesti 5.ASC	300µm / raekoko 0,5-1,6mm
	Tukkimistesti+pesu	ei tallennettua dataa	300µm / raekoko 0,5-1,6mm
29.4.14	Laitteiston testausta	Suodatustesti 6.ASC	
	Paine-erokäyrä	Suodatustesti 8.ASC	300 µm / jälkeen
	Tukkimistesti+pesu	Suodatustesti 10.ASC	Mittaus 1 / 300 µm / raekoko 0,5-1,6 mm / sis pesu
	Tukkimistesti	Suodatustesti 9.ASC	Mittaus 2 / 300 µm / raekoko 0,1-0,6 mm
	Pesutesti	suodatustesti 11.ASC	Mittaus 2 pesu
7.5.14	Paine-erokäyrä	Suodatustesti 12.ASC	150 µm / ennen
	Paine-erokäyrä	Suodatustesti 13.ASC	150 µm / ennen
	Tukkimistesti	Suodatustesti 14.ASC	Mittaus 3 / 150 µm / raekoko 0,1-0,6 mm
	Pesutesti	Suodatustesti 15.ASC	Mittaus 3 pesu
8.5.14	Tukkimistesti	ei tallennettua dataa	Mittaus 4 / 150 µm / raekoko 0,5-1,6 mm
	Pesutesti	ei tallennettua dataa	Mittaus 4 pesu
12.5.14	Paine-erokäyrä	Suodatustesti 17.ASC	100 µm / ennen
	Paine-erokäyrä	Suodatustesti 18.ASC	100 µm / ennen
	Tukkimistesti	Suodatustesti 19.ASC	Mittaus 5 / 100 µm / raekoko 0,1-0,6
	Pesutesti	Suodatustesti 20.ASC	Mittaus 5 pesu
13.5.14	Tukkimistesti	ei tallennettua dataa	Mittaus 6 / 100µm / raekoko 0,5-1,6 mm
	Pesutesti	ei tallennettua dataa	Mittaus 6 pesu
15.5.14	Pyöritysmoottoritest	Suodatustesti 22. ASC	Testi 1
	Pyöritysmoottoritest	Suodatustesti 25.ASC	Testi 2
	Pyöritysmoottoritest	Suodatustesti 26.ASC	Testi 3
21.5.14	Laitteiston testausta	Suodatustesti 27.ASC	
	Paine-erokäyrä	Suodatustesti 28.ASC	100 µm / jälkeen
	Laitteiston testausta	Suodatustesti 29.ASC	
	Paine-erokäyrä	Suodatustesti 30.ASC	100 µm / jälkeen
	Tukkimistesti	Suodatustesti 31.ASC	100 µm / raekoko 0,1-1,6 mm / ILMAN pesua.
	Tukkimistesti	Suodatustesti 32.ASC	300 µm / raekoko 0,5-1,6 mm
	Pesutesti	Suodatustesti 33.ASC	ed. mittauksen pesu

22.5.14	Tukkimistesti	Suodatustesti 35.ASC	300 µm / raekoko 0,1-1,6 mm / ILMAN pesua
	Tukkimistesti	Suodatustesti 36.ASC	150 µm / raekoko 0,5-1,6 mm
	Pesutesti	Suodatustesti 37.ASC	ed.testin pesu
	Paine-erokäyrä	suodatustesti 40.ASC	150 µm / jälkeen
	Paine-erokäyrä	suodatustesti 41.ASC	150 µm / jälkeen
	Tukkimistesti	Suodatustesti 42.ASC	150 µm / raekoko 0,1-1,6 mm / ILMAN pesua
26.5.14	Tukkimistesti + pesu	suodatustesti 43.AC	Mittaus 7 / 100 µm / raekoko 0,5-1,6mm / sis pesu
27.5.14	Tukkimistesti	suodatustesti 45.ASC	Mittaus 8 / 150µm / raekoko 0,5-1,6mm

Liite 6 Laboratoriotestien mittauspöytäkirja

Mittaus 1		300 µm/0,5-1,6 mm			
	Q_kok	Hiekkalisäys	Aika		
1	124,4	100	14:51		
2	125,4	100	14:55		
3	126,4	100	14:59		
4	127,4	50	15:04		
Testi loppui	128,3	350,00	15:13	Rejektio (g) 36	Pesu (g) 24
Paine-ero alkoi kasvaa 15:02					
Mittaus 2		300 µm /0,1-0,6mm			
	Q_kok	Hiekkalisäys	Aika		
1	129,3	100	9:47		
2	130,3	100	9:51		
3	131,3	100	9:56		
Testi loppui	131,8	300	10:04	Rejektio (g) 5,5	Pesu (g) 26
Mittaus 3		150µm/0,1-0,6mm			
	Q_kok	Hiekkalisäys	Aika		
1	134	100	14:19		
Testi loppui	134,9	100	14:25	Rejektio (g) 16,5	Pesu (g) 17
Mittaus 4		150µm/0,5-1,6mm			
	Q_kok	Hiekkalisäys	Aika		
1	136,3	100	10:31		
2	137,3	100	10:35		
3	138,3	100	10:39		
Testi loppui	139,6	300	10:45	Rejektio (g) 34,5	Pesu (g) 14

Mittaus 5		100 µm/0,1-0,6mm			
	Q_kok	Hiekkalisäys	Aika		
1	140,6	100	12:50		
2	141,6	100	12:55		
Testi loppui	142,3	200	12:56	Rejektio (g) 30	Pesu (g) 35,5
Mittaus 6		100µm/0,5-1,6mm			
	Q_kok	Hiekkalisäys	Aika		
1	143	100	12:40		
2	144	100	12:45		
3	145	100	12:49		
4	146	100	12:53		
5	147	100*	12:57		
6	148	100*	13:01		
7	149	100*	13:06		
Testi loppui		700		Rejektio (g) 246	Pesu (g) 17,5
Testi keskeytettiin, koska paine-ero ei lähtenyt kasvamaan.					
*) Hiekka lisättiin suoraan pumpun ottoaukon yläpuolelle					
Mittaus 7		100µm/0,5-1,6mm			
	Q_kok	Hiekkalisäys	Aika		
1	164,9	100	10:00		
2	165,9	100	10:04		
3	166,9	100	10:08		
4	167,9	100	10:12		
5	168,9	100*	10:16		
6	169,4	100*	10:18		
7	169,9	100*	10:20		
8	170,4	100*	10:22		
Testi loppui	170,8	800	10:25	Rejektio (g) 377	Pesu (g) 32

Mittaus 8

150µm/0,5-1,6mm

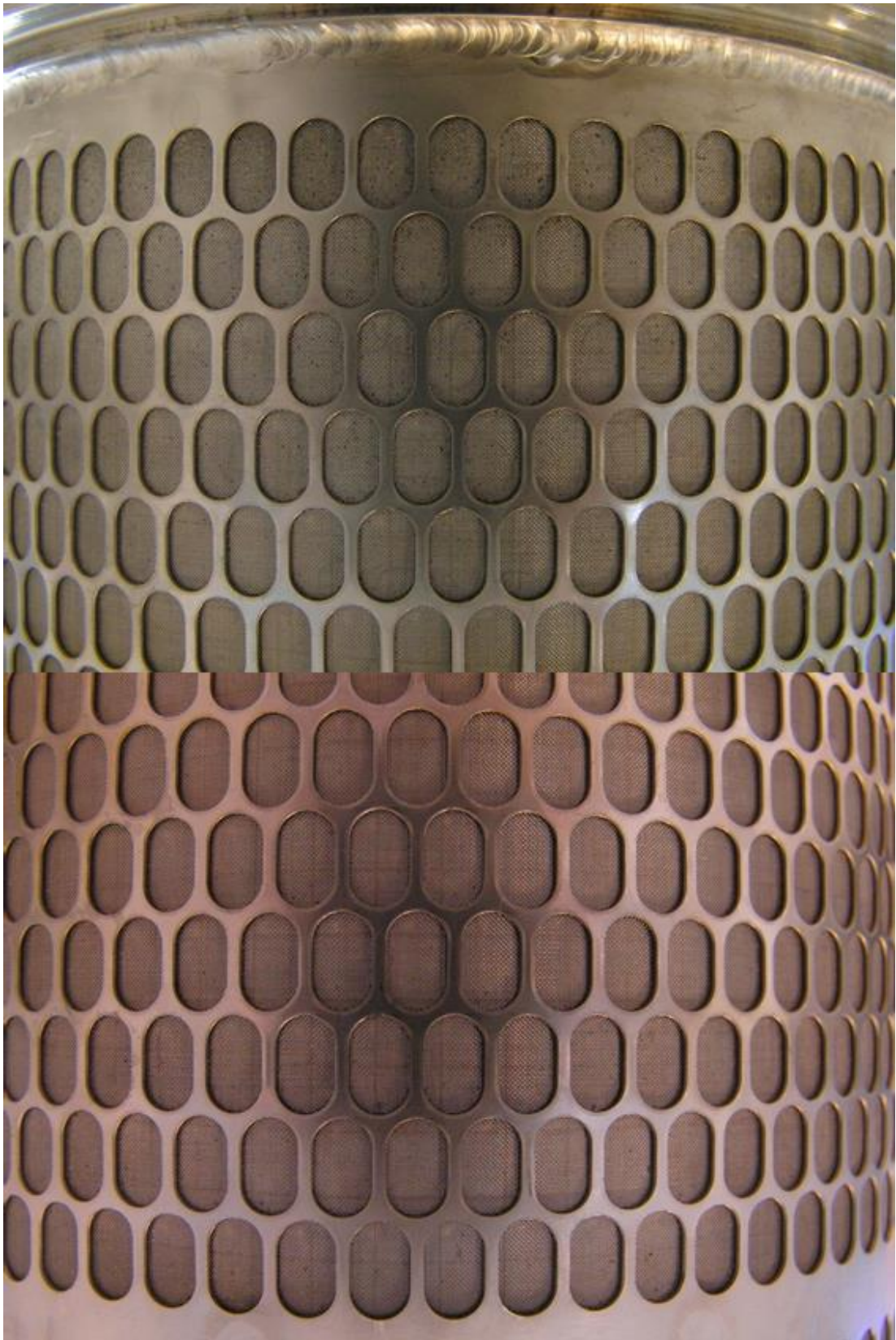
	Q_kok	Hiekkalisäys	Aika		
1	171,9	100	13:33		
2	172,9	100	13:38		
3	173,9	100	13:42		
4	174,9	100	13:46		
5	175,9	100	13:50		
6	176,9	100	13:54		
7	177,9	100	13:59		
Testi loppui	178,26	700	14:02	Rejektio (g) 96,5	Pesu (g) 21

LIITE 7 SUODATINKORI TUKKEUMATESTIN JÄLKEEN, 100 µm

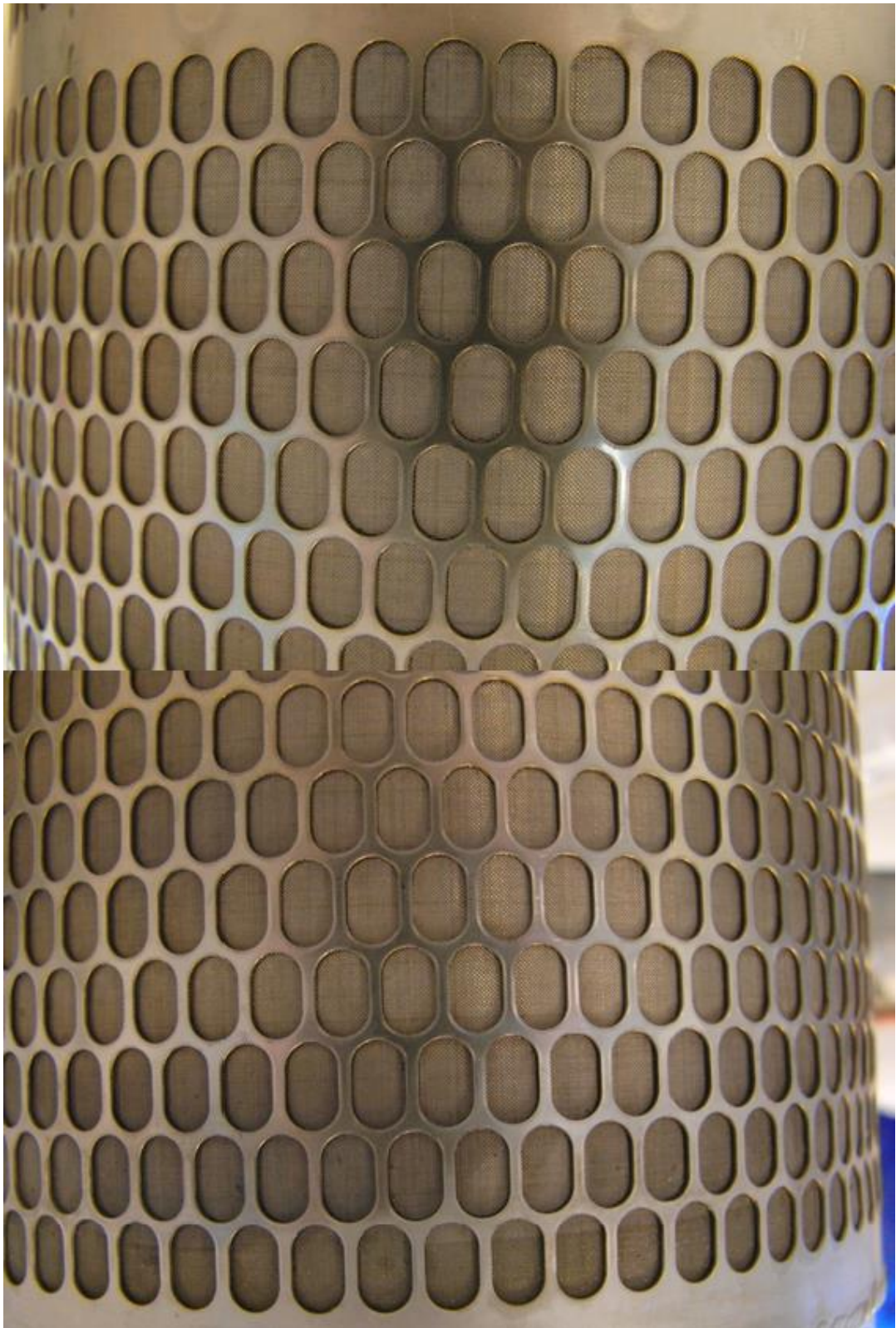


LIITE 8 SUODATINKORI PESUSYKLIN JÄLKEEN, 100µm

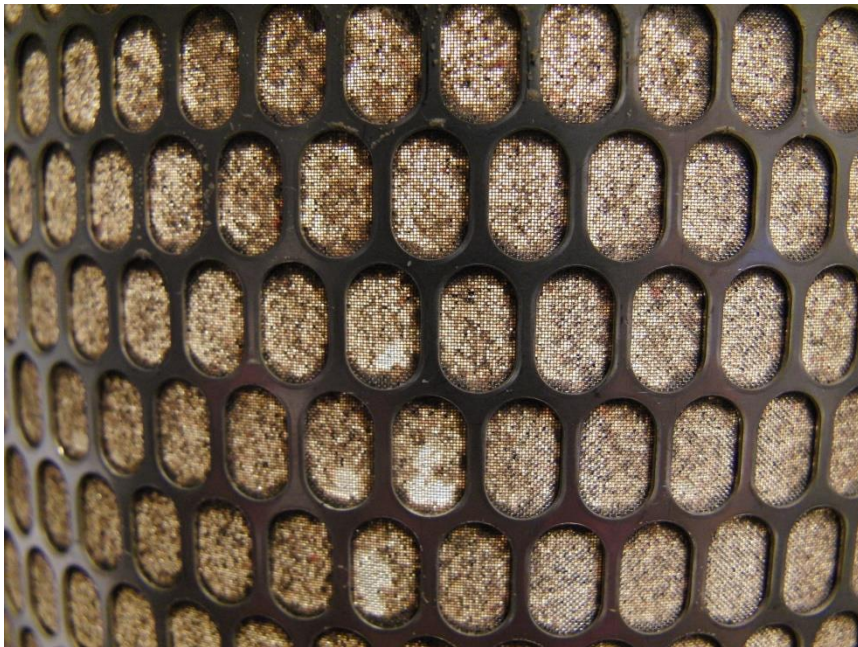
Korin yläosa



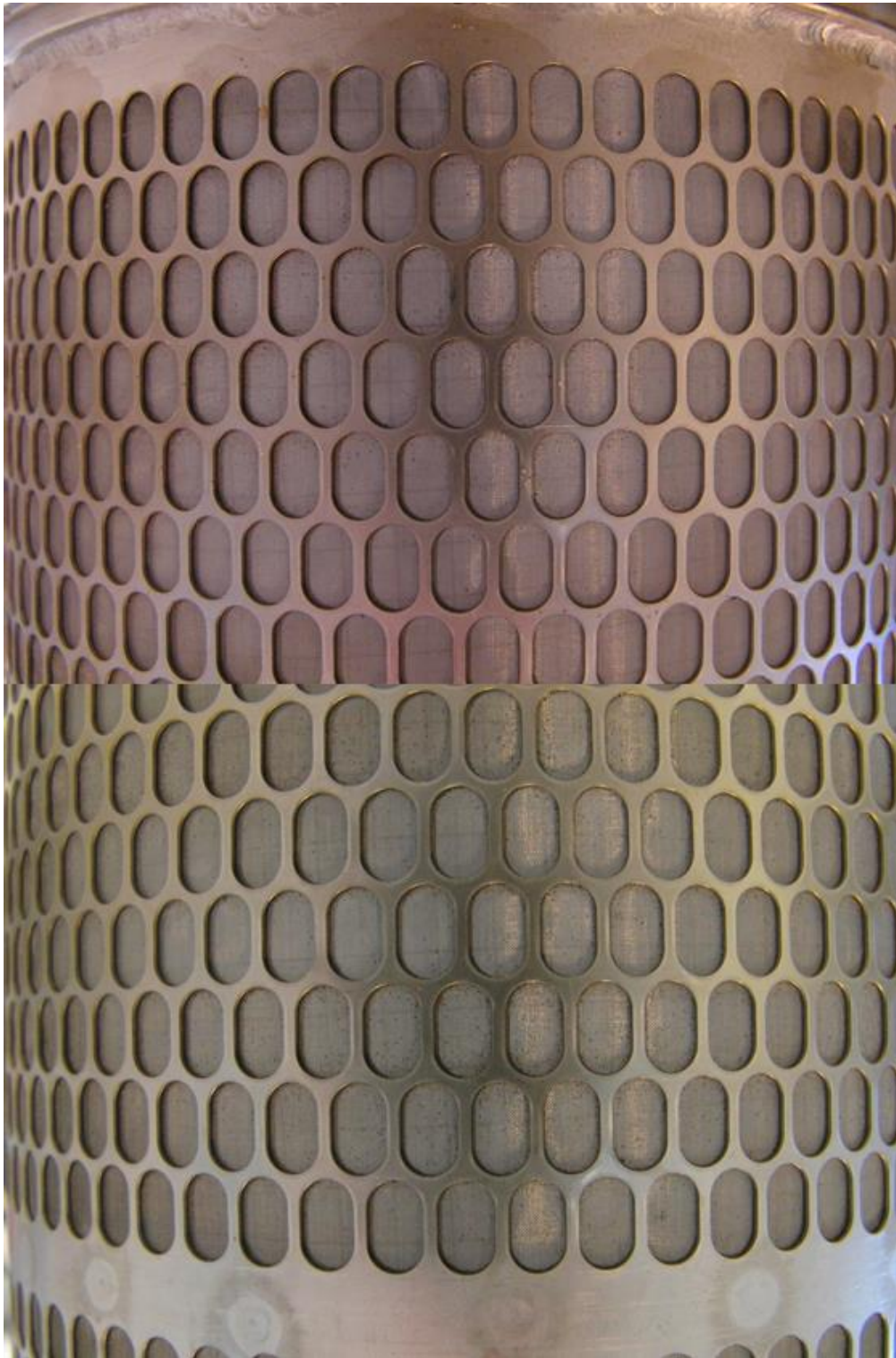
Korin alaosa

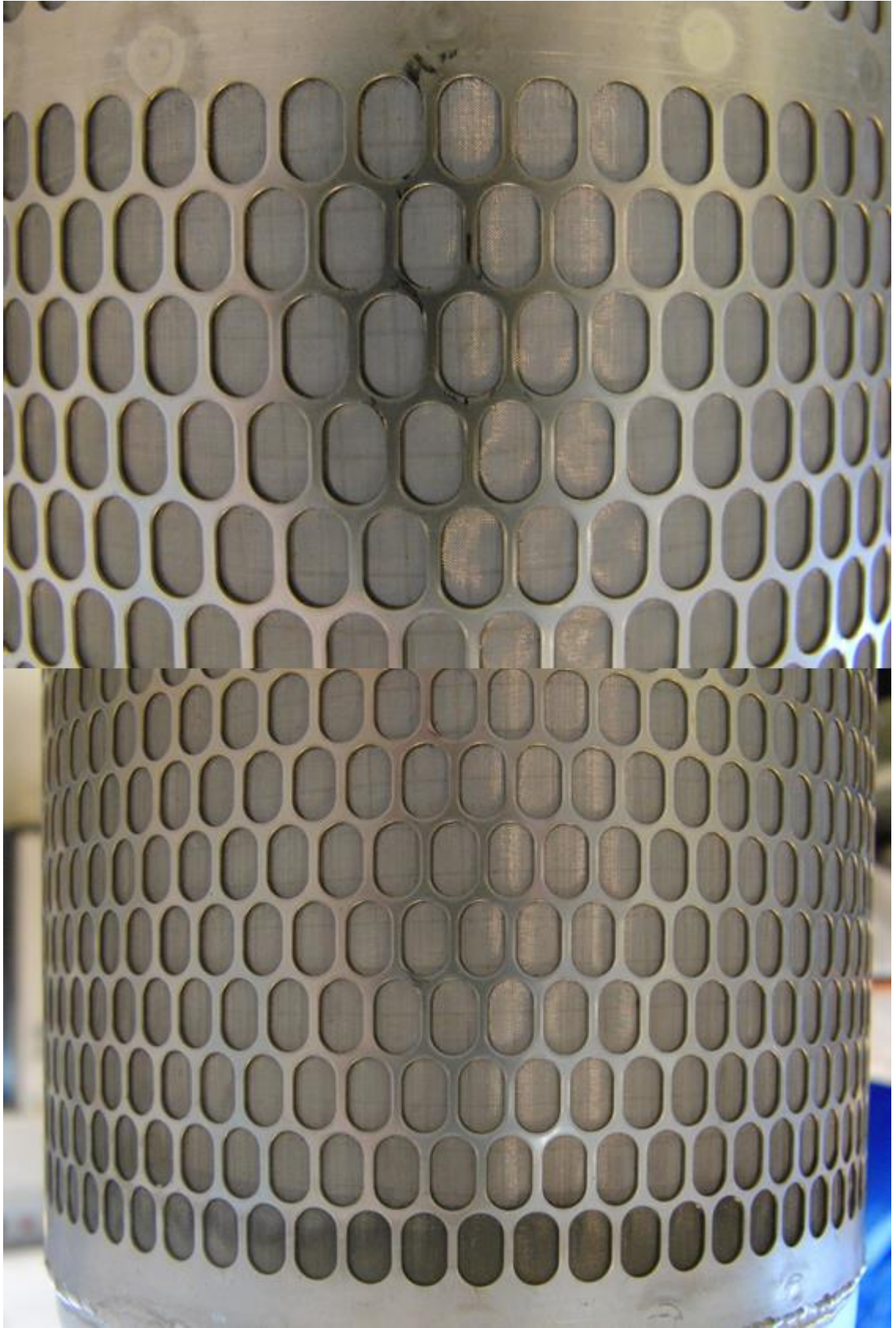


LIITE 9: SUODATINKORI TUKKEUMATESTIN JÄLKEEN. 150 μ m

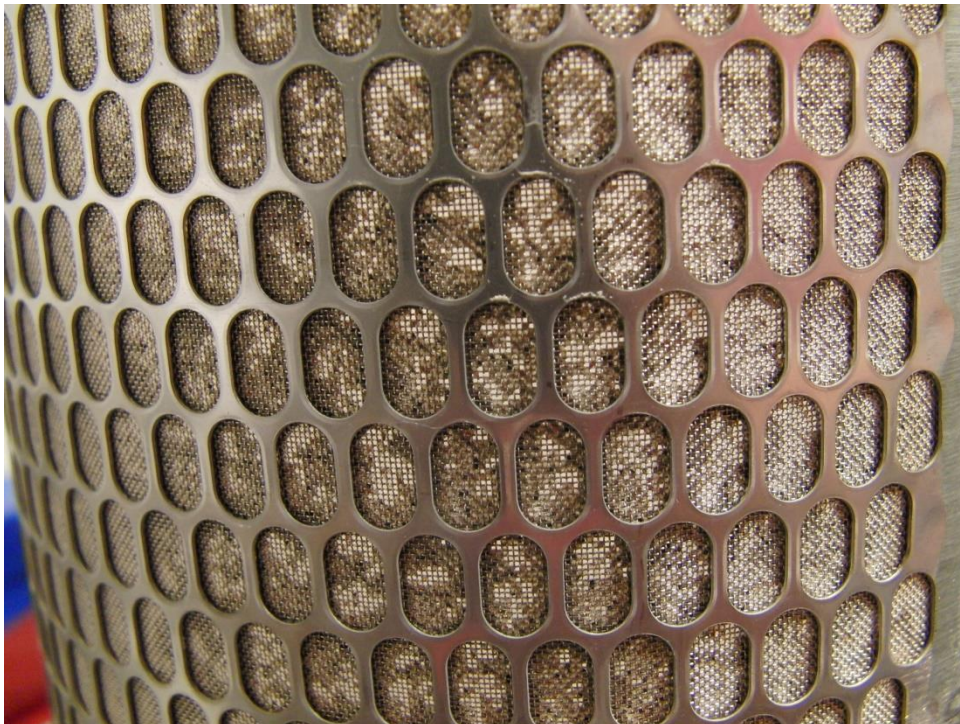
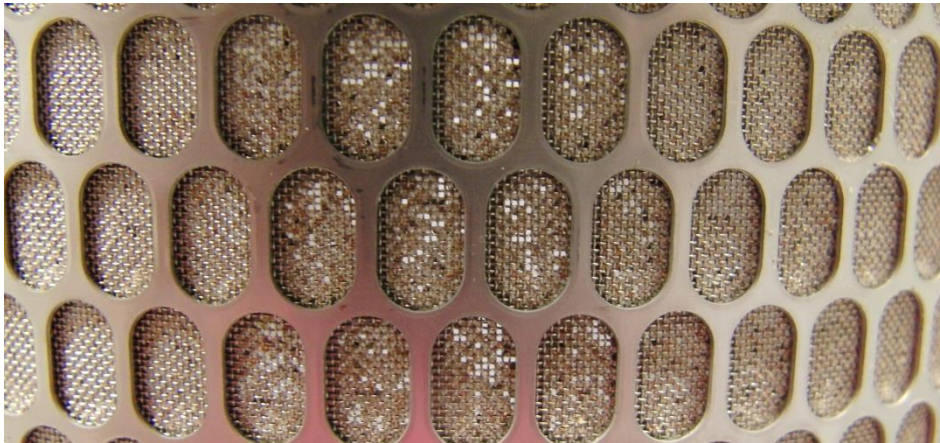


LIITE 10 SUODATINKORI PESUSYKLIN JÄLKEEN, 150 µm





LIITE 11: SUODATINKORI TUKKEUMATESTIN JÄLKEEN, 300 µm



LIITE 12: SUODATINKORI PESUSYKLIN JÄLKEEN, 300 µm

