



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

**VILLE-MATTI HEISKANEN**

**KIERTOVOITELUSUODATTIMIEN TEHOKKUUDEN TUTKIMINEN**

Diplomityö

Tarkastaja: professori Jari Rinkinen  
Tarkastaja ja aihe hyväksytty  
Automaatio-, kone ja  
materiaalitekniikan  
tiedekuntaneuvoston kokouksessa  
12. tammikuuta 2011

# TIIVISTELMÄ

TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

Konetekniikan koulutusohjelma

**HEISKANEN, VILLE-MATTI:** Kiertovoitelusuodattimien tehokkuuden tutkiminen

Diplomityö, 105 sivua, 12 liitesivua

20. maaliskuuta 2011

Pääaine: Hydrauliteknikka

Tarkastaja: professori Jari Rinkinen

Avainsanat: Kiertovoitelu, suodatus, suodatustehokkuus, puhtausluokat ja suodatuksen mittaaminen

Voitelujärjestelmiä käytetään laajasti erilaisissa teollisuuden sovellutuksissa. Niiden tehtävänä on varmistaa pääjärjestelmän voideltavien komponenttien toiminta kaikissa käyttötilanteissa ja -olosuhteissa. Voideltavien komponenttien kehityksen suuntana on ollut niiden eliniän pidentäminen ja paremman hyötysuhteen saavuttaminen. Tämä kehitys luo omat vaatimuksensa järjestelmän puhtaudelle ja huollolle. Vaatimusten mukainen voiteluaineen puhtaus saavutetaan oikeanlaisen suodatuksen avulla. Ilman järjestelmään sopivaa suodatusta voiteluaineessa esiintyvä lika aiheuttaa kiihtyvää kulumista, vikatilanteita ja komponenttien eliniän merkittävää lyhenemistä.

Tämän työn tavoitteena oli tarkastella kiinteiden likapartikkeleiden vaikutusta voitelussa käytettävien suodattimien toimintaan ja tätä kautta niillä saavutettavaan kokonaispuhtauteen. Työssä keskityttiin suodattimen normaalitoiminnan mittaamiseen ja erityistilanteet, kuten kylmäkäynnistys tai alhaiset tilavuusvirrat jätettiin mittauksien ulkopuolelle. Työn tavoitteena oli luoda mittauspohja laajempaa tutkimusta varten ja määrittää millaiset ominaisuudet vaikuttavat suodattimella saavutettavaan puhtaustasoon. Mittauksissa tutkittiin likakonsentraation, lian partikkelikokojakauman, tilavuusvirran suuruuden ja viskositeetin vaikutusta suodattimen toimintaan. Näiden tekijöiden vaikutus suodattimen beta-arvoihin mitattiin multipass-testilaitteiston ja erillisen singlepass- testilaitteiston avulla, kahdella erilaisella suodatusasteella sekä voiteluaineella.

Suodattimen toimintaan vaikuttavat useat eri ympäristö- ja järjestelmäkohtaiset tekijät, joiden arviointi suodatusjärjestelmää suunnitellessa ja suodatinvalintaa tehdessä on välttämätöntä puhtausvaatimusten saavuttamiseksi. Eri tekijöiden vaikutus suodatusmateriaaleille, -rakenteille ja -järjestelmille vaatii laajoja mittauksia ja käytännön seuranta. Laskelmilla saadaan teoretietoa siitä, minkälaiset suodattimen ominaisuudet tulisivat olla, jotta puhtausvaatimukset toteutuisivat erilaisilla likamäärillä. Ne eivät kuitenkaan ota huomioon eri tekijöiden vaikutusta suodatukseen ja tätä kautta järjestelmän puhtauteen.

# ABSTRACT

TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

Master's Degree of Mechanical Engineering

**HEISKANEN, VILLE-MATTI:** Studying efficiency of filters for lubrication oil systems

Master of Science Thesis, 105 pages, 12 appendix pages

20 March 2011

Major: Hydraulics

Examiner: Professor Jari Rinkinen

Keywords: Lubrication systems, filtration, filter selection, particle generation and system cleanliness

Lubrication systems are widely used in many industrial applications such as gearboxes and large bearings. Circulating lubrication systems are typically used when grease or splash lubrication is not enough to ensure proper lubrication and head exchange for lubricated component. Lubrication systems must ensure high system performance in all conditions. Development in field of lubrication demands better oil quality and higher performance and energy efficiency from actual system. To improve oil cleanliness it has to be properly filtered. Filtration quality is depending on right filter selection to meet system requirements and variable environmental factors.

Reliability of the system is depending on proper cleanliness of the lubricating oil. Filters performance is measured with beta values. These values are affected by many system and environmental factors such as temperature, flow rate and viscosity. In this study the goal was to measure how these different kinds of factors affect to filter performance. Standardized test dusts were used to simulate variable system contamination levels and component wear. Various filter sizes for lubrication oil systems with different filtration ratio were tested in normal system operation conditions. Goal was to measure how variable system contamination and dirt concentration affects to filter performance. These measurements were made with standardized multipass test system. Singlepass test system were used to measure how oil viscosity and flow rate affects to filter performance and oil cleanliness. The study introduces results from filter performance in variable system conditions and calculations to find right filter beta values that ensure required oil cleanliness.

## ALKUSANAT

Tämä työ on tehty Tampereen teknillisen yliopiston Hydrauliiikan ja automatiikan laitokselle, Tampereen teknillisen yliopiston tukisäätiön rahoittamana. Työhöni liittyvät mittaukset toteutettiin Parker Hannifin Urjalan yksikössä. Työni tarkoituksena oli tutkia suodatukseen vaikuttavia tekijöitä kiertovoitelujärjestelmissä. Tarkemmin työni tavoitteena oli selvittää kiinteiden likapartikkeleiden ja viskositeetin vaikutusta suodattimen kykyyn ylläpitää järjestelmän puhtautta.

Haluan kiittää työn tarkastajaa professori Jari Rinkistä ja ohjaajana toiminutta diplomi-insinööri Tarmo Mäkelää. Molemmille kuuluu myös iso kiitos loistavista tuesta, neuvoista ja keskustelutuokioista koko työn etenemisen ajalta. Tarmo Mäkelälle lankeaa kiitos lisäksi työni mielenkiintoisesta aiheesta ja mahdollisuudesta toteuttaa työhöni liittyvät mittaukset Parker Hannifin Urjalan yksikössä. Erityiskiitos kuuluu myös Parker Hannifin Urjalan yksikön laboratoriotyöntekijöille Satu Nissille ja Markku Sirolalle mittauksien järjestämisestä ja avusta sekä opastuksesta työni teon aikana. Eikä sovi unohtaa kiittää niitä lukemattomia Parker Hannifin Urjalan työntekijöitä, jotka osallistuivat työni lomassa pidettyihin tapaamisiin ja näissä heiltä saamiini arvokkaisiin kommentteihin ja neuvoihin. Työyhteisönne tuki ja suhtautuminen oli kiitettävää sekä erityisen tärkeää työni onnistumisen kannalta.

Työympäristön ulkopuolelta haluan kiittää kaikkia ystäviäni niin koulun, harrastusten kuin vapaa-ajan parista, mahtavista nopeasti kuluneista vuosista ja kannustamisesta niiden aikana. Lisäksi haluan kiittää kotijoukkojani eli vanhempiani ja avovaimoani Lauraa korvaamattomasta tuesta ja kannustuksesta opiskelun ja työni tekemisen aikana.

20.3.2011

Ville-Matti Heiskanen

# SISÄLLYS

<b>1.</b>	<b>JOHDANTO</b> .....	<b>1</b>
<b>2.</b>	<b>VOITELUAINHEET</b> .....	<b>3</b>
2.1.	Voiteluaineiden luokitus ISO standardin mukaan .....	4
2.2.	Voiteluaineiden sisäiset ominaisuudet .....	5
2.2.1.	Veden ja ilman vaikutukset .....	5
2.2.2.	Muista voiteluaineen ominaisuuksista .....	6
2.3.	Voiteluaineissa esiintyvät kiinteät likapartikkelit .....	8
2.3.1.	Epäpuhtaudet ja kuluminen .....	9
<b>3.</b>	<b>SUODATTAMINEN JA PUHTAUSTASOT</b> .....	<b>12</b>
3.1.	Puhtausvaatimukset voitelujärjestelmissä .....	13
3.2.	Suodattimien luokittelu ja rakenne .....	14
3.3.	Suodattimen valinta ja sijoittaminen .....	17
3.4.	Suodattimen suorituskyvyn mittaaminen .....	20
3.4.1.	Puhtausstandardit ja puhtausluokat .....	21
3.4.2.	Multipass-testi .....	22
3.4.3.	Multipass-testissä käytettävä testipöly .....	24
3.4.4.	Järjestelmän gravimetrinen taso ja suodattimen likakapasiteetti .....	25
3.5.	Suodatusjärjestelmän partikkelimäärän kehitys .....	28
3.6.	Viskositeetin ja tilavuusvirran vaikutuksesta .....	30
3.7.	Voiteluöljyn puhtauden mittaaminen .....	31
<b>4.</b>	<b>VOITELUÖLJYSUODATTIMIEN MITTAUKSET</b> .....	<b>34</b>
4.1.	Multipass-mittauslaitteisto .....	35
4.2.	Likamäärän vaikutuksen mittauslaitteisto ja singlepass-mittauslaitteisto .....	37
4.3.	Muuttuvan likakonsentraation mittaukset .....	39
4.4.	Multipass-mittaukset eri lähtötason likakonsentraatioilla .....	53
4.4.1.	Viiden mikrometrin suodattimen multipass-testitulokset .....	53
4.4.2.	Kymmenen mikrometrin suodattimen multipass-testitulokset .....	58
4.5.	Partikkelikokojakauman vaikutuksen mittaaminen .....	62
4.5.1.	Beta-arvojen tarkastelu eri testipölyille .....	64
4.6.	Likakonsentraation vaikutus voitelujärjestelmän puhtauteen .....	66
4.6.1.	Likakonsentraation mittaukset 5 µm suodattimelle .....	67
4.6.2.	Likakonsentraation mittaukset 10 µm suodattimelle .....	69
4.6.3.	Singlepass-mittaukset ja viskositeetin vaikutus .....	72
<b>5.</b>	<b>SUODATUSTEHOKKUUDEN LASKELMAT</b> .....	<b>76</b>
5.1.	Likakonsentraation vaikutuksen laskelmat .....	77
5.2.	Puhtausluokkalaskelmat .....	80
5.2.1.	Partikkelisyytön laskelmat .....	82
5.2.2.	Suodatusratkaisun valinnasta .....	86
<b>6.</b>	<b>JOHTOPÄÄTÖKSET</b> .....	<b>91</b>

<b>LÄHTEET .....</b>	<b>94</b>
<b>LIITE 1: Suodatukseen liittyviä ISO-Standardeja .....</b>	<b>97</b>
<b>LIITE 2: Multipass-mittauksien alkuarvot 5 µm suodattimelle.....</b>	<b>98</b>
<b>LIITE 3: Multipass-mittauksien alkuarvot 10 µm suodattimelle.....</b>	<b>99</b>
<b>LIITE 4: Parker LCM20 kalibroinnin tulokset .....</b>	<b>100</b>
<b>LIITE 5: Testipölyjen kumulatiiviset hiukkasmäärät.....</b>	<b>101</b>
<b>LIITE 6: Singlepass- mittauksien puhtausluokat ja likakonsentraatiot.....</b>	<b>102</b>
<b>LIITE 7: Singlepass- mittauksien puhtausluokat ja likakonsentraatiot.....</b>	<b>103</b>
<b>LIITE 8: Parker LCM20 tekniset tiedot.....</b>	<b>104</b>
<b>LIITE 9: Voiteluainetestijärjestelmän komponenttiluettelo.....</b>	<b>105</b>
<b>LIITE 10: Likakonsentraation vaikutuksen mittaustulokset .....</b>	<b>106</b>
<b>LIITE 11: Vaihtuvan virtauksen ja multipass- testin beta-arvojen vertailu.....</b>	<b>107</b>
<b>LIITE 12: Testipölylikapasiteettien vertailu .....</b>	<b>108</b>

## TERMIT JA NIIDEN MÄÄRITELMÄT

<b>ACFTD</b>	Air Cleaner Fine Test Dust
<b>AW</b>	Anti-Wear
<b>CTD</b>	ISO Coarse Test Dust
<b>EP</b>	Extreme Pressure
<b>FTD</b>	ISO Fine Test Dust
<b>ISO</b>	International Organization for Standardization
<b>ISO VG</b>	International Organization for Standardization – Viscosity Grade
<b>MP</b>	Multipass
<b>MTD</b>	ISO Medium Test Dust
<b>MULTIPASS</b>	Moniläpäisy
<b>NIST</b>	US National Institute of Standard and Technology
<b>ONLINE</b>	Kunnonvalvonnan jatkuva mittaustapa
<b>SINGLEPASS</b>	Kertaläpäisy
<b>TAN</b>	Total Acid Number, kokonaishappoluku
<b>TBN</b>	Total Base Number, kokonaisemäksisyysluku
<b>TT</b>	Testinumero
<b>VV</b>	Vaihtuvavirtaus

## LYHENTEET JA MERKINNÄT

Merkintä	Yksikkö	Selite
A	[m <sup>2</sup> ]	Suodatinmateriaalin pinta-ala
cSt	[mm <sup>2</sup> /s]	Centstoke, Kinemaattinen viskositeetti
d	[m]	Putken sisähalkaisija
E <sub>x</sub>	[%]	Suodattimen erotusaste partikkelikoolla x
g <sub>10</sub>	[g/min]	Testipölyn syöttönopeus 10µm suodattimella
g <sub>5</sub>	[g/min]	Testipölyn syöttönopeus 5µm suodattimella
G <sub>a</sub>	[g/l]	Alavirran gravimetrinen taso
G <sub>b</sub>	[g/l]	Järjestelmän gravimetrinen taso
G <sub>s</sub>	[g/l]	Syöttövirran gravimetrinen taso
G <sub>y</sub>	[g/l]	Ylävirran gravimetrinen taso
m <sub>s</sub>	[g]	Suodattimen likakapasiteetti
n	[kpl]	Suodattimien lukumäärä
N <sub>d</sub>	[kpl]	Partikkelimäärä suodattimen alavirrassa
N <sub>i</sub>	[kpl]	Järjestelmään syötettävä likamäärä
N <sub>in</sub>	[kpl]	Suodattimelle tuleva partikkelimäärä
N <sub>m</sub>	[kpl/20s.]	Mittausjärjestelmän laskema partikkelimäärä
N <sub>out</sub>	[kpl/l]	Suodattimelta lähtevä partikkelimäärä
N <sub>u</sub>	[kpl/l]	Partikkelimäärä suodattimen ylävirrassa
N <sub>x</sub>	[kpl/ml]	Mittausjärjestelmän partikkelimäärä
N <sub>0</sub>	[kpl]	Järjestelmän alkupartikkelimäärä
N <sub>0k</sub>	[kpl/l]	Huollon aiheuttamat partikkelit
N <sub>0l</sub>	[kpl/l]	Voiteluaineen lisäyksen aiheuttamat partikkelit
N <sub>0v</sub>	[kpl/l]	Valmistuksesta jääneet partikkelit
ppm	[-]	Parts per million
Q	[l/min]	Kokonaistilavuusvirta
Q <sub>i</sub>	[l/min]	Syöttötilavuusvirta
Q <sub>in</sub>	[l/min]	Suodattimelle tuleva tilavuusvirta
q <sub>k</sub>	[ $\frac{l/min}{m^2}$ ]	Suodatinmateriaalin virtausmitoituserroin



<b>Merkintä</b>	<b>Yksikkö</b>	<b>Selite</b>
$Q_a$	[ml/s]	Mittausantureille menevä tilavuusvirta
$Q_n$	[l/min]	Näytteenottotilavuusvirrat
$Q_{out}$	[l/min]	Suodattimelta lähtevä tilavuusvirta
$Q_p$	[l/min]	Poistotilavuusvirta
$Q_t$	[l/min]	Testitilavuusvirta
$R$	[kpl/min]	Syötettävien partikkeleiden määrä
$R_h$	[kpl/min]	Huohottimen kautta tulevat partikkelit
$R_{pois}$	[kpl/min]	Järjestelmästä poistuneet partikkelit
$R_{sis}$	[kpl/min]	Järjestelmän sisällä syntyvät partikkelit
$R_t$	[kpl/min]	Tiivisteiden kautta tulevat partikkelit
$t$	[s]	Testiaika
$t_m$	[s]	Mittausaikajakso
$v$	[m/s]	Hydraulinesteen nopeus
$V$	[m <sup>3</sup> ]	Järjestelmän tilavuus
$V$	[l]	Testijärjestelmän tilavuus
$x$	[µm (c)]	Partikkelikoko
$\beta_{eff}$	[-]	Tehollinen suodatussuhde
$\beta_{nx}$	[-]	Suodattimen n suodatussuhde
$\beta_x$	[-]	Suodattimen beta-arvo hiukkaskoolle x
$\nu_{40^\circ C}$	[m <sup>2</sup> /s]	Hydraulinesteen viskositeetti 40 °C:ssa

# 1. JOHDANTO

Voitelujärjestelmällä on monia tehtäviä. Sen päätehtävänä on varmistaa hyväkuntoisen voiteluaineen riittävä määrä voitelukohteissa. Kiertovoitelussa, kuten voitelussa yleensä, päätekijöitä voitelun onnistumisen kannalta ovat lämpötila, puhtaus ja paine. Oikeanlainen suodattaminen varmistaa voiteluaineen puhtauden ja tätä kautta koko järjestelmän toiminnan. Suodatuksen tehtävänä on poistaa voiteluaineesta sinne kuulumattomia partikkeleita, hapettumistuotteita, vettä ja ilmakuplia. Ihanteellisessa tilanteessa suodatusjärjestelmä poistaisi voiteluaineesta kaiken sinne kuulumattoman epäpuhtauden, eikä siitä aiheutuisi lainkaan virtausvastusta ja sillä olisi ääretön likakapasiteetti. Näin ei todellisuudessa kuitenkaan ole ja erilaisten ominaisuuksien saavuttamiseksi on niiden välillä tehtävä kompromisseja. [1; 2]

Erilaiset standardit määrittelevät kuinka suodattimen ominaisuuksia tulee mitata. Standardien avulla suodattimia päästään vertailemaan laboratorio-olosuhteissa tehtyjen mittausten perusteella. Standardeissa määritetään myös puhtausluokat, joiden avulla järjestelmien puhtautta voidaan verrata keskenään. Puhtausluokkien avulla järjestelmille asetetaan erilaiset puhtausvaatimukset, jotka suodatusjärjestelmän tulisi toteuttaa kaikissa käyttöolosuhteissa. [21, s.14]

Käytännön olosuhteet voivat poiketa laboratoriomittauksista paljon, joten suodatuksen suunnittelussa ja suodatinvalintaa tehdessä tämä tulee ottaa huomioon. Olosuhdetekijöiden vaikutus erilaisiin suodatinmateriaaleihin on hyvä mitata ennen kuin varsinainen suodatinjärjestelmä suunnitellaan järjestelmään sopivaksi. Järjestelmälle oikeanlaisen suodattimen mitoittaminen vaatii erilaisten suodatukseen vaikuttavien tekijöiden tuntemusta ja oikeanlaista tulkintaa. Liian hyvästä suodatuksesta ei yleensä ole haittaa järjestelmän toiminnalle, mutta siitä aiheutuvat kustannukset voivat olla suuret. Huono voiteluaineen suodattaminen johtaa lisääntyneisiin vaurioihin, käyttökatkoihin ja toiminnan keskeytyksiin sekä voi aiheuttaa merkittäviä kuluja.

Tietoa suodatusjärjestelmän toiminnasta saadaan tutkimalla käytössä olevien ja käytössä olleiden suodatinelementtien kuntoa ja elinkaaren vaihetta sekä voiteluaineen puhtautta. Käytetyn suodattimen mittaustuloksia vertaamalla jo olemassa oleviin laboratoriomittauksiin saadaan tietoa suodattimen elinkaaren vaiheesta. Kunnanvalvontamittausten avulla saadaan tietoa järjestelmässä esiintyvän lian määrästä ja laadusta sekä suodattimen kunnosta.

Oikeanlaisen suodatuksen varmistamiseksi ja vikatilanteiden löytämiseksi on öljyn puhtautta mitattava säännöllisesti. Voitelujärjestelmän puhtausvaatimukset riippuvat yleisesti sen ominaisuuksista ja käyttökohteesta. Pitkät huoltovälit ja järjestelmille aiheutuvat suuret kuormitukset vaativat voiteluaineelta parempaa

puhtautta. Lisäksi huoltokustannusten suuruus ja mahdollisen vikatilanteen aiheuttamat vaarat vaativat parempaa puhtautta. Mitä puhtaampana suodatusjärjestelmä pystyy järjestelmän pitämään, sitä vähemmän tapahtuu lian aiheuttamaa kulumista. Järjestelmän puhtauden kannalta on tärkeää myös sen alustava puhtaus. Hyvällä alkupuhtaudella varsinaisen järjestelmän käyttöä aloitettaessa ja voiteluaineen lisäyksien sekä vaihdon yhteydessä varmistetaan, että järjestelmään ei pääse ylimääräistä likaa ja näin pidennetään suodatinelementtien ja itse järjestelmän käyttöikä. [1]

Likapartikkeleiden määrän ja hiukkaskokojakauman vaikutukset suodattimen materiaalin lian erotuskykyyn voidaan mitata laboratorio-olosuhteissa erilaisten standardin määrittelemien testipölyjen avulla. Pitämällä muut suodatukseen vaikuttavat tekijät kuten paine, tilavuusvirta ja viskositeetti vakioina, päästään standardin määrittelemällä multipass- testillä mittaamaan erilaisten hiukkaskokojakaumien ja testipölymäärien vaikutusta suodattimen beta-arvoihin ja tätä kautta suodattimella saavutettavaan puhtauteen. Erilaiset materiaalit ja suodatinelementin rakenteet ja elementin koko mahdollistavat oikeanlaisen suodattimen valinnan järjestelmään ja vaikuttaviin olosuhteisiin sopiviksi. Laskennan avulla saadaan teoriatietoa siitä, minkälaiset suodattimen ominaisuudet tulisivat olla, jotta vaadittu puhtaustaso saavutetaan. Lisäksi laskennalla voidaan arvioida ja selvittää jo käytössä olevien suodatusjärjestelmien toimivuus sekä järjestelmän partikkelimäärien kehitys.

Voitelujärjestelmissä tilavuusvirrat ja voiteluaineen viskositeetti ovat suuria sekä olosuhdetekijät kuten lämpötila voivat muuttua merkittävästi järjestelmän käytön aikana. Myös pitkät huoltovälit aiheuttavat haasteita suodattimen mitoittamiselle. Teollisuudessa käytettävissä voitelujärjestelmissä voiteluaineen viskositeetti ja tilavuusvirran suuruus eroavat multipass- testissä käytettävistä arvoista, jolloin niiden vaikutus suodatinmateriaalin toimintaan normaalitoiminnan alueella mitattiin erillisen testijärjestelmän avulla, kahdella eri suodatusasteella. Tällä käytännön voitelujärjestelmää mallintavalla mittauslaitteistolla saadaan tietoa siitä, kuinka paljon suodatin todellisuudessa päästää järjestelmässä olevasta liasta suodatinelementin läpi ja miten viskositeetin arvo vaikuttaa lian läpäisyyn. Lisäksi erilaisilla lian lähtötasoilla mitattiin suodattimen kyky sitoa itseensä järjestelmässä olevaa likaa jatkuvan toiminnan aikana, kun järjestelmään ei syötetä uutta likaa mittausajan kuluessa.

Mittauksien ja laskelmien tavoitteena oli luoda pohja laajempaa tutkimusta varten. Kaikki mittaukset toteutettiin suodattimen normaalitoiminnan olosuhteissa muuttamalla vain yhtä tai korkeintaan kahta suodatukseen vaikuttavaa tekijää kerrallaan. Suodatukseen vaikuttavista tekijöistä tarkasteltiin tilavuusvirran, voiteluaineen viskositeetin, lian määrän, lian hiukkaskokojakauman ja suodatusasteen merkitystä suodattimella saavutettavaan puhtaustasoon.

## 2. VOITELUAINEET

Kiertovoitelujärjestelmiä käytetään sovellutuksissa, joissa voitelukohteiden kuormitukset ja nopeudet ovat suuria. Esimerkkinä sovellutuksista voidaan mainita tuulivoimateollisuus, jossa pieni komponenttivaurio voi johtaa pitkään voimalan seisonta-aikaan ja suuriin kunnossapitokustannuksiin sekä muihin taloudellisiin menetyksiin. Tuulivoimateollisuudessa vikatilanteiden huoltoa hankaloittavat lisäksi erilaiset voimaloiden sijoituspaikat, kuten meri- tai vuoristoympäristö. Kiertovoitelu on yksi osa järjestelmän kunnossapitoa ja järjestelmissä käytettävillä voiteluaineilla on useita tärkeitä tehtäviä. Näitä ovat esim. voitelukalvon muodostaminen liikkuvien osien välille, lämmön poistaminen, värähtelyn vaimentaminen, korroosion ehkäiseminen, ja epäpuhtauksien kuljettaminen suodattimeen tai säiliöön. [2; 6; 18]

Oikein valittu voiteluaine vähentää järjestelmän tehohäviöitä pienentämällä järjestelmässä esiintyviä kitkoja. Liuku- ja pyörimisnopeuksien kasvaessa voiteluaineen tehtävänä on kiilautua kahden liikepinnan väliin ja muodostaa näiden välille kantava voiteluainekalvo. Jotta kantava kalvo muodostuisi, on voiteluaineella oltava käyttökohteeseen sopiva viskositeetti. Järjestelmää ympäröivät olosuhteet vaikuttavat niin itse järjestelmän toimintaan kuin käytettävän voiteluaineen ominaisuuksiin, kuten sen viskositeettiin. Tästä johtuen järjestelmän suunnittelun sekä oikeanlaisen voiteluaineen valinnan merkitys korostuvat järjestelmän toiminnan varmistamisessa. Oikein valitulla voiteluaineella ja sen suodattamisella, voidaan merkittävästi lisätä järjestelmän käyttöikää, käytettävyyttä sekä toiminnan luotettavuutta. Voitelujärjestelmissä käyttöhäiriöitä ja vikatilanteita aiheuttavat esim. epäpuhtaudet voiteluaineen joukossa sekä vääränlaisen voiteluaineen käyttäminen. Ilman oikeanlaista suodatusta käytettävän voiteluaineen ominaisuudet heikkenevät nopeasti ja järjestelmän toiminta häiriintyy. [2; 16; 18; 19]

Voiteluaineiden paras toimivuusalue saavutetaan silloin, kun järjestelmän puhtaustaso on sen suoritusarvojen ja toimintavarmuuden edellyttämällä tasolla. Oikein mitoitettulla ja riittävällä suodatusjärjestelmällä sekä ennaltaehkäisevällä toiminnalla on suuri merkitys oikean puhtaustason ylläpitämisessä. Järjestelmän toiminnan kannalta on lisäksi ymmärrettävä kriittisten likapartikkeleiden vaikutus komponenttien toimintaan ja niiden kulumiseen. Oikein valitulla voiteluaineella ja suodatusjärjestelmällä sekä ennaltaehkäisevällä toiminnalla voidaan saavuttaa lisäksi huomattavia kustannussäästöjä. Voiteluaineiden kunnonvalvonnassa mitataan niistä kiinteiden epäpuhtauksien määrää, viskositeettiä, vesimäärää, happamuutta ja hapettumista. Näiden tekijöiden avulla saadaan määritettyä voiteluaineelle optimimaalinen vaihtoväli ja ne lisäksi kertovat järjestelmän sekä sen suodatuksen toiminnasta. [1; 3]

Voiteluaineen kulumiskäyttäytyminen riippuu hyvin monesta eri tekijästä. Lämpötilan vaikutukset voiteluaineen ominaisuuksiin ja sen käyttöikään ovat suuret. Voiteluaineesta mitatut ominaisuudet, kuten puhtaustaso, vesimäärä ja ilmamäärä sekä viskositeetti vaikuttavat merkittävästi järjestelmän komponenttien kulumiseen ja tätä kautta järjestelmän käyttöikään. Voiteluaineen lisäaineiden tarkoituksena on parantaa voiteluaineen perusominaisuuksia käyttökohteeseen sopiviksi. Niillä pyritään vaikuttamaan esimerkiksi rajavoitelutilanteessa tapahtuvaan kulumiseen ja voiteluaineessa olevien hapettumistuotteiden aiheuttamiin ongelmiin, kuten komponenttien osien takerteluun sekä korroosioon. Yleisimpiä lisäaineita ovat erilaiset kulumisenestoaineet, pintojen puhtautta parantavat detergentit, hapettumisenesto-, korroosionesto-, paineenkesto- ja vaahtoamisenestolisäaineet sekä erilaiset kitkanalentajat. [1; 3; 8; 16]

## 2.1. Voiteluaineiden luokitus ISO standardin mukaan

ISO 3448 -luokitus pitää sisällään 18 viskositeettiluokkaa. Näitä luokkia kuvaava lukuarvo 2 – 1500 ilmoittaa öljyn kinemaattisen viskositeetin 40 °C ja yksikössä cSt. Viskositeetille sallitaan ± 10 % vaihteluväli luokan nimellisarvosta. Taulukossa 2.1 on lueteltu standardin ISO 3448 -viskositeettiluokat sekä luokkaa vastaava viskositeetin arvo ja standardin sallima viskositeetin vaihteluväli. Taulukossa on kuvattu myös tyypillisiä käyttökohteita eri viskositeettialueille. Mineraaliöljyjen viskositeettialue on yleisesti 32 – 320 cSt välillä 40 °C lämpötilassa. Synteettisten PAO -perusteisten öljyjen viskositeetti on välillä 68 – 320 cSt ja Polyglykoli -perusteisten välillä 150 – 460 cSt lämpötilassa 40 °C. [6]

**Taulukko 2.1. ISO VG – luokittelu [8].**

ISO Viskositeetti (Viscosity Grade)	Viskositeetin keskiarvo cSt (mm <sup>2</sup> /s) / 40 °C			Viskositeettialueen käyttökohteet
	Min	cSt	Max	
ISO VG 2	1,92	2,2	2,42	
ISO VG 3	2,88	3,2	3,52	
ISO VG 5	4,14	4,6	5,06	
ISO VG 7	6,12	6,8	7,48	
ISO VG 10	9,00	10,0	11,00	
ISO VG 15	13,50	15,0	16,50	
ISO VG 22	19,80	22,0	24,20	
ISO VG 32	28,80	32,0	35,20	
ISO VG 46	41,40	46,0	50,60	
ISO VG 68	61,20	68,0	74,80	
ISO VG 100	90	100	110	
ISO VG 150	135	150	165	
ISO VG 220	198	220	242	
ISO VG 320	288	320	352	
ISO VG 460	414	460	506	
ISO VG 680	612	680	748	
ISO VG 1000	900	1000	1100	
ISO VG 1500	1350	1500	1650	

Luokkien viskositeetin keskiarvo on valittu standardissa siten, että se on n. 50 % suurempi kuin edellisen luokan viskositeetin keskiarvo. Viskositeetin luokkanumerot ovat pyöristettyjä viskositeetin keskiarvoja. Jokaiseen luokkaan kuuluu keskiviskositeetin lisäksi kaikki  $\pm 10$  % vaihteluvälin sisällä olevat öljyt. ISO VG -järjestelmää käytetään yleisesti hydraulikkaöljyjen sekä teollisuusvaihteistoöljyjen viskositeetin ilmaisemiseen. Työssä tarkastellaan kiertovoiteluöljyjen viskositeetin ja sen sisältämän likamäärän vaikutusta järjestelmän puhtaustasoon ja suodatuksen onnistumiseen. Kiertovoiteluöljyjen viskositeettialue on varsin laaja, johtuen erilaisista käyttökohteista ja voitelukohteen öljylle asettamista vaatimuksista. Yleinen viskositeettiväli kiertovoiteluöljyille on 32 – 460 cSt, joissakin erikoistapauksissa voiteluaineen viskositeetti voi olla välin ulkopuolella, johtuen esimerkiksi erilaisista käyttölämpötilan tuomista vaatimuksista. [8]

## **2.2. Voiteluaineiden sisäiset ominaisuudet**

Voiteluaineiden käyttökään vaikuttavat järjestelmästä aiheutuvat kuormitukset, epäpuhtaudet ja käyttöolosuhteet. Erityisesti muutokset ympäristökijöissä kuten ilmankosteudessa ja lämpötilassa tuovat haasteita voiteluaineen kunnossapitoon. Voiteluaineen vaihtoväli määritetään yleisesti siitä otettavien näytteiden perusteella. Lisäksi jokin normaalista toiminnasta poikkeava tilanne, esim. komponenttirikko voi aiheuttaa ylimääräisen vaihdon voiteluaineelle. Voiteluaine voidaan vaihtaa myös määräajoin muun kunnossapidon yhteydessä tai vaihtoperusteena voidaan pitää suodattimien tukkeutumista sekä muita järjestelmästä tehtäviä havaintoja.

Käyttöään lisäksi voiteluaineen sisäiset ominaisuudet heikkenevät erilaisten epäpuhtauksien vaikutuksesta. Epäpuhtauksia ja niiden vaikutuksia voiteluaineeseen sekä järjestelmän toimintaan käsitellään tarkemmin luvussa 2.4. Erilaiset lisäaineet tuovat omat haasteensa suodatusjärjestelmän ja huollon suunnitteluun. Lisäaineet voivat vahingoittaa suodatinelementin rakennetta ja liuottaa siitä osia voiteluaineen joukkoon. Materiaaleja valittaessa yhteensopivuus käytettävän voiteluaineen ja sen lisäaineistuksen kanssa tulee ottaa huomioon. [6; 23]

### **2.2.1. Veden ja ilman vaikutukset**

Voitelujärjestelmissä esiintyy aina vettä ja muita epäpuhtauksia. Vesi voi olla joko liuenneena tai vapaana vetenä voiteluaineen seassa. Vesi aiheuttaa järjestelmän toimintaan häiriöitä ja heikentää käytettävän voiteluaineen ominaisuuksia. Veden aiheuttamia ongelmia voivat olla käytettävän voiteluaineen viskositeetin lasku, voitelukyvyyn heikentyminen, kulumisenestokyvyyn heikkeneminen, korroosion lisääntyminen, hapettuminen, suodatettavuuden heikkeneminen, vaahtoaminen ja lietteenmuodostus sekä lisäaineiden erottuminen. Hyvin yleinen tapa veden muodostumiselle järjestelmään on kondensaatio, joka on seurausta lämpötilan vaihtelusta. Veden kondensoitumista voi tapahtua esimerkiksi järjestelmän säiliössä tai voiteluainetta jäähdytettäessä jäähdyttimen avulla.

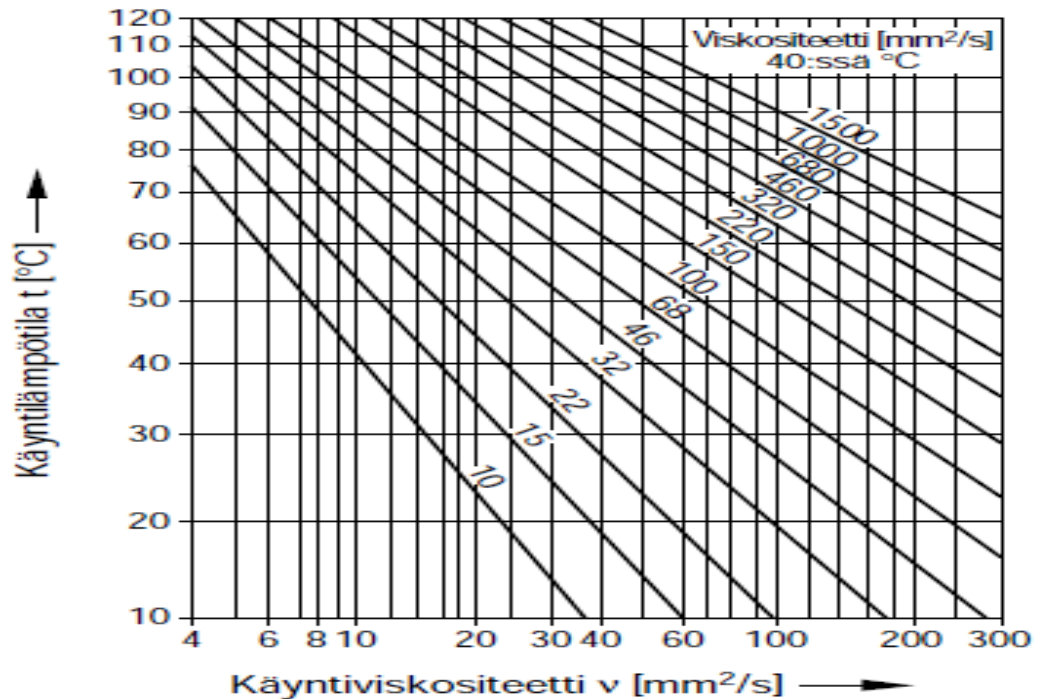
Voiteluaineen vesipitoisuus vaikuttaa järjestelmän kunnonvalvontaan ja likamäärien mittaamiseen. Optiikkaan perustuvat mittausvälineet eivät pysty erottamaan mitattavien likapartikkeleiden materiaaleja tai niiden koostumusta. Korkea vesipitoisuus lisää laskureiden mittaamaa partikkelimäärää ja voi antaa virheellisen kuvan järjestelmän todellisesta kiinteän lian määrästä. Veden aiheuttamien ongelmien vuoksi sen määrä tulisi pitää voitelujärjestelmissä niin alhaisena kuin mahdollista. Vettä voidaan poistaa voiteluöljystä erilaisten separaattoreiden, tyhjiökuivaimien ja ilmakuivaimien avulla. Veden absoluuttinen määrä (PPM, Parts Per Million) ilmoittaa liunneen sekä vapaan veden määrän voiteluaineessa. [3; 12; 25]

Veden lisäksi ilma aiheuttaa voiteluöljylle monia haitallisia ominaisuuksia. Niin vesi kuin korkea voiteluaineen ilmapitoisuus lyhentää voiteluaineen käyttöikää, aiheuttaa hapettumista ja heikentää öljyn voitelu- sekä lisäaineominaisuuksia. Lisäksi voiteluaineeseen liunneena oleva ilma aiheuttaa öljyn kokoonpuristuvuutta ja ongelmia koko järjestelmän toiminnalle. Itse voideltavissa kohteissa ilma aiheuttaa voitelukalvon pientymistä ja heikkenemistä, jolloin kalvo rikkoutuu herkästi sekä aiheuttaa voideltavan kohteen ennenaikaista kulumista, kavitaatiota ja jopa komponenttien rikkoutumisia. Voiteluaineessa esiintyvä vaahto on yleensä ilmakuplia voiteluaineen pinnalla, joita ympäröi hyvin ohut voiteluainekalvo. Kuplat voivat kerääntyä toisiinsa ja muodostaa suurempia ilmakuplia. Suuret ilmakuplat erottuvat voiteluaineesta ja sekoittuvat voiteluainetta ympäröivään ilmatilaan, esimerkiksi järjestelmän säiliössä. Tätä ilmiötä kutsutaan ilman erottumiseksi. [23]

### **2.2.2. Muista voiteluaineen ominaisuuksista**

Voiteluaineen viskositeetti riippuu vallitsevasta lämpötilasta. Eri voiteluaineilla viskositeetin muutos tapahtuu nopeammin lämpötilan muuttuessa. Voiteluaineen viskositeetti-indeksi kuvaa viskositeetin muutoksen suuruutta lämpötilan vaihdellessa. Korkean viskositeetti-indeksin omaavilla voiteluaineilla viskositeetti muuttuu hyvin vähän lämpötilan vaihdellessa. Kiertovoitelujärjestelmissä käytettävien öljyjen viskositeettialue 40 °C on yleisesti 32 – 460 cSt, lämpötilan noustessa esimerkiksi 60 °C pienenee tyypillisen ISO VG 32 voiteluaineen viskositeetti alle 20 cSt ja ISO VG 460 voiteluaineen alle 200 cSt. Lämpötilan säätely on ratkaisevassa asemassa viskositeetin riittävyyden varmistamiseksi voitelukohteissa. Erilaisten voiteluaineiden viskositeetin muutos lämpötilan suhteen on esitetty kuvassa 2.1. [8; 14]

Voiteluaineeseen voidaan lisätä erilaisia kulumisenestoaineita. Näiden tehtävänä on muodostaa kalvo voitelukohteeseen ja estää näin voitelukohteen kulumista. Kulumisenestoaineet eivät yleensä kestä korkeita lämpötiloja, joissa niiden kulumisenesto-ominaisuudet voivat hävitä jopa kokonaan. Korkeat lämpötilat aiheuttavat lisäksi voiteluaineen hapettumista. Hapettumisreaktio vähentää voiteluaineen käyttöikää ja aiheuttaa voideltavien komponenttien syöymistä, liikkuvien osien kiinni juuttumisia ja komponenttien vajaatoimintaa. Lisäksi muut voiteluöljyn ominaisuudet, kuten kyky erottaa vettä ja ilmaa, heikkenevät hapettumisprosessin seurauksena. [23]



**Kuva 2.1.** Mineraaliöljyjen keskimääräiset viskositeetti-lämpötila riippuvuudet [14].

Voiteluaineet, joiden viskositeetti-indeksi on korkea, koostuvat yleensä parafiinisista hiilivedyistä ja niiden hapettumisreaktiossa syntyy pääasiassa happoja. Nafteeniperusteiset voiteluaineet sisältävät aromaattisia hiilivetyjä, jotka tuottavat reaktiotuotteina hartsia ja lietettä. Erilaiset reaktiotuotteet voivat myös aiheuttaa suodattimen materiaaliin muutoksia ja tätä kautta suodatustehokkuuden heikkenemistä. Ne voivat myös liuottaa suodattimen materiaalia voiteluaineeseen. Hapettumisreaktion seurauksena voiteluaine muuttuu tummaksi ja lietteiseksi. Reaktiossa voiteluaineesta erottuu erilaisia lakkamaisia saostumia järjestelmän kuumille pinnoille. Voiteluaineen perusöljyn tyypistä riippuen hapettumistuotteena voi syntyä pääasiassa happoa tai hartsimaisia yhdisteitä. [23]

Hapettumisreaktio voi tapahtua voitelukohteissa paikallisesti korkeiden lämpötilojen vuoksi ja jopa lyhytaikainen sekä hyvin paikallinen voiteluaineen lämpeneminen kiihdyttää voiteluaineen hapettumisreaktiota. Käyttölämpötilalla on merkitystä niin voiteluaineen eliniän, kuin järjestelmän toiminnan ja ominaisuuksien kuten hyötysuhteen kannalta. Voiteluaineissa käytettävät hapettumisenestoaineet vaikuttavat hapettumisreaktion syntyyn ja lisäaineistetun voiteluaineen on todettu kestävän paremmin korkeampia lämpötiloja. Hapettumisenestoaineet nimensä mukaisesti estävät reaktiota katalysoivien aineiden toiminnan ja samalla niiden pitoisuus voiteluaineessa pienenee. Lisäaineistus poistuu vähitellen reaktion edetessä, ja hapettumisreaktio pääsee tapahtumaan perusvoiteluaineessa. Kun lisäaineistus on poistunut voiteluaineesta kokonaan, sen ominaisuudet palaavat lisäaineistamattoman voiteluaineen tasolle. [23]



Voiteluaineen jalostusprosessilla on merkitystä sen hapettumisominaisuuksiin. Voiteluaineiden jalostus voidaan toteuttaa liuotinuuton tai vetyprosessoinnin avulla. Liuotinuutetussa voiteluaineessa hapettumisreaktion muutokset tapahtuvat hitaammin sen luontaisesti sisältämien hapettumisenestoaineiden johdosta. Liuotinuutetulle voiteluaineelle ei kuitenkaan saada yhtä tehokasta hapettumisreaktion suojaa lisääaineistuksen avulla, kuin vetyprosessoidulle voiteluaineelle. Lisäaineistettu vetyprosessoitu voiteluaine lisäksi vastustaa hapettumisreaktiota paremmin aina lisääaineistuksen loppuun kulumiseen asti, jonka jälkeen sen reaktionopeus vastaavasti kasvaa merkittävästi. [8; 14; 23]

Voiteluaineeseen jää epäpuhtauksia jo valmistusprosessin, pakkauksen ja kuljetuksen seurauksena. Tästä johtuen myös uusi voiteluaine olisi suodatettava ennen käyttöönottoa. Jopa hyvät suodatusominaisuudet omaavalta suodatusjärjestelmältä voi kuluu pitkä aika vaaditun järjestelmän puhtaustason saavuttamiseen, jos lähtötason puhtaustaso on hyvin heikko. Huono lähtötason puhtaus osaltaan myös lisää järjestelmän komponenttien kulumista korkean likamäärän vaikutuksesta, jolloin järjestelmän käyttöikä voi pienentyä merkittävästi. Voiteluainetta valittaessa tai sitä vaihdettaessa on tiedettävä voiteluaineen esisuodatusaste, jolla järjestelmän vaatimaan alkutilanteen puhtaustasoon päästään heti sen käytön alkaessa. [8; 12; 23]

Käytön aikana syntyy voiteluaineeseen epäpuhtauksia. Tämä voi olla seurausta esimerkiksi voiteluaineen pitkästä käyttöiästä tai jostakin kemiallisesta reaktiosta, kuten voiteluaineen oksidaatiosta. Yleinen kiinteiden epäpuhtauksien aiheuttaja on komponenttien kulumisen ja huohottimen kautta järjestelmään päässeet järjestelmän ulkopuolelta tulevat epäpuhtaudet. Voiteluaineen happamuusluku ja emäksisyysluku (TAN/TBN – Total Acid Number, Total Base Number) kertovat sen tilasta. Korkea TAN -luku on yleensä seurausta voiteluaineen pitkästä käyttöiästä ja oksidaatiosta. Korkea emäksisyysluku antaa viitteitä järjestelmän lisäaineiden toiminnasta ja oksidaatiota torjuvien lisäaineiden toimintakunnosta. [12; 23]

### **2.3. Voiteluaineissa esiintyvät kiinteät likapartikkelit**

Käytön aikana voitelujärjestelmän komponenteissa tapahtuu kulumista. Tämä kulumisen aiheuttaa järjestelmän sisälle kiinteitä epäpuhtauspartikkeleita ja kulumisprosessi kiihtyy partikkelimäärän kasvaessa. Voiteluainekalvon paksuudesta ja voideltavan komponentin välyksien koosta riippuva kriittinen likapartikkelikonsentraatio on järjestelmän komponenttien kannalta merkittävin kulumista kiihdyttävä tekijä. Näiden kriittisten partikkeleiden suodattaminen voiteluaineesta on yksi suurimmista järjestelmän käyttöikää lisäävistä tekijöistä. Kiinteiden metallisten ja muiden partikkeleiden lisäksi järjestelmästä voi irrota erilaisia laakereiden ja tiivisteiden keraami- ja muovipartikkeleita voiteluaineeseen. Jos järjestelmä toimii normaalisti, kulumispartikkeleita muodostuu vähän ja ne ovat kooltaan yleensä hyvin pieniä. Kun partikkelikoko kasvaa ja niiden määrä alkaa lisääntyä, on tämä yleensä seurausta järjestelmän jonkin osan virhetoiminnasta tai

pitkästä käyttöiästä. Järjestelmän komponenttien välyksien kokoiset ja tätä kokoa lähellä olevat likapartikkelit ovat komponenttien kulumisen sekä järjestelmän toiminnan kannalta ratkaisevassa asemassa. Näitä likapartikkeleita kutsutaan kriittisiksi likapartikkeleiksi. Myös kriittistä kokoa isommat likapartikkelit voivat järjestelmään päästessään aiheuttaa vaurioita ja kulumista sekä jauhautua pienemmiksi partikkeleiksi. Nämä suuret likapartikkelit eivät kuitenkaan pääse helposti niitä pienempiin välyksiin ja suodatin yleensä poistaa ne varsin nopeasti. Hyvin pienet likapartikkelit eivät kosketa yhtä aikaa molempiin voitelukohteen liukupintoihin ja näin ollen niiden aiheuttama kuluminen on vähäistä. Partikkeleiden kokoa mitataan yleensä mikrometreissä. Yksi mikrometri on metrin miljoonasosa eli  $1 \mu\text{m} = 0,000001 \text{ m}$ . Pienimmät ihmissilmän erottamat partikkelit ovat noin  $40 \mu\text{m}$  kokoisia. [3; 12; 22]

Voiteluaineen puhtautta seuraamalla pyritään havaitsemaan järjestelmän epätavallinen kuluminen ja ennakoimaan mahdolliset laiterikot sekä järjestelmän toiminnan vikatilanteet. Järjestelmäkohtaisten ominaisuuksien ja ympäristötekijöiden vaikutuksen muuttuessa on tarkan kulumisen ja sen vaikutuksien määrittäminen kuitenkin hankalaa. Haasteena käytännön mittauksissa on lisäksi tarkkojen analyysien ja tulkintojen tekeminen hyvin vähäisistä likamäärien muutoksista. Oikeanlaisen tulkinnan tekeminen järjestelmän valvonnan ja analysoinnin tuloksista, tarvitsee tuekseen kattavan kunnonvalvonta- ja mittausjärjestelmän. Lisäksi seuranta tulee tehdä pitkältä aikaväliltä, jotta epätavallinen kuluminen ja vikatilanteet pystytään erottamaan järjestelmän normaalitoiminnasta.

Järjestelmästä saatava mittaustieto antaa lähtökohdat laboratoriotestien suorittamiseen ja mahdollistaa tulosten vertaamisen. Voitelujärjestelmäkohtaisen puhtaustasovaatimuksen täyttävä suodatusratkaisun suunnittelu vaatii tuekseen tietoa niistä suodatukseen ja järjestelmään vaikuttavista tekijöistä, joissa tuleva suodatusratkaisu tulee toimimaan. Kun nämä tekijät on kartoitettu, voidaan mahdolliset laboratoriotestit aloittaa ja mitata suunnitellun suodatusjärjestelmän toiminta sekä suorituskyky laboratorio-olosuhteissa vaikuttava tekijä kerrallaan.

### **2.3.1. Epäpuhtaudet ja kuluminen**

Suodattimen yli vallitsevan paine-eron, voiteluaineen vesipitoisuuden ja sen sisältämien muiden epäpuhtauksien tarkkailu antavat tietoa järjestelmän kunnosta. Kaikkia vikaantumisia ei kuitenkaan voida havaita pelkän puhtauden mittaamisella. Esimerkiksi osa yllättävistä vikaantumisista ei välttämättä ehdi tuottaa järjestelmään epäpuhtauspartikkeleita ja siksi sitä ei voida havaita puhtausvalvonnan avulla. Voiteluaineessa olevat epäpuhtaudet voidaan jakaa niiden syntyperänsä mukaan kolmeen pääryhmään [32]. Näitä ovat seuraavat:

1. Järjestelmän komponenttien kulumisesta syntyvät kulumistuotteet
2. Järjestelmän ulkopuolelta tulevat epäpuhtaudet
3. Voiteluaineessa syntyvät epäpuhtaudet

Kulumismekanismi määrää irtoavien kulumispartikkeleiden muodon ja koon. Kulumisen luokitellaan yleisesti seuraavalla tavalla [32]:

1. Adhesiivinen eli tartuntakuluminen
2. Abrasiivinen eli hiontakuluminen
3. Pinnan väsymisestä aiheutuva kuluminen
4. Tribokemiallinen kuluminen

Adhesiivista kulumista tapahtuu kahden liikepinnan pinnankarkeuden huippujen tarttuessa toisiinsa kiinni paineen vaikutuksesta. Voiteluainekalvo ei kykene pitämään liikepintoja irti toisistaan, jolloin liikepintojen kosketuskohdassa tapahtuu tartuntakulumista. Tartuntakulumisen nopeus riippuu kahden liikepinnan materiaaleista ja kosketuspintojen kovuudesta sekä niiden suhteellisista nopeuksista. Näistä tekijöistä riippuu murtuvatko pinnankarheuksien huiput irti materiaalista vai pysyvätkö ne kiinnittyneinä kosketuksesta huolimatta. Liikepinnoista irronneet partikkelit voivat jäädä osaksi toista kosketuspintaa tai ne voivat kulkeutua voiteluaineen mukana kiihdyttäen järjestelmän komponenttien kulumista entisestään. Vaikka pintamateriaalia ei kosketuksesta irtoaisikaan, syntyy kosketuskohtaan yleensä jonkinlainen pinnan muutos. Nämä muodon muutokset aiheuttavat komponenttien takertelua, pinnan laadun heiketessä. Adhesiivinen kuluminen aiheuttaa lisäksi komponenttien kiinnileikkautumista. Adhesiivisen kulumisen syntyy yleensä heikon voitelutilanteen eli rajavoitelun seurauksena. Tämän kulumisen kannalta kriittisiä tekijöitä ovat voiteluaineen ominaisuudet kuten viskositeetti ja lisääaineistus. [3, s.9]

Abrasiivisessa eli hiontakulumisessa kahden toisensa suhteen liikkeessä olevan pinnankarkeuden huiput poistavat materiaalia liikepinnasta tai muokkaavat liikepintaa. Kuluminen aiheutuu kosketuskohdassa tapahtuvan kyntämisen, leikkautumisen tai murtumisen vuoksi. Kolmen kappaleen abrasiivisesta kulumisesta puhutaan silloin, kun pintojen väliin joutunut, usein pintoja kovemmaksi lujittunut, likapartikkeli irrottaa materiaalia liikepinnoista, kulkiessaan voiteluaineen mukana. Abrasiiviselle kulumiselle on ominaista sen hidasta ja tasainena eteneminen. Kulumistuotteet myös kulkeutuvat voiteluaineen mukana, jolloin kulumista voidaan seurata erilaisten voiteluaineanalyysien ja puhtauden valvonnan avulla sekä kulumistuotteita poistaa järjestelmästä oikeanlaisella suodatuksella. [3; 22; 32]

Pinnan väsymisestä aiheutuvaa kulumista tapahtuu yleisesti vierivien kosketusten yhteydessä. Komponenttien kuormankantokyky perustuu vierivien elementtien ja vierintäpintojen elastiseen muodon muutokseen sekä voiteluaineen viskositeetin paineriippuvuuteen. Voiteluaineen viskositeetti kasvaa kosketusalueella vallitsevan korkean paineen vuoksi. Tämä ja vierivien pinta-alan kasvu kosketuskohdasta ulospäin pitävät voideltavat pinnat erillään. Ohuen voiteluainekalvon vuoksi pinnat ovat alttiita kiinteiden epäpuhtauksien vaikutukselle. Välykseen mahtuvat kriittisen kokoiset likapartikkelit voivat nostaa materiaalin pintapaineen moninkertaiseksi voitelukohdassa. Toistuvat kuormitukset ja suuret paineen nousut

voivat aloittaa särön muodostumisen ja sen etenemisen materiaalin pinnassa tai pinnan alla. Materiaalin pinta voi myös kuoriutua kuormitustilanteiden seurauksena. Pinnasta ei kuitenkaan välttämättä voi havaita muutosta ennen kuin se alkaa kuoriutua. Kuoriutumisen alkaessa kulumisen kiihtyy vaurioitumisen levitessä koko kosketusalueelle. Väsymismuodonmuutoksessa vierintäelementtien edestakainen liike saa aikaan jäljen kulumiselementin vastinpintaan. Pinnasta ei irtoa materiaalia, vaan materiaali sulautuu kosketuskohtaan väsyttävän kuormituksen vaikutuksesta. [3; 15; 19]

Tribokemiallisiin kulumismekanismeihin kuuluvat erilaisten komponenttien ja voiteluaineen tribokemiallisten reaktioiden kautta tapahtuva vanheneminen ja tämän aiheuttama ominaisuuksien heikkeneminen. Kemiallisen reaktion nopeus riippuu mekaanisesta energiasta, lämpötilasta, reagoivien aineiden ominaisuuksista ja säteilystä. Katalyyteillä sekä tuomalla järjestelmään mekaanista energiaa voidaan aktivaatioenergiaa pienentää. Lämpötilan nouseminen aiheuttaa reaktion kiihtymistä. Todellisesta kemiallista rakennetta, reaktionopeutta ja reaktiomekanismeja on hyvin vaikea määrittää tarkasti. Tribokemiallisen reaktion tuloksena syntyneet reaktiotuotteet toimivat katalyytteinä käynnissä olevalle reaktiolle ja voivat kiihdyttää reaktiota entisestään. [3; 20]

Ympäristöstä tulevat epäpuhtaudet pääsevät yleensä voitelujärjestelmään sen huohottimen ja erilaisten tiivisteiden kautta. Yleisimmät ympäristöstä tulevat epäpuhtaudet ovat hiekka, hiekkapöly, erilaiset prosessipölyt sekä kondensoitua vesi. Ympäristöstä voi päästä järjestelmään epäpuhtauksia myös huolimattoman käyttöönoton ja huolto- sekä korjaustöiden seurauksena. Uudelle voitelujärjestelmän öljylle ei aina ole asetettu selkeää tai standardoitua puhtaustasoa. Tästä johtuen uusien voiteluöljyjen puhtaustasot voivat vaihdella järjestelmästä toiseen niitä käyttöönotettaessa. Uusi voiteluöljy tulisi aina suodattaa ennen järjestelmään lisäämistä puhtausvaatimusten saavuttamiseksi. [1; 2; 18; 20]

### 3. SUODATTAMINEN JA PUHTAUSTASOT

Suodattimien tehtävänä on pitää voiteluaineen puhtaus vaaditulla tasolla ja suojata järjestelmän komponentteja likapartikkeleilta. Voitelujärjestelmissä suodattimen toimintaan vaikuttavat useat eri tekijät. Laboratoriomittauksilla, kuten multipass-testillä mitatut arvot suodattimen toiminnasta eivät välttämättä kerro kaikkea suodattimen toiminnasta käytännön olosuhteissa. Tämän vuoksi suodattimen valinnassa tulee ottaa huomioon myös ympäristön ja järjestelmän itsensä tuomat muuttujat suodatusominaisuuksiin ja suodattimen toimintaan. Voitelujärjestelmän toiminnan kannalta järjestelmä ei voi koskaan olla liian puhdas. Suodatusjärjestelmä ja puhtauden ylläpitäminen on kuitenkin yleensä kompromissi käyttövarmuuden ja ylläpitoon liittyvien kustannusten välillä. Yksi yleinen syy voitelujärjestelmien käyttöhäiriöihin ja komponenttien vikatilanteisiin on voiteluaineen sisältämät epäpuhtaudet. Epäpuhtauksien aiheuttamien häiriöiden seurauksena voi syntyä suuriakin taloudellisia menetyksiä korjauskustannuksien ja käyttökeskeytyksien vuoksi. Lisäksi voitelujärjestelmän komponenttien elinikä voi pienentyä merkittävästi, jos järjestelmän puhtaus ei ole niiden toiminnan vaatimalla tasolla. [12; 28; 32]

Suodattimen toimintaa mitataan sen yli olevan paine-eron sekä tulovirran ja lähtövirran partikkeleiden lukumäärän suhteen avulla, järjestelmän sekä suodattimen käytön aikana. Suodattimeen jääneen likamäärän massaa kutsutaan suodattimen likakapasiteetiksi. Suodatinmateriaalin tukkeutumisesta aiheutuvan virtausvastuksen ja virtausvastuksen aiheuttaman paine-eron noususta suodattimen yli voidaan mitata ja määrittää suodatinelementin tukkeutumisaste. Suodatinelementin vaihtoväli määritetään yleisesti sen yli olevan paine-eron perusteella. Joissakin järjestelmissä suodattimen vaihto toteutetaan määräajoin esimerkiksi muun järjestelmän huollon yhteydessä.

Voitelujärjestelmässä käytettävät suodattimet varustetaan yleensä ohivirtausventtiilillä, jonka tarkoituksena on ohjata tilavuusvirta suodatinelementin ohi paine-eron kasvaessa elementille liian suureksi. Ohivirtausventtiilin läpimenevä tilavuusvirta pyritään yleensä vielä suodattamaan erillisen suodatinelementin avulla, jolloin epäpuhtauksia sisältävä voiteluaine ei pääse suoraan voideltavaan kohteeseen.

Kaikkia suodatinelementin vikatilanteita ei voida todeta sen yli olevasta paine-erosta. Ohivirtausventtiilin aukeaminen voi estää paine-eron nousemisen ja tästä saatava tieto voi näin jäädä kokonaan huomaamatta. Myös elementin repeämiset ja muut mekaaniset vauriot eivät välttämättä nosta sen yli olevaa paine-eroa. Elementin revetessä paine-ero voi jopa laskea, suuremman tilavuusvirran läpäistessä suodatinelementin. Suodattimen kunnonvalvonnassa paine-eron muutosten mittaaminen varmistaa oikeanlaisen tiedon saamisen suodatinelementin toiminnasta. Suodattimen

elinkaaresta saadaan viitteitä sen paine-eron ja likakapasiteetin perusteella. Käytössä olevasta suodattimesta voidaan määrittää sen elinkaaren vaihe mittaamalla tilavuusvirtaa ja paine-eroa suodatinelementin yli. Näitä mittaustuloksia vertaamalla suodatinelementille tehtyihin multipass-testituloksiin voidaan määrittää suodatinelementin käytössä oleva elinikä karkeasti. Vertailussa tulee kuitenkin muistaa multipass- testin rajoitukset ja muiden kuten ympäristötekijöiden sekä järjestelmän ominaisuuksien vaikutukset suodattimen elinikään. Suodatinelementin tulo- ja lähtövirtauksen partikkelilaskennalla saadaan tietoa elementin toiminnasta jatkuvan toiminnan tilassa. Lisäksi tulovirran partikkelimitaus antaa kuvan järjestelmässä olevasta lian määrästä ja sen muutoksista.

### 3.1. Puhtausvaatimukset voitelujärjestelmissä

Hyväksyttävä puhtaustaso on aina jonkinlainen kompromissi siitä aiheutuvien kulujen, suunnittelun, käyttöolosuhteiden ja kunnossapidon välillä. Vaatimukset täyttävää puhtaustasoa määritettäessä ja siitä aiheutuvia kustannuksia laskettaessa on järjestelmän toimintaa syytä tarkastella sen koko elinkaaren ajalta. Investointi- ja ylläpitokustannuksiltaan kallis suodatusjärjestelmä, joka takaa järjestelmälle sen vaatimukset täyttävän puhtauden, voi pitkällä aikavälillä tulla kokonaiskustannuksiltaan halvemmaksi esim. vähempien komponenttivaurioiden, huoltotoimenpiteiden ja järjestelmän seisokkien vuoksi. Voitelujärjestelmän puhtaustason määrittäminen aloitetaan yleisesti järjestelmän komponenteista. Voitelujärjestelmästä selvitetään sen epäpuhtauksille herkimmat komponentit ja niiden osat. Ne antavat järjestelmän puhtaudelle lähtötason, johon suodatusjärjestelmän avulla tulee päästä. Komponenttien likaherkkyuden lisäksi suodattimen valintaan vaikuttavat järjestelmään muodostuvien likapartikkeleiden konsentraatio ja lukumäärä, sekä vallitsevat käyttöolosuhteet. [3]

Voitelujärjestelmissä vallitsevat paineet ovat yleensä pieniä, joten järjestelmän paineen suuruuden huomioiminen voitelujärjestelmän suodatuksen suunnittelussa on yleensä vähäisemmässä merkityksessä. Suurten tilavuusvirtojen ja korkeiden viskositeettien vuoksi itse suodatusjärjestelmän aiheuttaman paine-eron suuruus on merkittävä tekijä elementtien kokoa mitoitettaessa. [3; 20; 22]

Järjestelmän puhtauteen ja suodattimen toimintaan vaikuttavat useat eri tekijät. Järjestelmällä voi esim. olla käytön aikana korkeat liikenopeudet, raskas työsykli tai suuret kuormitukset, jolloin järjestelmän suodatusta tulee parantaa toiminnan kuluttavuuden ja tästä aiheutuvan lisääntyneen likamäärän vuoksi. Samoin tulee tehdä voitelujärjestelmän suodatukselle silloin, kun järjestelmä sisältää paljon vettä ja kun järjestelmää tullaan huoltamaan harvoin. Järjestelmän puhtaus on iso kokonaisuus, johon voidaan vaikuttaa useiden erilaisten tekijöiden avulla. Useilla tekijöillä on lisäksi ristikkäisvaikutuksia, minkä johdosta yksittäisen tekijän vaikutuksen mittaaminen ja analysoiminen on haasteellista. [3; 20; 22]

Harvoin tehtävät huoltotoimenpiteet antavat järjestelmälle pitkän likaantumisaajan, jolloin järjestelmän käytön alussa on likataso hyvä pitää hieman normaalia alhaisempana. Pienempi likamäärä aiheuttaa lisäksi vähemmän kulumista ja tätä kautta järjestelmään muodostuu vähemmän likapartikkeleita, jolloin suodattimen tarvitsee sitoa itseensä vähemmän likapartikkeleita järjestelmästä. Voitelujärjestelmissä parempi puhtaustaso on perusteltua myös silloin, kun järjestelmän vikatilanteista voisi aiheutua vaaraa ympäristölle tai ihmisille. Lisäksi näiden jo mainittujen tekijöiden yhteisvaikutukset tulee ottaa huomioon voitelujärjestelmän puhtaustasoa määritettäessä. Voitelujärjestelmissä lisäksi voiteluaineen viskositeetillä on vaikutusta vaadittavaan järjestelmän puhtaustasoon ja suodatuksen valintaan. [14; 20; 22]

### 3.2. Suodattimien luokittelu ja rakenne

Voitelujärjestelmissä käytettävät suodattimet koostuvat kahdesta pääosasta, suodatinrungosta ja suodatinelementistä. Suodattimen yhteyteen asennetaan yleensä myös erilaisia venttiileitä ja mittareita, kuten paineindikaattoreita ja ohivirtausventtiileitä. Suodatinelementin yleisimmät valmistusmateriaalit ovat lasikuitu, paperi ja metalliverkko. Yleensä suodatinmateriaalit laskostetaan suodatuspinta-alan kasvattamiseksi. Laskoksia voi olla hyvin monta kerrosta ja kerroksien välissä käytetään erilaisia tukiverkkoja sekä liankeruuta ja sen sitomista parantavia materiaaleja. Suodatinmateriaalikerroksista tehty laskostus nivotaan erillistä tukevaa yleensä metallirakennetta vasten. Virtaussuunta suodatinelementissä voi olla sisältä ulos tai ulkoa sisälle. Yleisesti käytetään virtaussuuntaa, jossa voiteluaine kierrätetään suodatinelementin läpi ulkoa sisälle päin. Tällä virtaussuunnan valinnalla pystytään pienentämään suodattimen kokoa ja elementti kestää paremmin korkeampia paineita sekä suuria voiteluaineen viskositeetin muutoksia. Ulkoa sisälle päin tilavuusvirtaisilla suodatinelementeillä, eri materiaalikerrokset nivotaan yhteen ja sijoitetaan suodatinkuoren sisälle. Suodatintyypistä riippuen kuori voidaan tiivistää hartsilla tai erilaisten liimojen avulla. Molempiin suodatinpatruunan päihin liitetään päätykupit, jotka tiivistetään liimalla tai hartsilla suodatinpatruunaan. Myös kerroslaskostukset liitetään yhteen erilaisten liimojen tai hartsin avulla. [5; 28]

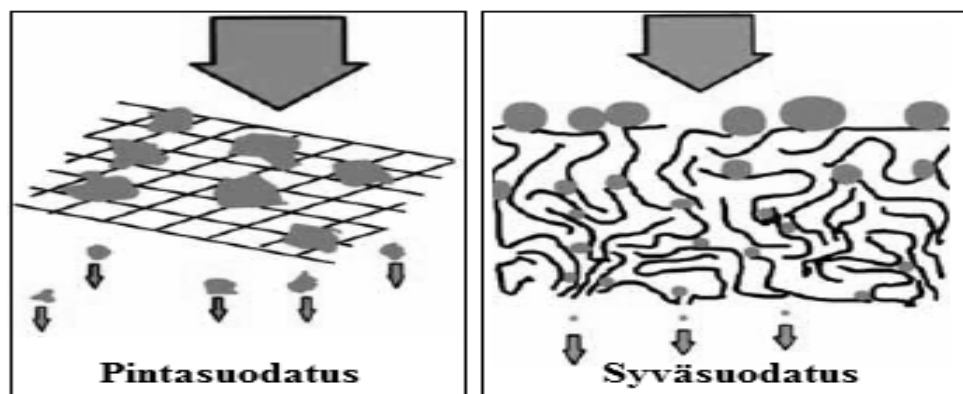
Suodatinrakenteessa on tehtävä kompromisseja, koska suodattimen paine-eroa ei voida kasvattaa äärettömästi. Paine-ero kertoo suodattimen toiminnasta ja siitä miten paljon likaa suodatinelementtiin on kertynyt. Paine-eroa mitattaessa pyritään sille määrittämään oikea turvallisuusmarginaali, jolla suodatinelementti vielä toimii turvallisesti ja ohivirtausventtiili ei ole avautunut. Näin optimoidaan elementin käyttöikä ja suodatinjärjestelmän huoltoväli. Yleisesti ottaen pienen paine-eron aiheuttavilla suodatinpatruunoilla on huono liankeruukapasiteetti sekä suodatustehokkuus ja päinvastoin. Suodatinelementissä olevan materiaalin kuitujen koko, niiden tiheys sekä paksuus määrittelevät elementin suodatustehokkuuden ja sen yli vallitsevan paine-eron suuruuden. Lasikuituelementin materiaali koostuu hyvin ohuista kuiduista. Kuitujen paksuudella ja niitä eri tavoin verkottamalla saadaan

suodatinelementeille vaatimusten mukaiset läpäisy- ja suodatusominaisuudet. Suodattimesta aiheutuvaa paine-eroa voidaan pienentää ja sen likakapasiteettia kasvattaa elementin kokoa suurentamalla. [5; 28]

Suodatinelementin ympärillä on niin sanottu suodatinrunko, jossa sijaitsevat suodattimeen tulevan hydraulinesteen tulo- ja lähtöliitännät, lianilmaisain sekä suodattimen kansi tai kierre, jolla suodatinpesä kiinnitetään paikoilleen. Suuria tilavuusvirtoja käsiteltäessä sekä voiteluaineen viskositeetin ollessa suuri, voi suodatinjärjestelmässä olla useita suodatinrunkoja erilaisille suodatinpatruunoille. Näin eri viskositeetin omaaville voiteluaineille mahdollistetaan oikeanlainen suodatus, ohjaamalla se eri runkoon kuin normaaliviskositeetin tapauksessa. Suurilla tilavuusvirroilla voidaan lisäksi käyttää useaa suodatinta rinnakkain, jolloin suodattimista aiheutuva paine-ero ei pääse kasvamaan liian suureksi. [28]

Suodatinelementin liankeruukapasiteetti on yksi elementin laadun mitta. Ideaalitulanteessa elementti sitoisi itseensä kaiken sen läpi kulkevan lian ja tästä ei aiheutuisi lainkaan paine-eroa suodatinelementin yli. Paine-ero suodattimen yli ei saa nousta liian suureksi ja tämä voidaan estää erillisten ohivirtausventtiilin avulla. Ohivirtausventtiili nimensä mukaisesti ohjaa tilavuusvirran suodatinelementin ohi. Kaikissa järjestelmissä tämä ei kuitenkaan ole mahdollista, koska järjestelmä voi sisältää herkkiä komponentteja, jotka eivät salli suodattamattoman voiteluaineen likapartikkeleita. Ohivirtausventtiilin tarkoituksena on estää paineen nouseminen liian suureksi ennen suodatinta. Venttiilin läpi menevä tilavuusvirta voidaan suodattaa erillisen, yleensä karkeamman suodattimen avulla. Alhainen lämpötila kasvattaa hydraulinesteen viskositeettia esimerkiksi kylmäkäynnistystilanteissa, mikä lisää suodattimen yli olevaa paine-eroa. Lisäksi erilaiset suodatinelementin kuormitustilanteet ja tilavuusvirran vaihtelut voivat nostaa hetkellisesti paine-eroa suodattimen yli, jopa ohivirtausventtiilin avautumispaineeseen asti. Nämä tekijät tulee ottaa huomioon ohivirtausventtiilin avautumispainetta määritettäessä.

Suodatinelementit jaetaan kahteen ryhmään niiden suodatusmekaniikan mukaisesti. Nämä ryhmät ovat syvyysuodattimet ja pintasuodattimet. Ryhmät on esitetty kuvassa 3.1. [7]



*Kuva 3.1. Pintasuodatus ja syväsuodatus [7 s. 2].*



Lasikuituelementit, joiden huokosrakenne on hyvin tasajakoinen, säilyttävät suodatustarkkuutensa paremmin kuin ne elementit, joissa huokosrakenteen koko vaihtelee. Vaihtelevan huokosrakenteen omaavissa suodatinelementeissä suodatettava voiteluaine virtaa aina helpointa reittiä pitkin suodatinrakenteen läpi. Tämä tarkoittaa reittiä, jossa voiteluaineen virtausta vastustetaan vähiten eli suodattimen rakenteen huokosten välit ovat suurimmat. Rakenteen epätasaisuus vähentää merkittävästi sen suodatustehokkuutta ja tehokkuus voi myös vaihdella suuresti suodattimen käyttöiän kasvaessa. Ilmiöstä johtuen, saman suodatustarkkuuden saavuttamiseksi ja sen ylläpitämiseksi koko suodattimen käyttöiän ajan, on epätasaisen rakenteen omaavasta suodatinelementistä tehtävä paksumpi kuin tasaisen rakenteen suodattimesta. [7; 16]

Suodatinelementin kerrosrakenteeseen saadaan parempi liankeruukapasiteetti, kun sen rakenne muodostetaan asteittain tiheneväksi. Tällaisessa rakenteessa virtaussuunnassa uloin kerros on läpäisylytään suurempi kuin alimmat kerrokset. Näin pintakerrokset toimivat suodatinelementissä esisuodattimen tavoin ja poistavat suurimmat likapartikkelit ennen tiheimmän suodatuksen kerroksia. Pintasuodatinelementti voidaan puhdistaa ja näin uudelleen käyttää. Tällaisia suodatinelementtejä käytetään yleisesti automaattisuodattimissa, joissa elementit voidaan puhdistaa tilavuusvirran suuntaa muuttamalla tai erillisellä huuhteluvirtauksella. Syvyysuodatinelementtiä ei voida puhdistaa ja käyttää uudelleen, vaan ne ovat kertakäyttöisiä. Pintasuodattimilla on yleisesti alhainen paine-ero suodatinelementin yli, koska ne ovat verkkosuodattimia. Yleisin materiaali verkoille on metallilanka, josta ne on punottu. [7]

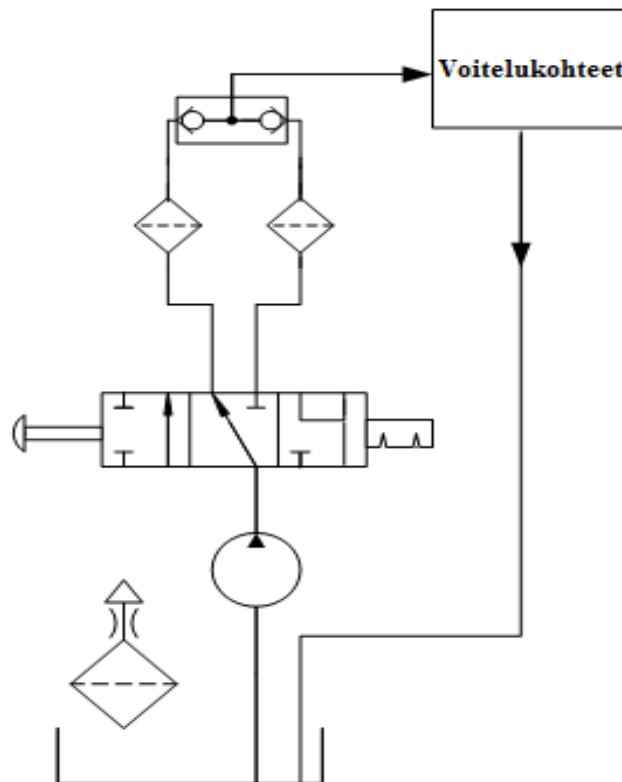
Hyvän suodatustarkkuuden takaamiseksi on suodatusmateriaalirakenteesta tehtävä yhtenäinen ja sen huokosten väliset etäisyydet pidettävä suodatettavaksi haluttua partikkelikokoa hieman pienempänä. Rakenteesta ei voida kuitenkaan tehdä liian tiivistä, sen aiheuttaman paine-eron vuoksi ja usein huokoskokoa joudutaan kasvattamaan paine-eron noustessa liian suureksi. Huokosten välisten etäisyyksien pienuudella, tasajakoisuudella ja kerrosrakenteilla pyritään saamaan aikaan haluttu suodatustarkkuus tietyille likapartikkeleille. Lasikuitumateriaalissa käytettävät kuidut liitetään verkoksi hartsin avulla ja suodatinmateriaalin muoto vahvistetaan lämmittämällä rakenne uunissa. Lasikuiturakennetta muodostettaessa on jokainen kuitu käsiteltävä hartilla. Kuidut, jotka jäävät käsittelyn ulkopuolelle eivät sitoudu rakenteeseen ja aiheuttavat suodatustehon heikkenemistä. Jos kuituja on useampia, voivat ne aiheuttaa suodatinelementin painekestävyys- ja tilavuusvirtavaihteluiden kesto-ominaisuuksien heikkenemistä. Elementin suodatustehokkuuteen vaikuttaa lisäksi tuotannossa saavutettava elementin, saumojen ja liimausten tiiviys. [7; 31]

### 3.3. Suodattimen valinta ja sijoittaminen

Voitelujärjestelmän suodatinvalinta lähtee liikkeelle järjestelmän ominaisuuksien, kuten todellisten tilavuusvirtojen määrittämisestä. Paine- ja imulinjasuodattimien tapauksessa todelliset tilavuusvirrat ovat yleisesti voiteluainepumpun maksimituoton suuruisia. Paluulinjasuodattimien tilavuusvirtaa määritettäessä huomioidaan paluulinjaan tulevien tilavuusvirtojen summa ja paluulinjan koko. Linjaan tulevien tilavuusvirtojen määrittäminen voi olla joissakin tapauksissa mahdotonta tai varsin hankalaa, jolloin yleisenä mitoitusohjeena käytetään 2 – 2,5 kertaista pumpun tuottoa. [6; 2; 5; 18]

Suodattimen aiheuttama paine-ero on yksi sen valintakriteereistä. Liian suuri paine-ero aiheuttaa ongelmia voitelun varmistamisella ja tätä kautta koko järjestelmän toiminnalle. Lämpötilan vaihtelut lisäävät käytettävän voiteluaineen viskositeetin muutoksia. Korkea viskositeetti aiheuttaa virtausvastuksen kasvun suodatinelementissä ja kasvanut virtausvastus nostaa elementin yli olevaa paine-eroa. Elementtiä valittaessa on näin ollen myös huomioitava järjestelmän käyttölämpötila-alue. Suodatinelementin materiaalia valittaessa on lisäksi huomioitava materiaalin yhteensopivuus käytetyn voiteluaineen sekä sen sisältämien lisäaineiden kanssa. Tällä varmistetaan se, ettei suodatinmateriaalista liukene voiteluaineeseen sinne kuulumattomia likapartikkeleita. Myös järjestelmässä esiintyvän lian konsentraatio ja likamäärä vaikuttavat suodatusratkaisun valintaan. Esimerkkinä voidaan mainita suuren likamäärän ominaisuus tukkia hieno suodatinmateriaali varsin nopeasti tai hyvin pienet likapartikkelit, jotka eivät tartu karkean suodatusasteen omaavaan suodatinmateriaaliin lainkaan.

Suodattimet nimetään yleisesti niiden sijainnin mukaan. Paluuvirtasuodattimiksi kutsutaan suodattimia, jotka sijaitsevat nimensä mukaisesti järjestelmän paluuvirrassa kaikkien muiden järjestelmän komponenttien jälkeen. Nämä suodattimet suodattavat voiteluaineen ennen kuin se palaa järjestelmän säiliöön. Päävirtasuodatuksella pyritään suojaamaan voideltavaa kohdetta ja suodatin tai suodattimet sijoitetaan järjestelmän pumpun jälkeen tai suojasuodattimeksi ennen voideltavaa kohdetta. Suurien tilavuusvirtojen vuoksi päävirtasuodatin on voitelujärjestelmissä usein rakenteeltaan ns. kaksoissuodatin. Rakenne mahdollistaa suodattimilta suurempien tilavuusvirtojen läpäisemisen ilman, että paine-ero kasvaa liian suureksi ja näin suodatusjärjestelmälle saadaan myös suurempi likakapasiteetti ilman yksittäisen elementin koon suurentamista. Kun rakenne lisäksi varustetaan negatiivisen peiton omaavalla vaihtoventtiilillä, voidaan elementit huoltaa järjestelmän toimiessa, voiteluaineen virratessa vain toisen elementin läpi. Päävirtasuodatusjärjestelmän yksinkertaistetun rakenteen hydraulikaavio on esitetty kuvassa 3.2. Järjestelmän imulinjasuodattimien tarkoitus on suojella järjestelmän pumppua likapartikkeilta ja suodatin on sijoitettu nimensä mukaisesti pumpun imulinjaan. Kiertovoitelujärjestelmissä yleisimmin käytettävät suodatustavat ovat päävirtasuodatus eli painelinjasuodatus ja säiliökiertosuodatus. [6; 2; 5]



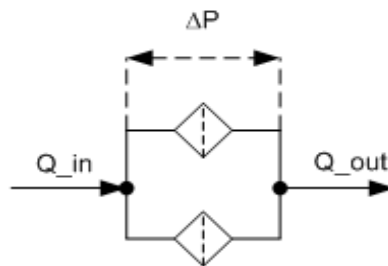
*Kuva 3.2. Päävirtasuodatusjärjestelmän periaatekuva.*

Suurissa voitelujärjestelmissä, kuten prosessiteollisuudessa käytettävissä järjestelmissä suodatus on toteutettu erillisen säiliökiertosuodatuksen avulla. Säiliökiertosuodatus mahdollistaa suodattimen toiminnan kannalta optimaaliset olosuhteet verrattuna päävirtasuodatukseseen. Olosuhdetekijät, kuten voiteluaineen tilavuusvirta suodattimen läpi pystytään pitämään tasaisena, koska erillisen suodatusjärjestelmän toiminta ei riipu varsinaisen järjestelmän käytöstä. Erilliseen säiliökiertosuodatukseseen voidaan lisäksi yhdistää muitakin voiteluaineen huoltotoimenpiteitä, kuten veden ja ilman erottimia. Usein säiliökiertosuodatusjärjestelmä liitetään jo olemassa olevan esim. päävirtasuodatuksen rinnalle parantamaan voiteluaineen huollettavuutta sekä puhtautta. [1; 6; 2]

Voitelujärjestelmää käyttöön otettaessa säiliökiertosuodatuksella voidaan varmistaa järjestelmälle vaadittava voiteluaineen puhtaustaso jo ennen varsinaisen järjestelmän käynnistämistä. Myös voiteluaineeseen liittyvät huoltotoimenpiteet, kuten täyttö- ja vaihtotilanteet voidaan suorittaa säiliökiertosuodatuksen avulla niin, että järjestelmässä olevan voiteluaineen puhtaustaso pysyy komponenttien vaatimalla tasolla. Säiliökiertosuodattimissa ei yleensä tarvita päävirtasuodatusjärjestelmästä tuttua kaksoisrakennetta, koska erillisen säiliökiertojärjestelmän pumppu voidaan pysäyttää suodattimen huollon ajaksi ja tilavuusvirta sekä suodattimen likakapasiteetti voidaan mitoittaa järjestelmän toimintaan ja huoltoväliin sopiviksi. Vaikeammin huollettavissa kohteissa, kuten tuulivoimaloissa, joissa myös huoltovälit ovat pidempiä, voidaan

säiliökiertosuodatusjärjestelmä varustaa kaksoisrakenteelta pidemmän huoltovälin saavuttamiseksi. [1; 6; 2]

Kaksoisvirta- eli rinnansuodatus voidaan muodostaa kahden saman tai erilaisen suodatussuhteen omaavien elementtien avulla. Rinnankytkennällä suodatusjärjestelmälle saadaan suurempi likakapasiteetti ja samalla vähennetään suodattimista johtuvaa painehäviötä. Rinnankytkentää käytetään erityisesti suurilla tilavuusvirroilla ja erilaisten suodatusarvojen saavuttamiseksi. Kuvassa 3.3. on esitetty suodattimien rinnankytkennän periaatekuva. Kytkennässä suodattimien läpi virtaa yhtä suuret tilavuusvirrat.



**Kuva 3.3.** Suodattimien rinnankytkentä.

Rinnankytkennän tehollinen suodatussuhde on esitetty yhtälössä (1) [20; 21].

$$\beta_{\text{eff}} = \frac{N_{\text{in}}}{N_{\text{out}}} \quad (1)$$

jossa

- $\beta_{\text{eff}}$  on tehollinen suodatussuhde [-]
- $N_{\text{in}}$  on suodattimelle tulevien partikkeleiden määrä [kpl/l]
- $N_{\text{out}}$  on suodattimelta lähtevien partikkeleiden määrä [kpl/l]

Suodattimilta lähtevä partikkelivirta saadaan ratkaistua yhtälöstä (2) [20; 21].

$$Q_{\text{out}} N_{\text{out}} = \frac{Q_{\text{in}} N_{\text{in}}}{n \beta_{1x}} + \frac{Q_{\text{in}} N_{\text{in}}}{n \beta_{2x}} + \dots + \frac{Q_{\text{in}} N_{\text{in}}}{n \beta_{nx}} \quad (2)$$

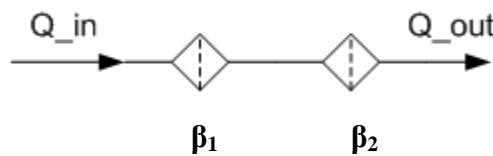
yhtälön tekijät ovat

- $Q_{\text{in}}$  on suodattimelle tuleva tilavuusvirta [l/min]
- $Q_{\text{out}}$  on suodattimelta lähtevä tilavuusvirta [l/min]
- $\beta_{nx}$  on suodattimen  $n$  suodatussuhde [-]
- $n$  on suodattimien lukumäärä [kpl]

Yhtälöstä (2) voidaan johtaa rinnansuodatuksen tehollisen suodatussuhteen arvo sijoittamalla yhtälöön (1).

$$\beta_{\text{eff}} = \frac{n}{\frac{1}{\beta_{1x}} + \frac{1}{\beta_{2x}} + \dots + \frac{1}{\beta_{nx}}} \quad (3)$$

Sarjasuodatuksessa suodatinelementit on kytketty peräkkäin. Kuvassa 3.4 kaksi suodatinelementtiä on kytketty sarjaan, jolloin suodatettava voiteluaine virtaa molempien elementtien läpi. Kuten rinnansuodatuksessa, myös sarjasuodatuksessa elementit voivat olla karkea- ja hienosuodattimia tai molemmat saman suodatusarvon omaavia elementtejä. Sarjasuodatuksella pyritään lisäämään suodatinjärjestelmän suodatustehokkuutta ja tätä kautta järjestelmän puhtautta.



**Kuva 3.4.** Suodattimien sarjakytkentä.

Sarjaankytkettyjen suodattimien teholliseksi suodatussuhteeksi (kuva 3.4.) saadaan johdettua yhtälöiden (2) ja (3) avulla sekä sijoittamalla (1).

$$\beta_{\text{eff}} = \beta_1 \beta_2 \quad (4)$$

Sarjaankytkettyjen suodattimien beta-arvot kerrotaan keskenään [14].

Voitelujärjestelmissä voidaan käyttää erilaisten kytkentöjen, kuten rinnan- ja sarjakytkentöjen yhdistelmiä. Yhdistelmillä optimoidaan suodatusjärjestelmän ominaisuuksia ja kustannuksia. Yhtälöt (2) ja (3) pätevät, jos suodattimet ovat kytkettyinä toistensa läheisyyteen ja erillisiä likapartikkeleita ei pääse muodostumaan yksittäiselle suodattimelle. Jos kytketyille suodattimille johdetaan erilliset tilavuusvirrat, likapartikkelimäärät ja -konsentraatiot, joudutaan suodatusjärjestelmän tehollinen suodatussuhde laskemaan suodatinkohtaisesti aina erikseen. [20; 21]

### 3.4. Suodattimen suorituskyvyn mittaaminen

Voitelujärjestelmissä käytettäville syvyysuodattimille ei voida määrittää yhtä kiinteää suodatussuhteenarvoa. Suodatin erottaa voiteluaineessa olevista suurista likapartikkeleista suurimman osan tai lähes kaikki, pienemmistä partikkeleista suhteellisesti pienemmän osan ja hyvin pienet partikkelit läpäisevät suodattimen

kokonaan. Partikkelikokoluokille määritetyt suodatussuhteen arvot myös muuttuvat suodattimen eliniän kuluessa. Suodatussuhteen mittaamiseen on kehitetty standardoitu menetelmä Multipass-testi ISO 16889 [26].

Testissä olevan suodattimen tulo- ja lähtövirrasta mitataan erikokoisten ja ennalta määritettyjen partikkeleiden lukumäärät. Erilaiset likamäärät luodaan testijärjestelmään standardoidun testipölyn avulla. Suodattimen aiheuttaman painehäviön kehitystä seurataan mittaamalla paine suodattimen tulo- ja lähtölinjasta. Multipass-testissä järjestelmään syötetään koko ajan testipölyä ja se kierrätetään hydraulinesteen mukana suodattimen läpi. Testin tuloksena saadaan eri partikkelikokojen suodatussuhdetta kuvaavat  $\beta_x$ -arvot, suodattimen likakapasiteetti ja suodattimen aiheuttama paine-ero sen likaantuessa. Multipass-testi suoritetaan laboratorio-olosuhteissa, jotka voivat poiketa käytännön ympäristöstä suuresti. Testi ei lisäksi ota huomioon viskositeetin vaihtelun, paineen muutosten tai esimerkiksi likapartikkeleiden konsentraation vaikutusta suodattimelle mitattuihin beta-arvoihin.

Suodatinvalmistajat ilmoittavat suodattimille ns. absoluuttiarvon, tietyllä partikkelikokoluokalla yleensä mikrometreinä. Tämä absoluuttiarvo ei kuitenkaan kuvaa suodattimen läpäisevää pienintä partikkelikokoa, vaan se tarkoittaa multipass- testillä määritettyä partikkelikokoa, jonka suodatussuhteen arvo on noin 200. Suurin likapartikkeli, joka pääsee suodattimen läpi, ei ole suodatinmateriaalin materiaalihuokosten koon suhteen muuttuva tekijä, vaan kuten aikaisemmin on todettu, sen suodattumiseen vaikuttavat hyvin monet erilaiset tekijät.

Suodattimille on standardeilla määritelty useita erilaisia niiden suorituskykyä ja turvallisuutta mittaavaa testiä. Lisäksi suodatinvalmistajilla on usein omat laadun varmistukseen ja turvallisuuteen liittävät mittauksensa. Tämän diplomityön mittauksissa tarkastellaan likamäärän ja lian hiukkaskokojakauman vaikutusta suodattimen beta-arvoihin ja järjestelmän puhtauteen multipass-testilaitteistolla mitattuna. Erillisellä voiteluöljyjärjestelmällä tehtyjen singlepass-mittausten ja muuttuvan likamäärän mittausten tarkoituksena on selvittää lisäksi suodattimen beta-arvot kertaläpäisytilanteessa ja mitata voiteluaineen viskositeetin, likamäärän sekä tilavuusvirran vaikutukset beta-arvoihin suodattimen normaalitoiminta-alueella.

### 3.4.1. Puhtausstandardit ja puhtausluokat

Voiteluaineen puhtautta määritettäessä on tunnettava niihin liittyvät mittaustandardit. Kansainvälinen hydraulinen ja voiteluaineiden puhtauden ilmoittamiseen liittyvä standardi ISO 4406 [ISO 4406:1999] on yksi monista tarkoitukseen soveltuvista mittaustandardeista. Puhtausstandardin menetelmä noudattaa kolmen partikkelikoon järjestelmää, jossa ilmoitettavat partikkelit ovat  $\geq 4 \mu\text{m}(c)$ ,  $6 \mu\text{m}(c)$ , ja  $14 \mu\text{m}(c)$  yhdessä millilitrassa hydraulinestettä. Merkintä (c) tarkoittaa, että kyseessä on uuden ISO 4406:1999 mukainen partikkeliluokittelu. Liitteessä 1 on lueteltuna suodatukseen, suodatusjärjestelmiin ja puhtausluokkiin liittyviä ISO standardeja selityksineen. Standardien avulla on pyritty helpottamaan suodattimien testaamista ja testitulosten vertaamista keskenään.

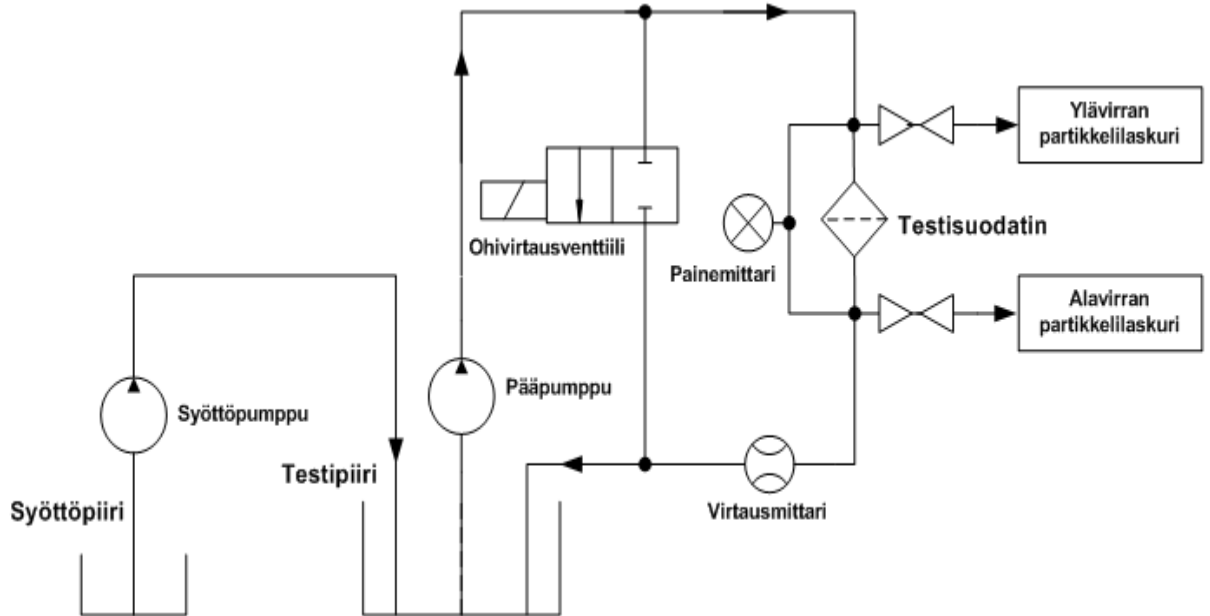
Myös järjestelmien puhtaudenvalvonnan ja -mittaamisen yhtenäistämiseksi on luotu suuri määrä erilaisia standardeja. ISO 4406:1999 mukainen puhtausluokka ilmaistaan edellä mainittujen kolmen partikkelikoon avulla kolminumeroisella koodilla. Esimerkiksi puhtausluokassa 16/14/12 ensimmäinen luku 16 tarkoittaa 4  $\mu\text{m}(\text{c})$  partikkeleiden lukumäärää, toinen luku 14, 6  $\mu\text{m}(\text{c})$  lukumäärää ja kolmas luku 12, 14  $\mu\text{m}(\text{c})$  lukumäärää standardissa määriteltyjen partikkelimäärien luokkaraja-arvojen mukaisesti. Nämä lukumäärien raja-arvot sekä puhtausluokat on esitetty taulukossa 3.1.

**Taulukko 3.1. ISO 4406:1999 puhtausluokat.**

Puhtausluokan numero	Partikkelimäärä / ml >	Partikkelimäärä / ml $\leq$
>28	2 500 000	
28	1 300 000	2 500 000
27	640 000	1 300 000
26	320 000	640 000
25	160 000	320 000
24	80 000	160 000
23	40 000	80 000
22	20 000	40 000
21	10 000	20 000
20	5 000	10 000
19	2 500	5 000
18	1 300	2 500
17	640	1 300
16	320	640
15	160	320
14	80	160
13	40	80
12	20	40
11	10	20
10	5	10
9	2.5	5
8	1.3	2.5
7	0.64	1.3
6	0.32	0.64
5	0,16	0,32
4	0,08	0,16
3	0,04	0,08
2	0,02	0,04
1	0,01	0,02
0	0	0,01

### 3.4.2. Multipass-testi

Standardin ISO 16889:1999 mukainen multipass-testi on menetelmä, jolla mitataan suodattimien suodatussuhteen, likakapasiteetin ja suodatinelementtien painehäviöitä. Laitteiston rakenne on havainnollistettu kuvassa 3.5 Standardin ja mittauksen tarkoituksena on luoda vertailukelpoisia tuloksia eri suodattimien välille. Mittauksella määritetyn beta-arvon avulla suodattimia voidaan vertailla keskenään, kuitenkin tietyin varauksin. Testissä suodattimen läpi kierrätetään testipölyä ja samalla uutta testipölyä lisätään järjestelmässä kiertävään hydraulineesteeseen. [26; 13]



**Kuva 3.5.** Yksinkertaistettu multipass-testilaitteiston hydraulikaavio [13].

Testijärjestelmällä pyritään kuvaamaan jatkuvasti likaantuvaa hydraulijärjestelmää laboratorio-olosuhteissa. Järjestelmän alkupuhtaus tarkastetaan ennen elementin asentamista ja mittauksen aloittamista. Alkupuhtauden varmistamisen jälkeen puhtaan suodatinelementin aiheuttama painehäviö saadaan mitattua multipass- testin alussa puhtaalla hydraulinesteellä ja tasaisella tilavuusvirralla. Multipass-testin alettua testattavan suodattimen suodatussuhdetta tarkkaillaan automaattisten partikkelilaskureiden avulla, ottamalla näytteitä suodattimen ylä- ja alavirrasta. Erillisen järjestelmän syöttöpiirin gravimetrisen tason ja syöttötilavuusvirran avulla voidaan laskea suodattimen likakapasiteetti syötetyn testipölyn ja järjestelmään jääneen sekä sieltä poistetun testipölyn avulla grammamääränä sinä aikana, kun suodattimen yli oleva paine-ero on kasvanut testin lopetusarvoon saakka. Testattavalle suodattimelle ominainen painehäviökäyrä, saadaan mittaamalla suodattimen yli olevaa paine-eroa koko testin ajalta. Multipass-testissä standardoitua testipölyä syötetään järjestelmän päätilavuusvirtaan tai säiliöön, jossa se sekoittuu suodattimelle menevään hydraulinesteeseen ja näin muodostaa hydraulinesteen kanssa suodattimen ylävirran epäpuhtaustason. Järjestelmän partikkelimäärää ja -konsentraatiota mitataan jatkuvasti suodattimen ylä- ja alavirroista otetuista näytevirroista. Multipass-testi päättyy, kun systeemiin on syötetty tarvittava määrä testipölyä, jolloin suodatinpatruunan yli oleva paine-ero saavuttaa testin pysäyttävän arvon. [26; 13]

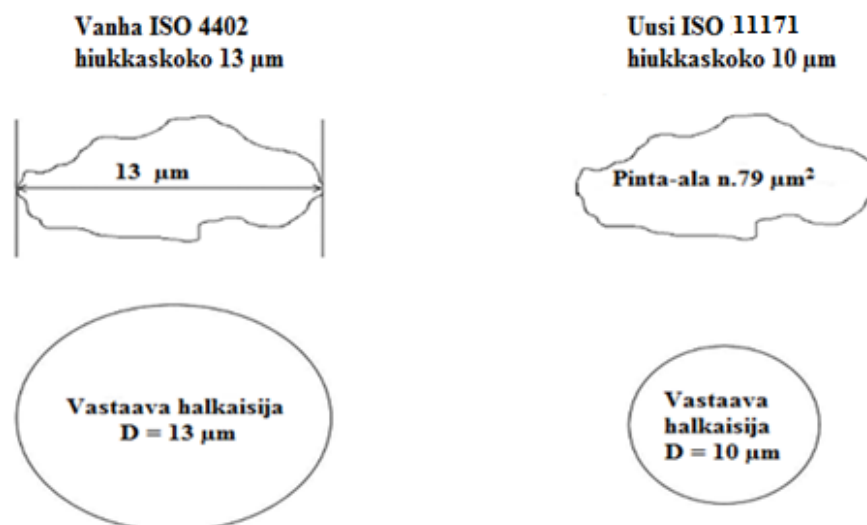
Voiteluainetta täytyy kierrättää suodattimen läpi useita kertoja ennen kuin multipass-testillä määritettyjen suodattimen beta-arvojen mukainen järjestelmän partikkelimäärä ja puhtaustaso saavutetaan. Suodattimen eliniän kuluessa ja liian kertyessä suodattimeen, sen yli oleva paine-ero kasvaa ja myös suodattimen beta-arvot muuttuvat. Yleensä lasikuitumateriaalisten suodattimien beta-arvot heikkenevät suodattimen alkavaan tukkeutumispaine-eroon asti, jonka jälkeen beta-arvot lähtevät



voimakkaaseen nousuun tukkeutumisesta johtuen. Suodatinmateriaalin tulee sitoa siihen jääneet partikkelit ja esim. tilavuusvirran tai paineen muutokset eivät saisi irrottaa sitoutuneita partikkeleita takaisin järjestelmään. Hyvät suodatussuhteen arvot alhaisella suodattimen paine-erolla ja pienellä likamäärällä voivat huonontua merkittävästi suodattimen eliniän kuluessa. Multipass-testi on aina nopeutettu suodattimen elinkaaren mittausta ja käytetyt likamäärät ovat suuria varsinkin suurten likakapasiteettien omaavilla suodattimilla. Testissä käytettävä suuri likamäärä käytännön järjestelmiin verrattuna voi antaa väärän kuvan suodattimen toiminnasta puhtaammilla järjestelmillä. Hyvät suodatussuhteen arvot suurella järjestelmän likamäärällä voivat olla ratkaisevasti pienemmät alhaisella likamäärällä ja testipölystä eroavalla todellisten komponenttien kulumistuotteiden partikkelikojakaumalla ja -muodolla.

### 3.4.3. Multipass-testissä käytettävä testipöly

Aikaisempi ISO puhtausstandardi määritteli pienimpien partikkeleiden puhtausluokaksi  $x > 5 \mu\text{m}$  partikkeleiden lukumäärän. Nykyisessä ISO 11171 -standardissa pienin puhtausluokka ottaa huomioon jopa hyvin pienet  $x = 4 \mu\text{m(c)}$  partikkelit, jotka vastaavat vanhan ISO 4402 standardin mukaisesti määritettyjä  $x \approx 1 \mu\text{m}$  partikkeleita. Tämä johtuu partikkelikoon erilaisesta määrittämisestä standardien välillä. Aikaisemmassa standardissa partikkelikoko määritettiin likapartikkelin suurimman halkaisijan avulla. Uudessa standardissa partikkelikoko määritetään partikkelin varjokuvan pinta-alasta muodostettavan pallon suurimman halkaisijan avulla. Partikkelikoon määrittämisen eroavaisuuksia havainnollistaa kuva 3.6. Vuonna 1999 julkaistiin lisäksi uusi multipass-testiä koskeva standardi ISO 16889, joka korvasi vanhan ISO 4572:1981 -standardin. Standardin muutoksessa lisäksi vanha testissä käytettävä ACFTD (Air Cleaner Fine Test Dust) testipöly korvattiin uudella MTD (Medium Test Dust) testipölyllä ja itse testilaitteiston rakenne määriteltiin tarkemmin. [2; 13]



*Kuva 3.6. Hiukkaskoon määrittelyn vertailu [13].*

Vanha testipöly ACFTD oli rakenteeltaan hyvin epätasaista ja partikkelit olivat niin kooltaan kuin muodoltaan hyvin erilaisia keskenään. Partikkelijakauma vaihteli myös testierien välillä. Tämän vuoksi testin uusiminen täysin samanlaisena oli hyvin hankalaa ja eri testausvälineistöllä sekä pölyerällä voitiin saada täysin toisistaan poikkeavia mittaustuloksia, myös samoille suodattimille. Vanha testipöly korvattiin uudella MTD testipölyllä, jonka partikkelikoko, -muoto ja -jakauma on yhtenäisempi eri testipölyerien välillä. Vanhan ja uuden standardin partikkelikokojen vertailu on esitetty taulukossa 3.2. [26; 13]

**Taulukko 3.2. ISO 4402 ja ISO 11171 mukaisilla standardeilla saadut hiukkaskoot [13]**

ACFTD-kokoluokka ISO 4402:1991 [µm]	ISO MTD NIST-koko ISO 11171:1999 [µm(c)]	ACFTD-koko ISO 4402:1991 [µm]	ISO MTD NIST-kokoluokka ISO 11171:1999 [µm(c)]
1,0	4,2	<1	4
2,0	4,6	2,7	5
3,0	5,1	4,3	6
5,0	6,4	5,9	7
7,0	7,7	7,4	8
10,0	9,8	8,9	9
14,0	13,0	10,2	10
15,0	13,6	15,5	14
20,0	17,5	16,9	15
25,0	21,2	23,4	20
30,0	24,9	30,1	25
40,0	31,7	37,3	30

Taulukossa vertaillaan standardien ISO 4402 ja ISO 11171 mukaisilla kalibrointimenetelmillä saatuja partikkelikokoja ja esitetään näiden vastaavuudet. ACFTD testipölyllä tehty kalibrointi ja sen avulla mitattu 1 µm partikkelikoko vastaa uutta ISO MTD -kalibroinnin jälkeen mitattua partikkelikokoa 4,2 µm(c), 3 µm partikkeli 5,1 µm(c) partikkeliä ja niin edelleen. Lämpimitaltaan yli 14 µm partikkelikoot ovat selvästi ACFTD hiukkaskokoja pienemmät. [3; 26; 13]

#### 3.4.4. Järjestelmän gravimetrinen taso ja suodattimen likakapasiteetti

Mittausjärjestelmän gravimetrinen taso ( $G_b$ ), ilmoittaa järjestelmään lisättävän ja sinne jäävän kokonaislikamäärän. Gravimetrinen taso ja sen mittaaminen määritellään standardissa ISO 4405. Taso ilmoittaa epäpuhtauden kuivapainon suhteen tiettyyn hydraulinesteen määrään yksikössä [mg/l]. Multipass-testissä järjestelmän ylävirran gravimetrinen taso pyritään pitämään vakiona lisäämällä järjestelmään testipölyä ennakkoon laskettu määrä tietyllä tilavuusvirralla. Suodattimen likakapasiteetti ilmoitetaan epäpuhtauden määränä, jolla elementin yli oleva paine-eron raja-arvo saavutetaan. Gravimetrisen tason avulla määritetystä suodattimen likakapasiteetista ei kuitenkaan käy ilmi mikä osa syötetystä testipölystä on jäänyt kiertämään järjestelmään testin lopussa ja kuinka paljon pölystä on poistunut järjestelmästä poistovirtauksen kautta. Tästä johtuen multipass- testillä saatua, syötetyn testipölyn ja ylävirran

gravimetrisen arvon avulla laskettua likakapasiteettia kutsutaan näennäiseksi likakapasiteetiksi. Näennäinen likakapasiteetti  $C_n$  voidaan laskea yhtälön (5) avulla. [26]

$$C_n = tG_iQ_i \quad (5)$$

yhtälöissä tekijät ovat

- $t$  on testiaika [min]
- $G_i$  on ylävirran perusgravimetrisen taso [g/l]
- $Q_i$  on tilavuusvirta suodattimen läpi [l/min]

Järjestelmään jäänyt likamäärä voidaan laskea sen nestetilavuuden ja ylävirran gravimetrisen tason avulla. Poistotilavuusvirran ja suodattimen alavirran gravimetrisen tason avulla voidaan laskea järjestelmästä poistotilavuusvirran kautta hävinnyt likamäärä. Jos näytteenottovirtoja ei palauteta testipiiriin säiliöön, poistuu epäpuhtauspartikkeleita testijärjestelmästä myös näytteenottovirtojen mukana. Poistettu likamäärä riippuu ylä- ja alavirran gravimetrisistä tasoista sekä näytteenottotilavuusvirroista.

Erilaisten suodattimien likakapasiteettia vertaillessa, multipass- testillä saatavan näennäisen likakapasiteetin avulla, on tuloksiin syytä suhtautua varauksella. Näennäinen likakapasiteetti voi olla hyvä esimerkiksi huonot erotusominaisuudet omaavalle suodattimelle, joka päästää suurimman osan syötetystä testipölystä takaisin järjestelmään. Suodattimen paine-ero nousee hitaasti, koska siihen ei jää partikkeleita ja samalla ylävirtaan syötetään jatkuvasti lisää likapartikkeleita. Suodattimia vertaillessa on likakapasiteetin lisäksi syytä tarkkailla myös niiden erotusominaisuuksia. Näin vertaillessa saadaan todellisempi kuva suodattimen ylläpitämästä puhtaudesta ja sen todellisesta käyttöiästä sekä likakapasiteetista. Todellinen suodattimen likakapasiteetti  $C_t$  lasketaan yhtälön (6) avulla. [20; 21]

$$C_t = C_n - G_fV - Q_pG_i t - Q_nG_y t - Q_nG_a t \quad (6)$$

missä

- $C_n$  on näennäinen likakapasiteetti [g]
- $G_f$  on ylävirtaan jäänyt gravimetrisen taso [g/l]
- $V$  on testijärjestelmän tilavuus [l]
- $Q_p$  on poistotilavuusvirta [l/min]
- $Q_n$  on näytteenottotilavuusvirrat [l/min]
- $G_i$  on ylävirran perusgravimetrisen taso [g/l]
- $G_y$  on suodattimen ylävirran gravimetrisen taso [g/l]
- $G_a$  on suodattimen alavirran gravimetrisen taso [g/l]

Yhtälöstä (6) nähdään, että todellinen likakapasiteetti on korkeintaan yhtä suuri kuin näennäinen likakapasiteetti, mutta yleensä aina tätä pienempi. Ero johtuu järjestelmään jääneestä ja sieltä poistuneesta testipölystä. Gravimetrinen tason avulla likamäärien kehitystä eri kohdissa järjestelmää laskettaessa itse gravimetrinen taso määritetään punnitun testipölyn, järjestelmän erillisen syöttöpiirin tilavuuden ja tilavuusvirtojen avulla. Haasteena laskennassa on oikeiden eri järjestelmän kohdissa vallitsevien gravimetristen tasojen määrittäminen ja varsinkin suodattimen alavirrassa vallitsevan tason määrittäminen luotettavasti. [3; 7; 17; 21]

Suodatinelementin ominaislikakapasiteetti saadaan jakamalla multipass-testillä saatu testipölykapasiteetti suodattimen läpi menevällä tilavuusvirralla. Ominaislikakapasiteetin avulla voidaan verrata suodatinmateriaalien ja -elementtien välisiä ominaisuuksia keskenään ja multipass-testillä mitattua suodattimen likakapasiteettia käytetään yleisesti suodattimen käyttöiän määrittämiseen. Suodattimia verrattaessa on kuitenkin syytä muistaa, että likakapasiteettiin vaikuttavat myös monet järjestelmän sisäiset ja sen ulkopuoliset tekijät. Likakapasiteettiin vaikuttavia tekijöitä ovat esim. järjestelmässä vallitsevan lian määrä ja sen partikkelikokojakauma. Kuten R.K. Tessmann havaitsi tutkimuksessaan vertaamalla multipass-testissä syötetyn testipölyn partikkelikoon vaikutusta viiden eri valmistajan  $\beta_{10}$  suodatinelementin näennäiseen likakapasiteettiin [29; 30]. Tutkimuksessa havaittiin, että näennäinen likakapasiteetti voi pienten 0 – 5  $\mu\text{m}$  partikkelien osalla muuttua merkittävästi suodatinkohtaisten erotusominaisuuden vuoksi. Suuremmilla yli 15  $\mu\text{m}$  partikkeleilla likakapasiteetin muutos oli vähäisempi.

Oklahoman yliopistossa ja Tampereen teknillisessä yliopistossa tehtyjen tutkimusten mukaan vaihteleva ja sykkivä virtaus vaikuttaa suodattimen erotusominaisuuksiin ja likakapasiteettiin [20; 25]. Tutkimusten mukaan suodattimen likakapasiteetti voi hetkellisesti kasvaa vaihtelevalla virtauksella, riippuen suodattimen materiaalin kyvystä sitoa itseensä järjestelmästä jo erotetut likapartikkelit. Ilmiötä selittää osaltaan edellä kuvattu, näennäinen likakapasiteetti ja sen arvon paraneminen huonon suodatussuhteen omaaville suodattimille. Vaihteleva ja sykkivä virtaus voi irrottaa suodattimeen jo jääneitä likapartikkeleita takaisin testikiertoon ja samalla huonontaa suodattimen suodatustehokkuutta.

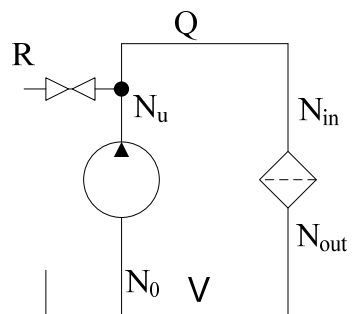
### 3.5. Suodatusjärjestelmän partikkelimäärän kehitys

Järjestelmän kiinteiden likapartikkeleiden lukumäärän kehitystä suodatuksen edetessä voidaan kuvata differentiaaliyhtälön avulla. Yhtälö perustuu järjestelmään eri tavoin tulevien ja sieltä lähtevien partikkeleiden lukumäärän laskentaan. Yksinkertaistetun suodatusjärjestelmän hydraulikaavio on esitetty kuvassa 3.7. Suodattimen suodatustehoa kuvaava erotusaste eli suodattimen erottamien likapartikkeleiden osuus kokonaispartikkelimäärästä saadaan ratkaistua yhtälöllä (7).

$$E_x = 100 \% * [ 1 - \left( \frac{1}{\beta_x} \right) ] \quad (7)$$

jossa

$E_x$  on suodattimen erotusaste partikkelikokoalla  $x$ .



**Kuva 3.7.** Yksinkertaistetun suodatusjärjestelmän hydraulikaavio.

Tessmann esitti suodatusjärjestelmää kuvaavan differentiaaliyhtälön muotoon [20].

$$N_u V = N_0 V + \int R dt + \int N_{out} Q dt - \int N_{in} Q dt \quad (8)$$

jossa

$N_u$  on kokoa  $x$  suurempien likapartikkeleiden määrä tilavuusvirtayksikössä voiteluainetta ennen suodatinta [kpl/l]

$V$  on järjestelmän tilavuus [l]

$N_0$  tarkoittaa järjestelmässä ennen käytön aloittamista olevien, kokoa  $x$  suurempien likapartikkeleiden määrää tilavuusyksikköä kohden [kpl/l]

$R$  tarkoittaa eri tavoin muodostuvien kokoa  $x$  suurempien likapartikkeleiden määrää aikayksikössä [kpl/min]

$N_{out}$  tarkoittaa kokoa  $x$  suurempien likapartikkeleiden määrää tilavuusvirtayksikköä kohden suodattimen jälkeen [kpl/l]

$N_{in}$  tarkoittaa kokoa  $x$  suurempien likapartikkeleiden määrää tilavuuvirtayksikköä kohden ennen suodatinta [kpl/l]

$Q$  on suodattimen läpi menevä tilavuusvirta. [l/min]

Yhtälö (8) kuvaa tietyn likapartikkelikoon määrää järjestelmässä. Käyttöönottaessa järjestelmää se sisältää tietyn määrän epäpuhtauspartikkeleita. Näiden partikkeleiden summa on esitetty yhtälössä (9) [15; 17; 20; 21].

$$N_0 = N_{0v} + N_{0n} + N_{0k} + N_{0l} \quad (9)$$

jossa

- $N_{0v}$  on valmistuksesta jääneiden partikkeleiden määrä järjestelmässä [kpl/l]
- $N_{0n}$  on voiteluaineen lähtötilanteen partikkelimäärä, kun se lisätään järjestelmään [kpl/l]
- $N_{0k}$  on huollosta ja korjauksesta jääneiden partikkeleiden määrä [kpl/l]
- $N_{0l}$  on voiteluaineen lisäyksestä tulleet partikkelit [kpl/l]

Ulkopuolelta järjestelmään pääsevien ja järjestelmän sisällä syntyvien partikkeleiden kappalemäärien summa on esitetty yhtälössä (10) [21].

$$R = R_{sis} + R_h + R_t + R_{pois} \quad (10)$$

jossa

- $R$  on partikkeleiden syöttönopeus [kpl/min]
- $R_{sis}$  on järjestelmän sisällä syntyvät partikkelit [kpl/min]
- $R_h$  on huohotuksen mukana tulleet partikkelit [kpl/min]
- $R_t$  on tiivisteiden kautta tulleet partikkelit [kpl/min]
- $R_{pois}$  on järjestelmästä eri tavoin poistuneet partikkelit [kpl/min]

Voitelujärjestelmän likapartikkelimäärää lisäävät komponenttien kuluminen, huohottimen ja erilaisten tiivisteiden kautta järjestelmään pääsevät likapartikkelit sekä voiteluaineen lisäyksen tai vaihdon mukana järjestelmään tulevat likapartikkelit. Uusi voiteluaine sisältää lisäksi aina valmistuksesta jääneitä likapartikkeleita. Järjestelmästä poistetaan epäpuhtauksia suodatuksen avulla. Järjestelmästä poistuu epäpuhtauksia voiteluaineen vaihdon yhteydessä ja epäpuhtaudet voivat kerääntyä järjestelmän komponenttien pinnoille sedimentiksi. [20; 21]

Derivoimalla ja ratkaisemalla termit yhtälöstä (8) sekä sijoittamalla siihen yhtälö (6), saadaan se muotoon (11).

$$\frac{dN_u}{dt} = \frac{R + Q \left( \frac{N_{in}}{\beta} - N_{in} \right)}{V} \quad (11)$$

Sijoittamalla tähän yhtälö (1) ja järjestelemällä tekijöitä uudelleen saadaan yhtälö muotoon (12).

$$\frac{dN_u}{dt} + \frac{Q}{V} \left( \frac{\beta-1}{\beta} \right) N_{in} = \frac{R}{V} \quad (12)$$

Alkutilanteessa kun  $t = 0$ , on  $N_{in} = N_0$ , jolloin differentiaaliyhtälön ratkaisu voidaan kirjoittaa muotoon (13).

$$N_u = \frac{R\beta}{Q(\beta-1)} + \left[ N_0 - \frac{R\beta}{Q(\beta-1)} \right] e^{-\frac{Q(\beta-1)}{V\beta}t} \quad (13)$$

Yhtälö kuvaa suodatinjärjestelmän toimintaa ja partikkelimäärän kehitystä tietyllä partikkelikoolla. Epäpuhtaustasoon vaikuttavat tekijät ( $N_0$ ,  $R$ ,  $\beta$ ,  $V$  ja  $Q$ ) ovat vakioita. Suodatusprosessia kuvaava numeerinen ratkaisu saadaan selville ratkaisemalla yhtälö halutun muuttujan suhteen.

### 3.6. Viskositeetin ja tilavuusvirran vaikutuksesta

Voiteluaineen viskositeetillä on suuri vaikutus suodattimen aiheuttamaan paine-eroon. Yleisesti suodatinvalmistajat ilmoittavat suodattimen aiheuttaman paine-eron 30 cSt viskositeetillä ja multipass-testijärjestelmällä mitattuna. Korkeilla voiteluaineen viskositeeteilla suodattimen aiheuttama paine-ero voi muuttua merkittävästi esimerkiksi kylmäkäynnistyksen yhteydessä. Korkea viskositeetti sekä paineen muutokset voivat lisäksi vahingoittaa suodatinmateriaalia ja aiheuttaa suodatustehokkuuden laskun. Diplomityössä tehtyjen mittauksien tarkoituksena oli selvittää järjestelmän normaalikäyttölämpötila-alueella tapahtuvien voiteluaineen viskositeetin muutoksien vaikutus kahden eri suodatusasteen beta-arvoihin.

Käytännön voitelujärjestelmissä tilavuusvirta on vain harvoin vakio. L.E. Bensch tutki vuonna 1974 vaihtelevan virtauksen vaikutusta suodatusominaisuuksiin [9; 11; 12]. Bensch vertasi vaihtelevan virtauksen multipass-testituloksia saman suodattimen tasaisen virtauksen multipass-testituloksiin. Tutkimuksessa vaihtelevassa virtauksessa järjestelmän lopulliset gravimetriset tasot nousivat virtauksen vaihtelutaajuuden kasvaessa. Tästä voidaan todeta, että suodattimen beta-arvot heikkenevät virtauksen muuttuessa. [9; 11; 12]

Tutkimuksessa järjestelmän gravimetriset tasot kasvoivat jopa viisinkertaisiksi alkutilanteeseen nähden ja suodattimen suodatussuhde  $\beta_{10}$  suodattimille oli pudonnut alimmillaan 16 kertaa pienempiin arvoihin, verrattuna tasaisen virtauksen multipass-mittauksiin. Vaihteleva virtaus alensi pienten, noin 10  $\mu\text{m}$  partikkeleiden erotusarvoja merkittävästi varsinkin niillä suodattimilla, joilla tasaisen virtauksen beta-arvot olivat suuria. Erotusarvot huononivat myös alle 20  $\mu\text{m}$ :n partikkeleilla, mutta selvästi vähemmän kuin 10  $\mu\text{m}$ :n partikkeleilla. Suuremmilla 20, 30 ja 40  $\mu\text{m}$ :n likapartikkeleilla vaihtelevan virtauksen vaikutus oli tutkimuksen mukaan hyvin pieni tai vaikutusta ei ollut lainkaan. Muuttuvan virtauksen aiheuttama suodatusominaisuuksien lasku ei ole vakio läpi koko partikkelijakauman vaan sen vaikutus on suurimmillaan pienillä likapartikkeleilla. [9; 11; 12]

Bencshin mukaan tilavuusvirran suuruudella on havaittu beta-arvoja parantava vaikutus, jos partikkelikokoa vastaava beta-arvo on pieni [9]. Näissä tapauksissa suuren tilavuusvirran on tutkittu parantavan suodattimen suodatussuhdetta. Tilavuusvirran suuruutta rajoittaa voitelujärjestelmän pumpun tuotto ja suodatinelementin yli sallittava paine-eron suuruus. Hetkellisesti muuttuvan virtauksen vaikutusta suodattimen toimintaan on tutkittu Oklahoman Yliopistossa [10]. Tutkimuksessa multipass-testilaitteistolla luotiin ajoittain suuruudeltaan vaihtelevaa virtausta suodattimen läpi. Tutkimuksessa havaittiin suodattimen suodatussuhteen heikkenevän tilavuusvirran muutoksen suuruuden kasvaessa. Mittaustulokset osoittavat, että sykkivä virtaus heikentää suodattimelle tasaisella tilavuusvirralla mitattuja ominaisuuksia ja todellinen järjestelmän puhtaustaso voi heikentyä merkittävästi, jos voitelujärjestelmän virtaus vaihtelee suuresti. [9; 10]

Tässä diplomityössä suoritettujen vaihtuvan virtausnopeuden multipass-mittauksilla oli tarkoitus selvittää virtausnopeuden ja tämän aiheuttaman likamäärän muutoksen vaikutus suodattimen beta-arvoihin. Mitatut virtausnopeustasot pidettiin suodattimelle mitoitettuna toiminta-alueen sisällä ja virtauslaji turbulenttina kaikissa mittauksissa. Mittauksilla oli lisäksi tarkoitus havainnollistaa järjestelmän normaalitoiminnan aiheuttamien virtauksen muutosten vaikutus suodatinelementtiin ja järjestelmän puhtauteen.

### **3.7. Voiteluöljyn puhtauden mittaaminen**

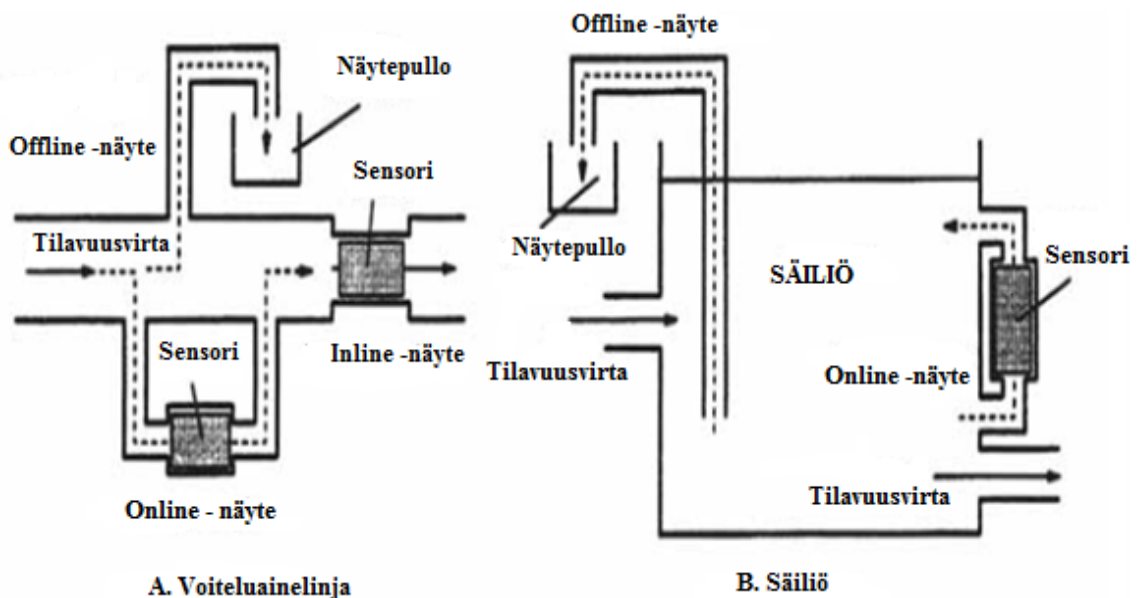
Luotettavaan järjestelmän puhtauden seuraamiseen ja analysointiin tarvitaan pitkälle kehitettyjä mittausmenetelmiä, jotka osoittavat hyvin pienet partikkelimäärän muutokset järjestelmän eri osissa. Järjestelmän puhtausmittauksen näytteenottoaika voi sijaita useissa eri kohdissa järjestelmää riippuen näytteenottotarkoituksesta. Voitelujärjestelmissä puhtausnäyte voidaan ottaa esim. voiteluainelinjasta ennen painesuodatinta ja/tai suodattimen jälkeen. Näytteenottoaikoja voi olla myös useita eri kohdissa mitattavaa järjestelmää ja sen komponentteja. Useammalla näytteenottoaikalalla saadaan parempi kokonaiskuva järjestelmän puhtaudesta ja siinä tapahtuvista muutoksista. [20; 27; 34]

Voiteluaineen puhtauden mittaamisessa ja kunnonvalvonnassa käytettäviä menetelmiä on useita. Voiteluöljyn kuntoa voidaan tarkkailla ihmisaistein ja partikkelimääriä voidaan mitata järjestelmästä offline-, online-, tai inline-näytteiden avulla. Kuvassa 3.8 on havainnollistettu eri näytteenottomenetelmien sijaintia mitattavassa järjestelmässä [27]. Inline-näytteenotossa mittausanturi nimensä mukaisesti on sijoitettu suoraan mitattavaan tilavuusvirtaan ja mitattava voiteluaine virtaa mittaussensorin läpi. Online-näytteenotossa anturi on asennettu päätilavuusvirran kanssa rinnan. Online-anturin läpi mennyt tilavuusvirta voidaan palauttaa takaisin päälinjaan tai se voidaan ohjata erillisen vuotolinjan kautta esimerkiksi järjestelmän säiliöön. Pullonäytteenotossa näytteenottoaikoja voi olla useita. Pullonäytteitä otettaessa erityisen tärkeää on varmistaa näytepullon puhtaus ja oikein valittu näytteenottoaika



ennen varsinaisten mittausten aloittamista ja analysointia. Kaikki mittalaitteistot tulee lisäksi kalibroida ennen käyttöönottoa ja mittauksia. [12; 24; 25; 27]

TTY/IHA:ssa (Tampereen Teknillinen Yliopisto, Department of Intelligent Hydraulics and Automation) tehtyjen online -tutkimusten perusteella on havaittu, että todellisen järjestelmän puhtausluokan määrittämiseksi tarvitaan järjestelmän pitkäaikaista seuranta [24]. Järjestelmän puhtauden todellinen tila saadaan selville vasta kun käytettävä online -mittausyhte on täysin huuhtoutunut ja näyttää todellista järjestelmän kierrossa olevaa likamäärää. Voiteluainejärjestelmästä saataviin online-mittauksituloksiin vaikuttavat myös järjestelmässä oleva vesi- ja ilmamäärä sekä mittausyhteen ja antureiden puhtauden lähtötaso. Lisäksi eri mittausajankohdat ja mittauspaikka vaikuttavat partikkelilaskennan tuloksiin. [24; 25; 27]



*Kuva 3.7. Puhtauden mittaamisessa käytettävät näytteenottotavat [27].*

Ilma- ja vesimäärän vaikutusta online -mittareilla saatuihin tuloksiin on vaikea määrittää etukäteen. J. Rinkisen väitöskirjassa ja TTY/IHA:ssa tehdyissä hydraulijärjestelmien partikkelilaskennoissa saatujen tutkimustuloksien perusteella yli 200 ppm vesipitoisuus antaa yhdestä kolmeen ISO-luokkaa suurempia puhtausluokkia järjestelmän puhtaudeksi kuin mikroskoopin avulla pullonäytteistä tehdyt laskelmat [24; 25]. Samaiset tutkimustulokset osoittavat alle 200 ppm vesipitoisuuksilla noin yhden ISO-luokan pienempiä puhtausluokkia online-laskurilla saaduille tuloksille verrattaessa niitä mikroskooppilaskennalla saatuihin tuloksiin. Tutkimustulokset osoittavat, että vesi- ja ilmamäärän vaikutukset voitelujärjestelmästä otettuihin mittaustuloksiin tulee ottaa huomioon tuloksia analysoitaessa ja järjestelmän partikkelimääriä laskettaessa. [24; 25; 27]

Mikroskoopin avulla tehtävässä näytteen analysoinnissa voidaan vesi ja ilmakuplat erottaa muista näytteessä olevista likapartikkeleista ja näin laskea kiinteiden likapartikkeleiden koko sekä määrät tarkasti. Pullonäytteenotto on kuitenkin herkkä erilaisten häiriötekijöiden vaikutukselle ja näytteenotto sekä analysointivälineistön käyttäminen vaatii asiantuntemusta. Lisäksi pullonäyte antaa vain hetkellisen kuvan järjestelmässä esiintyvistä likamäärästä näytteenottokohdassa. [25; 25; 27]

Optiseen laskentatapaan perustuvien partikkelilaskurien avulla voitelijärjestelmän partikkelimäärät saadaan selville järjestelmän käytön aikana varsin nopeasti. Optiset mittauslaitteistot täytyy kuitenkin kalibroida tarkasti, jotta mittaustulokset olisivat luotettavia. Optisia mittalaitteita käytettäessä on lisäksi huomioitava sen antureiden kyllästymisrajat sekä mahdollinen koinsidenssi-ilmiö suurilla partikkelimäärillä. Koinsidenssi-ilmiössä partikkelilaskuri laskee kaksi erillistä päällekkäin tai osittain toistensa päällä olevaa partikkelia yhdeksi partikkeliksi. [12; 24; 27]

## 4. VOITELUÖLJYSUODATTIMIEN MITTAUKSET

Järjestelmässä oleva epäpuhtaus voidaan jakaa kahteen pääryhmään, materiaaliepäpuhtauksiin sekä sellaiseen energiaan, joka on vahingollista järjestelmän toiminnalle ja luotettavuudelle [3 s.12]. Tähän diplomityöhön liittyvissä mittauksissa tarkastellaan näistä epäpuhtauksista kiinteitä likapartikkeleita ja niiden suodattamista sekä vaikutusta suodattimen toimintaan. Suodatinelementeistä mitattiin niiden kyky poistaa järjestelmästä epäpuhtauksia muuttuvissa lika-, virtaus- ja viskositeettiolosuhteissa multipass- ja singlepass-testilaitteistojen avulla. Lähtötason likamäärät muodostettiin erilaisten testipölyjen avulla. Mittauksien tavoitteena oli selvittää miten eri likamäärät ja lian partikkelikokojakauma vaikuttavat suodattimen beta-arvoihin ja tätä kautta järjestelmän puhtauteen. Lisäksi mittausten tarkoituksena oli arvioida standardin mukaisella multipass- testillä saatujen suodattimen beta-arvojen luotettavuutta ja beta-arvojen kehitystä suodattimen käytön aikana. Erillisen singlepass-voitelujärjestelmän avulla verrattiin suodattimen normaalitoiminnan aikaisia beta-arvoja ja järjestelmän lian kehitystä multipass-järjestelmällä mitattuihin tuloksiin.

Suodatinjärjestelmän matemaattinen yhtälö osoittaa, että tasaisissa olosuhteissa suodattimen alavirran partikkelimäärään vaikuttavat suodattimeen syötettävän lian määrä, tilavuusvirrat ja suodattimelle ominainen lian erotuskyky. Yhtälöstä (13) nähdään, että järjestelmään tulevan likamäärän kasvaessa tarvitaan vastaavasti erotusominaisuuksiltaan parempi suodatin, jotta alavirran puhtaustaso pysyisi ennallaan. Kun järjestelmään valitaan hyvät suodatusominaisuudet omaava suodatin jo heti sen käytön alussa, pitää tämä suodatin järjestelmän puhtaustason parempana ja kulumistuotteita muodostuu järjestelmään vähemmän. Jos kulumistuotteita muodostuu järjestelmään vähemmän, kasvaa suodattimen käyttöikä vähentyneen likamäärän suodattamistarpeen johdosta.

Kulumisesta aiheutuvien likapartikkelien analysoinnin ja tutkimisen tekee haasteelliseksi niiden syntymisen pitkäaikainen kesto. Kulumisen on yleensä hyvin hidasta ja siitä aiheutuvia partikkeleita sekä varsinkin partikkeleita, jotka poikkeavat tavanomaisesta kulumisesta on vaikea tunnistaa. Oikeanlaisen arvion tekeminen kulumistuotteiden perusteella vaatii pitkän aikavälin mittauksia sekä asiantuntevaa mittaustulosten analysointia. Ihanteellisessa järjestelmän kunnonvalvonnan tilanteessa komponenttien tuleva elinikä voitaisiin ennustaa mittausten ja niiden tulosten analysoinnin avulla etukäteen.

Kulumisen syntyyn, sen nopeuteen ja voimakkuuteen vaikuttavat ratkaisevasti järjestelmässä esiintyvän lian määrä ja lian partikkelikokojakauma. Järjestelmän partikkelimäärä vaihtelee jatkuvasti ja yksittäisen mittauksen aikana lasketut

partikkelimäärät voivat vaihdella mittauksen kuluessa. Epätasainen partikkelimäärien vaihtelu ja erilaiset partikkeleiden materiaalit sekä muoto vaikeuttavat pelkän partikkelimäärien seurannan avulla tehtävän komponenttien vikaantumisen ennustamista. Kunnonvalvonnan avulla tehtävää elinikä tarkastelua voidaan kuitenkin parantaa lisäämällä partikkelimäärien mittaamisen rinnalle muita järjestelmän ominaisuuksien analysointimenetelmiä, kuten värähtelymittauksia sekä lämpötilan valvontaa.

Multipass-testilaitteistolla saatava suodattimen  $\beta_x$ -arvo kuvaa suodattimen toimintaa jatkuvan järjestelmän toiminnan sekä likaantumisen tilassa. Muuttamalla testijärjestelmän päätilavuusvirtaa ja pitämällä syöttötilavuusvirta vakiona tarkasteltiin mittauksissa erilaisten likakonsentraatioiden ja tilavuusvirran vaikutusta suodattimen beta-arvoihin. Singlepass-mittauksien ja muuttuvan likakonsentraation mittauksien tarkoituksena oli selvittää, kuinka järjestelmän puhtaustaso ja voiteluaineen likakonsentraatio muuttuvat erilaisista alkutilanteista, kerran suodattimen läpi kuljettuaan. Lisäksi mittauksissa käytettävää testipölyä vaihtamalla, mitattiin lian partikkelikokojakauman vaikutus suodattimen toimintaan ja jäädyttämällä singlepass-järjestelmää tarkasteltiin voiteluaineen viskositeetin vaikutusta suodattimen beta-arvoihin.

#### 4.1. Multipass-mittauslaitteisto

Erilaisten likamäärien ja lian partikkelikokojakauman sekä tilavuusvirran vaikutuksen mittaukset suoritettiin standardin ISO 16889 määrittelemällä multipass-testilaitteistolla. Testilaitteisto on esitetty kuvassa 4.1 ja sen yksinkertaistettu hydraulikaavio on nähtävissä kuvassa 3.1. Testijärjestelmä koostuu kahdesta erikokoisille tilavuusvirroille tarkoitettuun testipiiriin ja erillisestä syöttöpiiriin. Pääjärjestelmään syötettävä testipöly sekoitetaan syöttöpiirissä, jonka jälkeen se voidaan syöttää pääjärjestelmään vakio tilavuusvirralla. Syöttöpiirin maksimitilavuus on 50 litraa, joka muodostuu 42 litran syöttösäiliöstä ja 8 litran varasäiliöstä.

Standardin määrittelemässä multipass-testissä pääjärjestelmän gravimetrinen taso pyritään pitämään vakiona syöttämällä siihen vakio syöttöpiiriin likakonsentraatiosta tasaisella syöttötilavuusvirralla testipölyä. Syöttöpiirille määritetään testin aikainen gravimetrinen taso ja tämän jälkeen tarvittava testipöly määrä punnitaan syöttöpiiriin. Testi päätetään, kun suodattimen yli oleva paine-ero on noussut tarpeeksi suureksi testipölyn aiheuttaman suodattimen tukkeutumisen johdosta.

Testilaitteistolla mitataan järjestelmän partikkelimäärien kehitystä suodattimen ylä- ja alavirrasta automaattisten partikkelilaskureiden avulla. Päätilavuusvirtaa ja järjestelmän painetta säädetään pumpun tuottoa säätämällä sekä suodattimen paluuvirtausta kuristamalla. Järjestelmän pääpiirissä olevan voiteluaineen tilavuus pidetään vakiona erillisen varastosäiliöön menevän poistovirtauksen avulla. Syöttö- ja poistovirtausta säädetään kuristimien avulla.



**Kuva 4.1.** Multipass-mittauslaitteisto.

Hydraulinesteenä testijärjestelmässä käytettiin standardin mukaista Mill-H-5606 öljyä, jonka viskositeetti on 15 cSt (40 °C). Ylä- ja alavirran mittausensoreina oli HCB-LD-25/25 -sensorit ja partikkelilaskurina toimi Pamas 2120 -laskin. Mittauslaitteiston tarkkuus riittää aina 4  $\mu\text{m(c)}$  kokosiin partikkeleihin ja 120 000 kpl/ml partikkelimäärään asti. Mittauslaitteisto oli kalibroitu standardin ISO 11171 mukaan. Suodatinelementtien runkona käytettiin mallin FG1147 -runkoa, kaikissa multipass- mittauksissa.

Testipölyn syöttötilavuusvirta pidettiin vakiona 0,25 l/min arvossa, kaikissa mittauksissa. Partikkelimittauksen anturivirtaukset suodattimen ylä- ja alavirrasta olivat vakiot 0,25 ml/min ja anturivirtaukset palautettiin takaisin testisäiliöön. Testijärjestelmän tilavuus mittauksissa oli välillä 35 – 42 litraa. Mittausjärjestelmän erillisen varastosäiliöön menevän poistotilavuusvirran suuruus säädettiin syöttötilavuusvirran mukaan, jolloin testijärjestelmän tilavuus pysyi vakiona yksittäisessä mittauksessa. Järjestelmän lämpötila mittauksien aikana oli 35 – 45 °C ja mittausjärjestelmän paine välillä 3 – 5 bar. Järjestelmän paine pidettiin vakiona virtauksen muuttuessa, säätämällä suodattimen paluuvirtausta kuristimen avulla.

Multipass-testijärjestelmään syötetty testipöly lisättiin syöttötilavuusvirtana suoraan pääjärjestelmän testipiirin päätilavuusvirtaan. Koska vakiona pidettävä syöttövirtaus lisättiin suoraan suodattimen ylävirtaan, voitiin suodattimelle menevää päätilavuusvirtaa muuttamalla luoda suodattimen ylävirtaan erilaisia lian gravimetrisia tasoja. Erilaisilla päätilavuusvirroilla voidaan näin tarkastella suodattimen ylävirran likämäärän vaikutusta suodattimen beta-arvoihin. Lisäksi ISO -standardin mukaisella testillä, mutta erilaisia testipölyjä käyttämällä saatiin mitattua partikkelikokojakauman vaikutukset suodattimen beta-arvoihin

Mittausjärjestelmän puhtaus ennen testipölyn lisäämistä ja mittauksien aloittamista, varmistettiin erillisen puhdistuskierron ja alkupuhtausmittauksien avulla. Syöttötilavuusvirran ja syöttöpiirin gravimetrinen taso sekä testitilavuusvirran avulla voidaan laskea pääjärjestelmässä vallitseva gravimetrinen taso yhtälöllä (14).

$$G_t = \frac{G_s Q_s}{Q_t} \quad (14)$$

jossa

$G_t$	on pääjärjestelmän gravimetrinen taso [mg/l]
$G_s$	on syöttöpiirin gravimetrinen taso [mg/l]
$Q_s$	on syöttötilavuusvirta [l/min]
$Q_t$	on päätilavuusvirta [l/min]

Mittaukseen kuuluva aika voidaan laskea suodatinkohtaisen likakapasiteetin, pääjärjestelmän gravimetrinen tason ja testitilavuusvirran avulla kaavalla (15).

$$t = \frac{m_s}{G_t Q_t} \quad (15)$$

jossa

$t$	on testiaika [min]
$m_s$	on arvioitu suodattimen likakapasiteetti [g]
$Q_t$	on testitilavuusvirta [l/min]

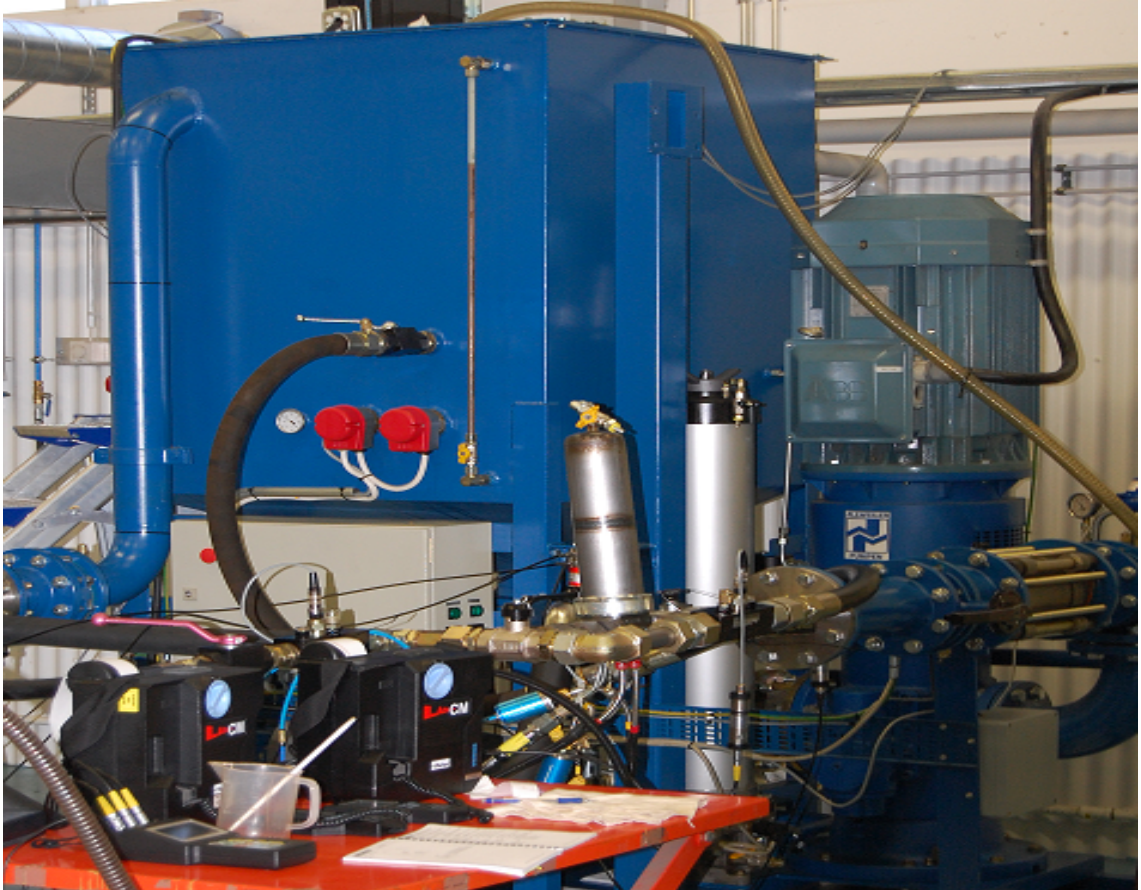
Standardin mukaisessa multipass-testissä pääjärjestelmän gravimetriselle tasolle, syöttötilavuusvirralle ja itse testitilavuusvirralle on määritetty suuruudet multipass-mittausta koskevassa standardissa. Työn mittauksien yhtenä tavoitteena oli selvittää järjestelmän likamäärän vaikutus suodattimen toimintaan, jolloin ylävirran gravimetristä tasoa muutettiin päätilavuusvirtaa säätämällä. Standardin mukaisessa testissä ylävirran gravimetrinen taso määritetään kiinteäksi ja syöttöpiiriin punnitaan testipölyä tämän gravimetrinen tason saavuttamiseksi. Standarditestin aikana myös syöttö- ja päätilavuusvirta pidetään vakioina. Vaihtuvan päätilavuusvirran mittauksissa syötetty testipölymäärä laskettiin tilavuusvirtojen keskiarvojen avulla.

## 4.2. Likamäärän vaikutuksen mittauslaitteisto ja singlepass-mittauslaitteisto

Suodattimen kyky poistaa likapartikkeleita erilaisista ylävirran lähtötason likamääristä kertalapäisyyllä mitattiin erillisen singlepass-testilaitteiston avulla. Samalla laitteistolla mitattiin lisäksi erilaisilla suodattimilla saavutettava puhtaustaso vaihtuvista lähtötilanteen likamääristä. Testipöly punnittiin ja tämän jälkeen se lisättiin järjestelmän

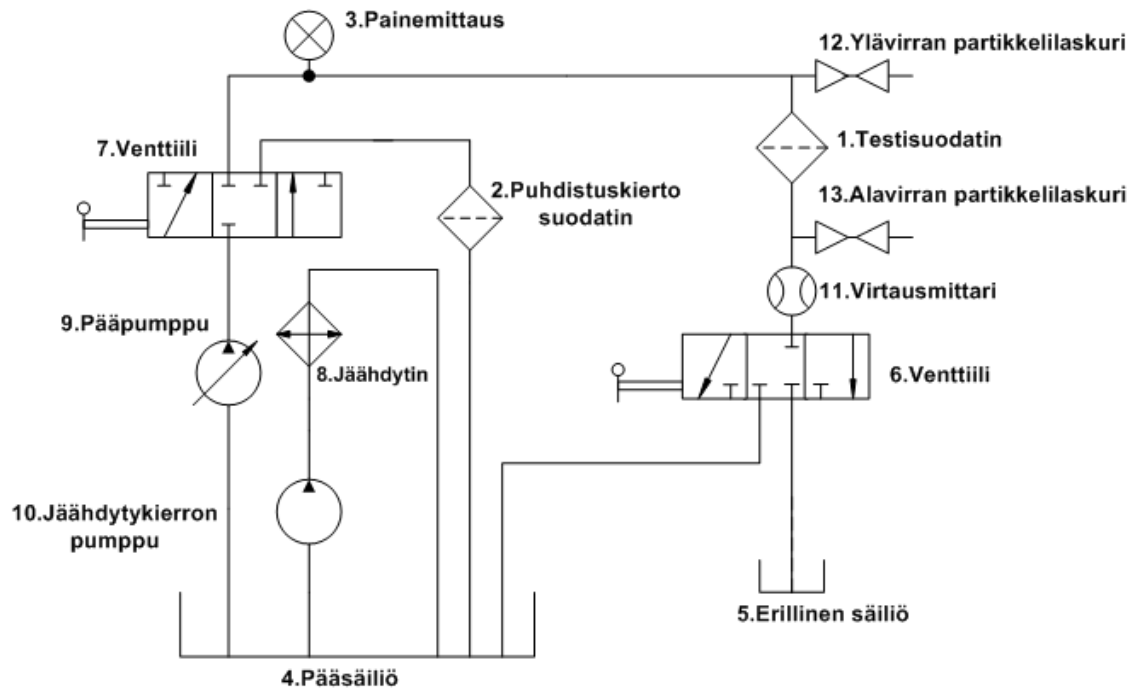


pääsäiliöön, halutun lähtötason gravimetrinen tason saavuttamiseksi. Testipölyn lisäämisen jälkeen järjestelmää kierrätettiin erillisen sekoituskierron kautta likatasapainon saavuttamiseksi. Järjestelmä puhdistettiin ennen testipölyn lisäämistä erillisen puhdistuskierron kautta ja alkupuhtaus varmistettiin partikkelilaskureiden avulla. Partikkelilaskureina järjestelmässä toimivat Parker Laser CM20 -laskurit, jotka oli liitetty suodatinrunгон ylä- ja alavirtoihin. Mittauslaitteisto on esitetty kuvassa 4.2.



*Kuva 4.2. Singlepass-mittauslaitteisto.*

Kuvan 4.2. järjestelmällä mitattiin myös normaalitoiminta alueella (100 – 350 cSt) tapahtuvan voiteluaineen viskositeetin muutoksen vaikutukset suodattimen beta-arvoihin, kahdella eri suodatusasteella. Voiteluaineen viskositeettia muutettiin jäädyttämällä sitä erillisessä jäädytyskierrossa. Voiteluaineena mittauksissa käytettiin Shell Argina T30 -öljyä, jonka kinemaattinen viskositeetti on 110 cSt (40 °C). Mittauksissa tarkastellut öljyn viskositeetit olivat 100, 150, 220 ja 350 cSt. Järjestelmän pääsäiliön tilavuus oli 1000 litraa, josta singlepass- testeissä kierrätettiin suodattimen kautta erilliseen 1000 litran säiliöön noin 700 – 800 litraa. Järjestelmän pääsäiliöön jätettiin jokaisessa singlepass- mittauksessa vähintään 200 litran voiteluainemäärä, jotta voiteluainepinta ei laskisi kartiopohjaisessa säiliössä pumppujen imulinjojen alapuolelle.



**Kuva 4.3.** Singlepass-testilaitteiston yksinkertaistettu hydraulikaavio.

Kuvassa 4.3 on esitetty singlepass- testijärjestelmän yksinkertaistettu hydraulikaavio sekä pääkomponentit. Tarkempi komponenttiluettelo on esitetty liitteessä 9. Varsinainen testisuodatin sekä puhdistuskierron suodatin voitiin kytkeä pois käytöstä testipölyn sekoittamisen ajaksi. Sekoituskierto toteutettiin järjestelmän pääpumpun avulla. Järjestelmän paine mitattiin suodattimen ylä- ja alavirroista sekä tilavuusvirta suodattimen alavirrasta

### 4.3. Muuttuvan likakonsentraation mittaukset

Muuttuvan likamäärän mittauksilla kartoitettiin likamäärän vaikutusta suodattimen beta-arvoihin. Mitatut tilavuusvirtatasot, joiden avulla erilaiset likamäärät saatiin aikaiseksi testijärjestelmään, olivat suodattimelle mitoitettujen normaalitoimintarajojen sisällä ja hyvin alhaiset sekä korkeat tilavuusvirrat jätettiin mittauksien ulkopuolelle. Suodatinelementtiluokat A, B, C ja D ovat esitettynä taulukossa 4.1.

Muuttuvan virtauksen multipass- testituloksia vertaamalla vakiovirtauksen mittauksiin, voidaan myös tilavuusvirran vaikutusta suodatinelementtien toimintaan arvioida. Mainittaessa viiden tai kymmenen mikrometrin suodattimesta tarkoitetaan tällä partikkelikokoja, jotka suodatin pystyy suodattamaan tehokkuudella 99,5 % standardin mukaisessa multipass- testissä mitattuna. Tehokkuus vastaa yhtälön (7) avulla laskettuna partikkelikoolle beta-arvoa 200.

Suodatinelementtien mitoituksessa käytettävä materiaalikohtainen virtausmitoituserroin ilmoitetaan yksikössä  $[(\frac{l}{min})/m^2]$ . Virtauskerroimen arvoon vaikuttavat suodattimelle suurin sallittava paine-eron suuruus, materiaalmäärä ja monet muut materiaaliominaisuuksista riippuvat tekijät. Kertoimen avulla suodattimelle



voidaan laskea sen ominaistilavuusvirran arvo, kun elementin materiaali-pinta-ala tiedetään. Beta-arvojen kannalta optimaalisimpaan tilavuusvirta-alueeseen vaikuttavat suodattimen materiaaliominaisuudet ja suodattimen sisäinen rakenne. Elementtikohtaisia nimellisvirtauksen arvoja käytettiin suuntaa-antavina tasoina mittaustilavuusvirtoja laskettaessa. Mittauksissa käytettyjen elementtien ominaistilavuusvirrat on laskettu taulukkoon 4.1, kaavalla (16).

$$Q = Aq_k \quad (16)$$

jossa,

$A$  on suodatinmateriaalin pinta-ala [ $m^2$ ]

$q_k$  on materiaalille määritetty virtausmitoituskertoimen [ $\frac{l/min}{m^2}$ ]

**Taulukko 4.1** Suodatinelementtien virtausominaisuudet.

	<i>Elementtiluokka A (7005)</i>	<i>Elementtiluokka B (7006)</i>	<i>Elementtiluokka C (7007)</i>	<i>Elementtiluokka D (Wind)</i>
<b>Multipass- standardin määrittämä tilavuusvirta</b>	55,44 l/min	104,40 l/min	168,84 l/min	766,80 l/min
<b>Yhden elementin virtauksen ja materiaalitiedoista määritetyn virtausmitoitus- kertoimen avulla laskettu tilavuusvirta</b>	10,98 l/min	20,42 l/min	33,03 l/min	150,00 l/min

Voitelujärjestelmissä tilavuusvirrat ovat varsin suuria. Esimerkiksi tuulivoimaloissa käytettävän voitelujärjestelmän keskimääräinen tilavuusvirta on noin 300 l/min. Suodattimet kytketään tuulivoimalakäytöissä yleensä painesuodattimiksi ja ne ovat suuren tilavuusvirran vuoksi yleensä rakenteeltaan niin sanottuja duplex-suodattimia. Duplex rakenteessa suodatinelementit on asennettu järjestelmään rinnan. Kahden rinnankytketyn ja saman suodatusasteen omaavan elementin läpi virtaa normaalitilanteessa yhteensä 300 l/min tilavuusvirta, jolloin yhden suodattimen läpi virtaa 150 l/min tilavuusvirta. Tilavuusvirralle 150 l/min on laskettu taulukkoon 4.1 erikokoisten elementtien sisältämän materiaalmäärän ja tästä saatavan virtauskertoimen avulla, Wind-elementin mukaan suhteutetut tilavuusvirrat. Laskettuja tilavuusvirtoja käytetään suodatussuhteen multipass- mittauksissa.

Vaihtuvan virtauksen mittauksissa multipass-testilaitteiston syöttösäiliöstä pääkiertoon syötettävän tilavuusvirran säätäminen luotettavasti oli haastavaa ja näin ollen mittauksissa liansyötön tilavuusvirta pidettiin vakiona. Likakonsentraation muutos

tehtiin varsinaisen järjestelmän pumpun tuottoa säätämällä. Koska syöttösäiliöstä tuleva tilavuusvirta pidettiin vakiona ja testitilavuusvirtaa säädettiin, muuttui päätilavuusvirran gravimetrinen taso tilavuusvirran muutoksen seurauksena. Näin samalla testiajolla voitiin tarkastella tilavuusvirran ja partikkelikonsentraation vaikutukset suodattimen beta-arvoihin ja tätä kautta järjestelmän puhtauteen.

Multipass-testi on aina nopeutettu suodattimen elinkaaren mittaus ja likaantumisen aiheuttavien beta-arvojen nousu vaikuttaa testillä saataviin beta-arvoihin merkittävästi. Mitatuilla suodatinmateriaaleilla paine-eron noustessa alkavat beta-arvot kasvaa nopeasti suodattimen tukkeutuessa. Mittauksissa syötön likamäärä pyrittiin mitoittamaan niin, että halutut tilavuusvirran muutokset voitiin tehdä ennen kuin suodattimen yli oleva paine-ero nousee liian suureksi ja beta-arvot alkaisivat parantua tämän myötä. Todellisessa käyttötilanteessa beta-arvojen parantuminen likaantumisen myötä on varsin lyhytkestoinen tapahtuma, verrattuna suodattimen koko elinikään ja tästä johtuen vaihtuvan virtauksen mittauksessa elementin eliniän loppupäässä tapahtuva beta-arvojen nopea nousu on jätetty tarkastelun ulkopuolelle.

Mittauksissa käytetyn hydraulinesteen Mill-H-5606 lämpötila, sähkönjohtavuus, vesimäärä, alkupuhtaus ja muut standardissa määritetyt ominaisuudet pidettiin ISO:n multipass-testiä koskevan standardin mukaisissa rajoissa kaikissa suoritetuissa mittauksissa. Syötetyn testipölyn partikkelikonsentraatiossa ja -kokojakaumassa huomioitiin antureiden mittaustarkkuus ja laitteiston kalibrointi tarkastettiin ennen varsinaisten mittausten aloittamista. Vaihtuvan virtauksen minimi-tilavuusvirta  $Q_{\min}$  määritettiin niin, että mittauksissa esiintyvät virtauslajit pysyvät turbulenttisina. Minimivirtausnopeus voidaan laskea Reynoldsin luvun avulla yhtälöstä (17).

$$Re = \frac{v * d}{\nu_{40}} \quad (17)$$

jossa,

$v$  on hydraulinesteen nopeus [m/s]

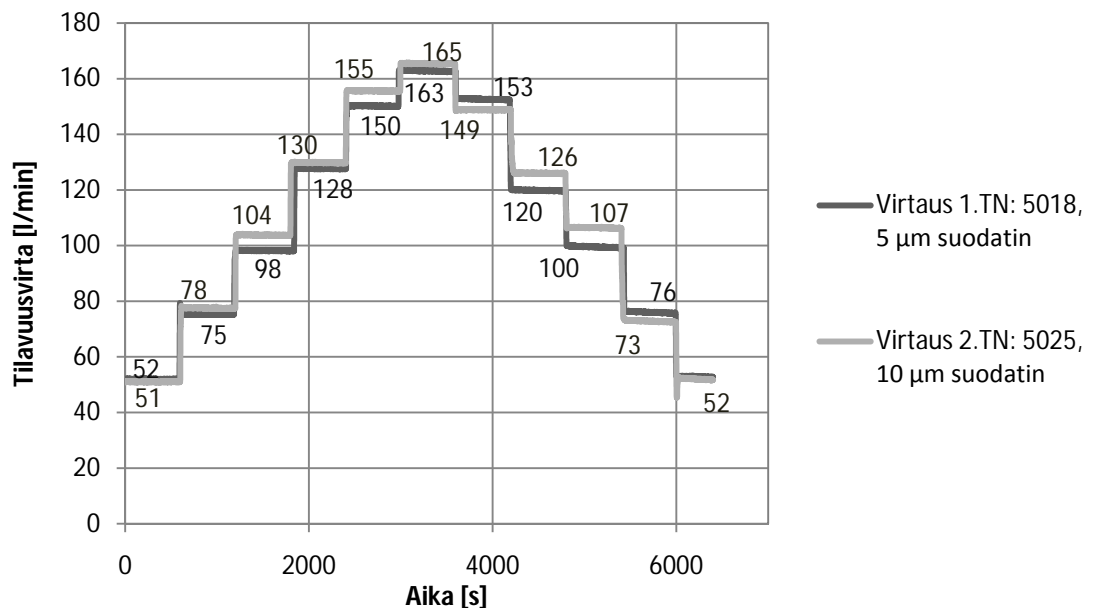
$d$  on putken sisähalkaisija [m]

$\nu_{40^{\circ}\text{C}}$  on hydraulinesteen viskositeetti  $40^{\circ}\text{C}$ :ssa [ $\text{m}^2/\text{s}$ ]

Yhtälöllä (17) lasketaan mittauksissa käytettävä minimivirtausnopeus kun tiedetään, että testipiirissä käytettävän putken halkaisija on  $d = 0,03$  m, Reynoldsin luku turbulenttiselle virtaukselle on  $Re > 2500$  ja käytettävän hydraulioöljyn Mill-H-5606 viskositeetti  $40^{\circ}\text{C}$  asteessa on  $\nu_{40^{\circ}\text{C}} = 0,000015$   $\text{m}^2/\text{s}$ . Näin miniminopeudeksi saadaan  $v = 1,16667$  m/s. Tästä voidaan laskea edelleen minivirtausnopeus  $Q_{\min} = A v$ , jossa  $A$  on putken sisäpinta-ala. Sisäpinta-ala putkelle on  $A = \pi\left(\frac{d}{2}\right)^2$ , josta saadaan  $A = 0,000706858335$   $\text{m}^2$  ja tilavuusvirraksi  $Q_{\min} = 0,0008246704$   $\text{m}^3/\text{s}$ , joka voidaan muuntaa yksikköön [l/min] kertomalla tulos 60 000:lla. Minimitilavuusvirraksi saadaan näin  $Q_{\min} = 49,48$  l/min.

Mittauksissa tilavuusvirtaa säädeltiin kuvan 4.4 mukaisesti. Lähtötason tilavuusvirraksi valittiin 50 l/min edellä esitetyn laskelman perusteella. Tämän jälkeen tilavuusvirta pyrittiin säätämään tasoihin 75 l/min, 100 l/min, 125 l/min, 150 l/min, 160 l/min, 150 l/min, 125 l/min, 100 l/min, 75 l/min ja takaisin alkutilanteeseen 50 l/min. Lian syötön käynnistyttyä ja testimittauksen alkaessa järjestelmän likatasapainon annettiin tasaantua ja mittausantureiden huuhtoutua viisi minuuttia. Beta-arvojen tarkastelussa jokaisen tilavuusvirran muutoksen jälkeen järjestelmän likatasapainon ja virtauksien annettiin tasaantua kahden minuutin ajan. Tilavuusvirtaa muutettiin pumpun tuottoa säätelemällä ja järjestelmän paluuvirtausta kuristamalla. Paine pyrittiin pitämään suodattimen jälkeen vakiona alle neljässä barissa. Suodattimen beta-arvot laskettiin koko mittauksen ajalta. Lisäksi suodattimen normaalitoiminnan beta-arvot laskettiin jokaisen tilavuusvirtatason keskeltä kuuden minuutin ajanjaksolta ja aina suodattimen paine-eroon 0,8 bar asti.

Päätilavuusvirran, paineen ja poistotilavuusvirran säätäminen pyrittiin tekemään virtaustasojen välissä yhden minuutin kuluessa säätötoimenpiteiden aloittamisesta, jonka jälkeen järjestelmän annettiin tasaantua minuutin ajan. Kuvassa 4.4 on esitetty mittauksissa käytetyt tilavuusvirtatasot pyöristettynä kokonaisluvun tarkkuuteen, kahdelle eri suodatusasteelle. Tilavuusvirran kuvaajat on piirretty multipass-testijärjestelmästä saadusta tilavuusvirran mittausdatasta.



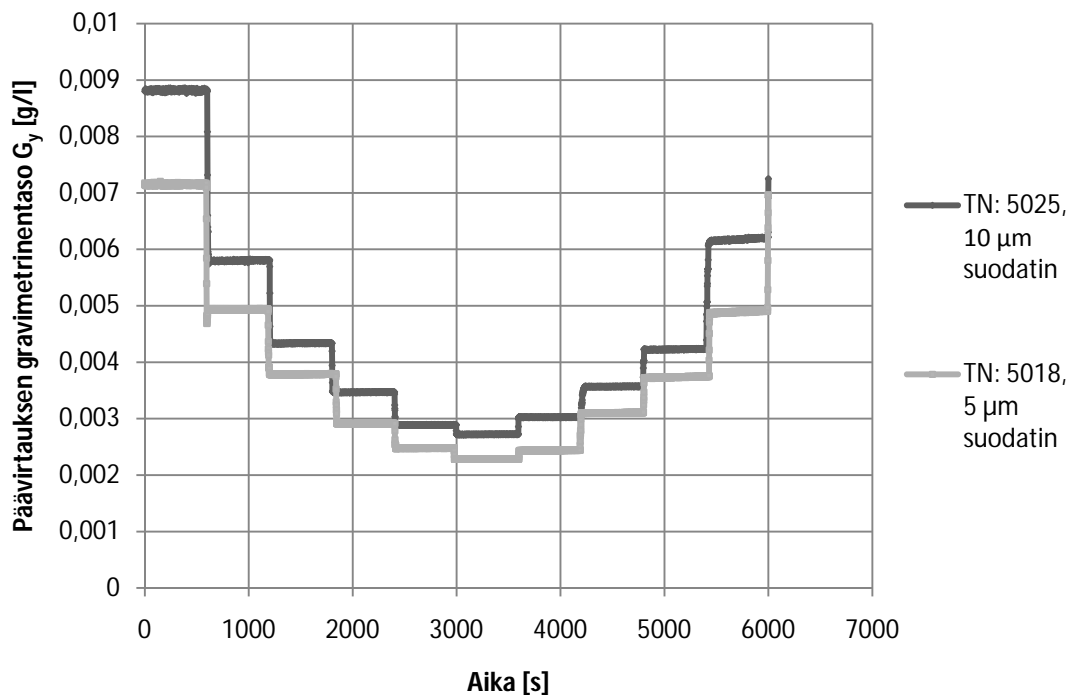
**Kuva 4.4.** Vaihtuvan tilavuusvirran aika-tilavuusvirta kuvaajat.

Viiden mikrometrin suodattimen virtausnopeuden arvoiksi tilavuusvirtaa lisättäessä vakiintuivat 52, 75, 98, 128, 150 ja 163 l/min tasot. Kymmenen mikronin suodattimen mittauksessa tilavuusvirtatasot tilavuusvirtaa lisättäessä olivat 51, 78, 104, 130, 155, 165 l/min. Tilavuusvirran laskemisen jälkeen viiden mikrometrin suodattimelle tehdyn mittauksen tilavuusvirtatasot olivat 153, 120, 100, 7 ja 52 l/min ja kymmenen mikrometrin suodattimen mittauksen tasot 149, 126, 107, 73 ja 52 l/min. Keskiarvo

tilavuusvirraksi viiden mikrometrin suodattimen mittauksessa saatiin 106 l/min ja kymmenen mikrometrin suodattimen mittaukselle vastaava keskiarvo oli 108 l/min.

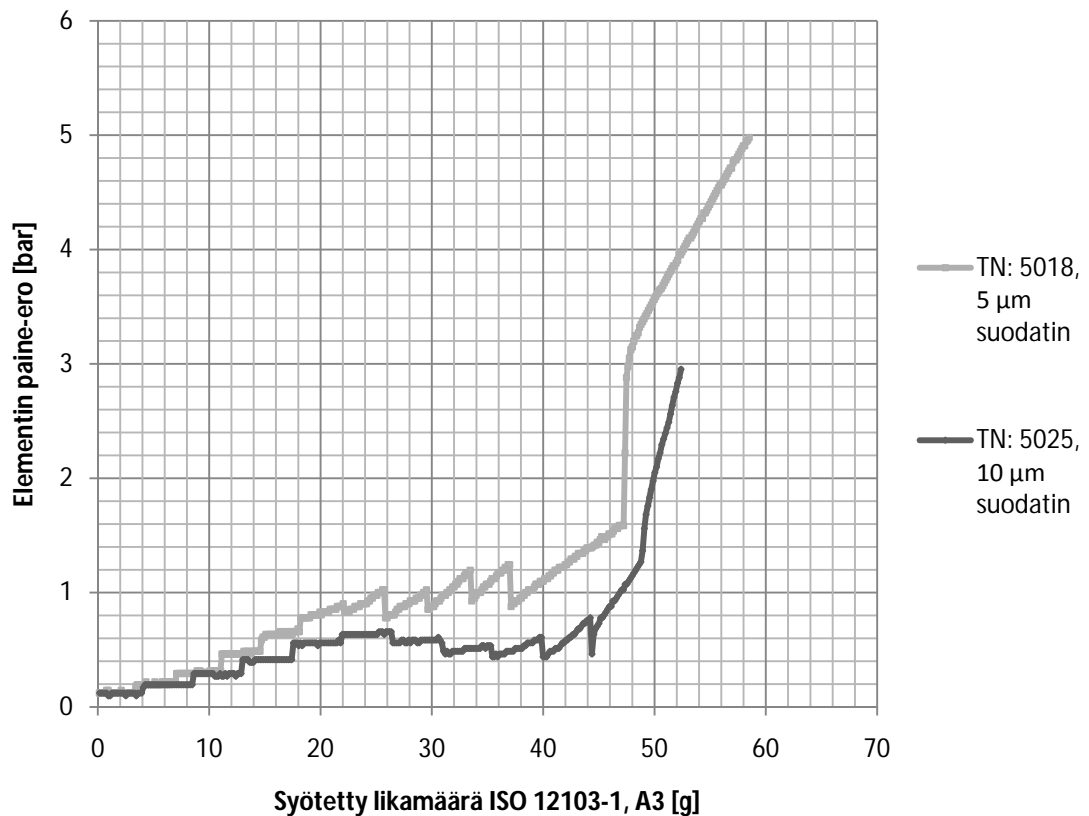
Mittauksissa vallitsevat ylävirran gravimetriset tasot voidaan laskea yhtälön (14) avulla, kun syöttötilavuusvirta, syöttöpiirin gravimetrisen taso ja päätilavuusvirta tiedetään. Vaihtuvan virtauksen mittauksien ylävirran gravimetriset tasot ovat nähtävissä kuvassa 4.5. Vaihteluväli ylävirran gravimetriselle tasolle oli kymmenen mikrometrin suodattimen mittauksessa  $G_y(10\mu\text{m}) = 2,8 - 8,9 \text{ mg/l}$  ja viiden mikrometrin mittauksessa vaihteluväli oli  $G_y(5\mu\text{m}) = 2,2 - 7,1 \text{ mg/l}$ . Kuvasta 4.5 nähdään, kuinka järjestelmän gravimetrisen taso pienenee päätilavuusvirran kasvaessa. Jos testijärjestelmän gravimetrisen taso olisi haluttu pitää vakiona, olisi syöttövirtausta lisättävä päätilavuusvirran suhteessa.

Pääpiirin erilaiset gravimetriset tasot muodostettiin punnitsemalla syöttöpiirin 50 litran öljytilavuuteen 75 grammaa ISO 12103-1 A3 MTD -testipölyä viiden mikrometrin suodattimen mittauksessa ja 90 grammaa kymmenen mikrometrin suodattimen mittauksessa sekä pitämällä syöttövirtaus vakiona arvossa  $Q_s = 0,25 \text{ l/min}$  koko mittauksien ajan. Pääjärjestelmän tilavuus pyrittiin pitämään vakiona 40 litrassa, säätämällä poistotilavuusvirta syöttötilavuusvirran kanssa yhtä suureksi. Testijärjestelmään syötettiin testipölyä syöttönopeudella  $g_{10} = 0,45 \text{ g/min}$  kymmenen mikrometrin suodattimen mittauksessa ja  $g_5 = 0,375 \text{ g/min}$  viiden mikrometrin suodattimen mittauksessa. Gravimetrista tasoa laskettaessa jätettiin huomioimatta tilavuusvirran säädön aikana tapahtuva gravimetrisen tason hetkellinen muutos ja alussa tapahtuva järjestelmän gravimetrisen tason tasaantuminen.



**Kuva 4.5.** Päävirtauksen gravimetriset tasot tilavuusvirran muuttuessa kuvan 4.4 mukaan.

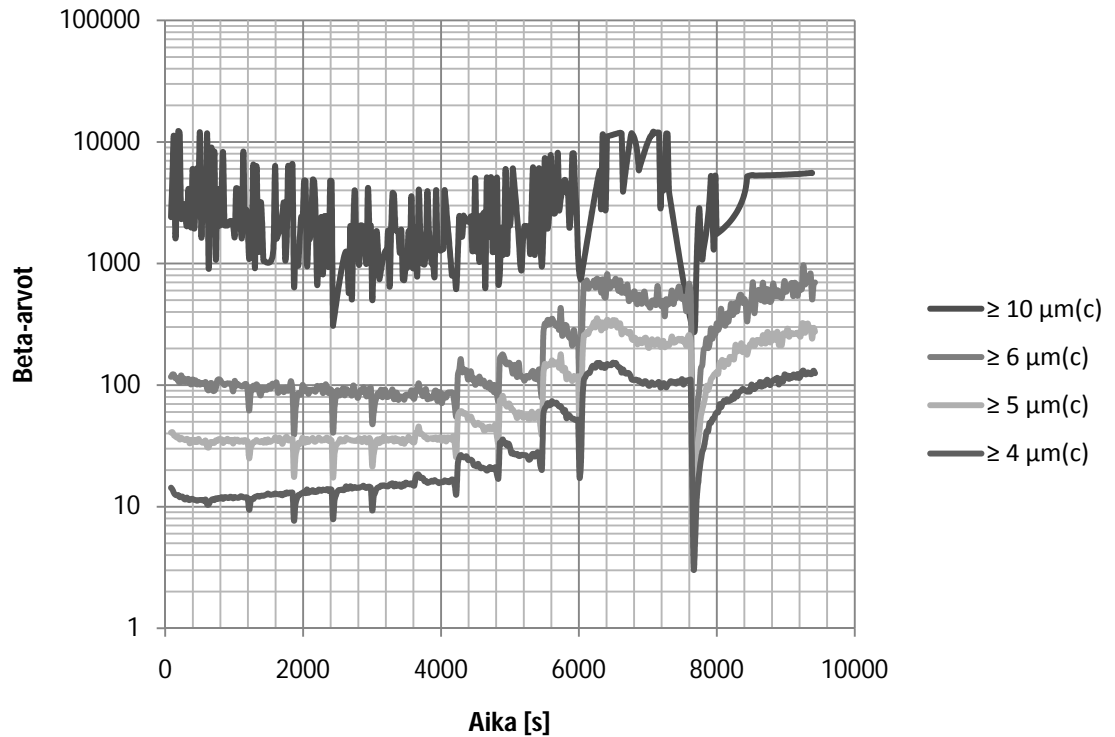
Kuvassa 4.6 on nähtävissä mitattujen elementtien paine-erokuvaajat järjestelmään syötetyn likamäärän suhteessa. Kuvaajasta nähdään, että viiden mikrometrin suodatinelementin paine-ero lähtee kasvamaan, kun testipölyä on syötetty järjestelmään n. 25 grammaa. Vastaavasti kymmenen mikrometrin suodattimella nopea paine-eron nousu alkoi, kun järjestelmään oli syötetty n. 32 grammaa testipölyä. Vastaavat paine-eron nousemisen ajankohdat voidaan havaita tarkemmin mittausjärjestelmästä saatavasta paine-eron mittausdatasta.



**Kuva 4.6.** Likamäärän aiheuttama paine-eron nousu.

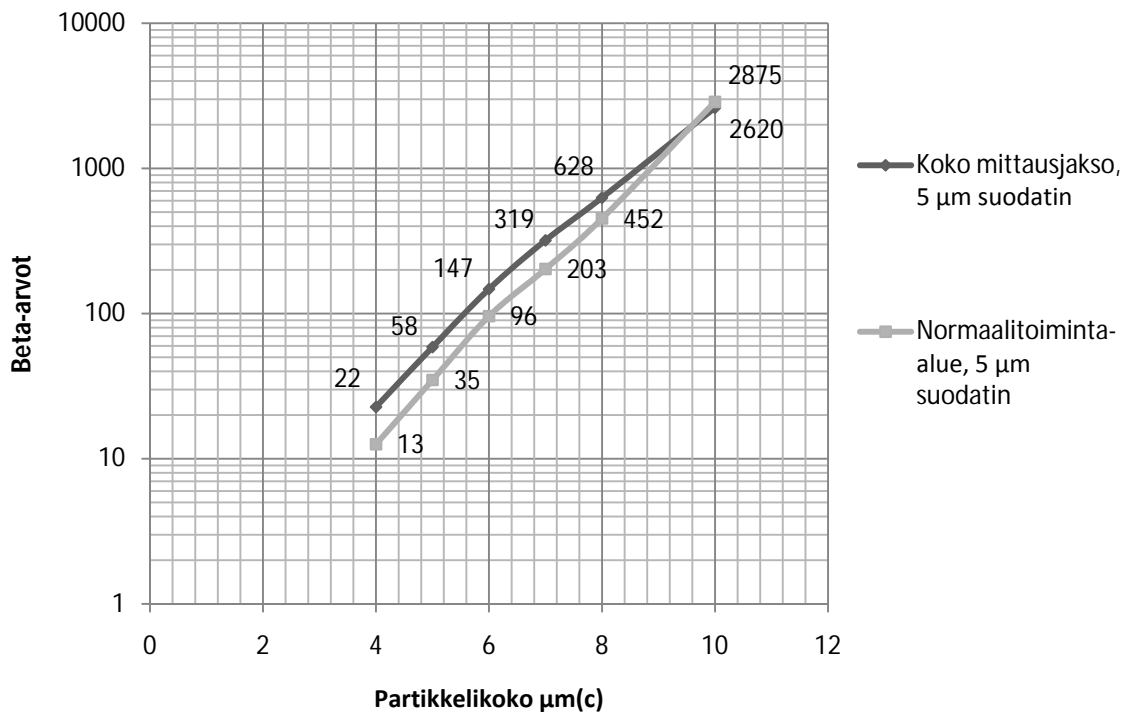
Syöttöpiirin gravimetristen tasojen sekä syöttötilavuusvirran avulla voidaan laskea 25 ja 32 gramman testipölymäärän syöttämiseen kuluva aika. Tämä oli kymmenen mikrometrin suodattimen mittauksessa n. 71 minuuttia ja viiden mikronin suodattimen mittauksessa n. 66 minuuttia pyöristettynä minuutin tarkkuuteen. Beta-arvojen tarkasteluväliksi muodostettiin saatujen laskelmien perusteella 5 – 60 minuuttia TN: 5025 ja 5 – 50 minuuttia TN: 5018 suodattimien normaalitoiminnan beta-arvojen määrittämiseksi. Mittauksissa tehdyn nousevan ja laskevan tilavuusvirtarampin ajaminen kesti yli 100 minuuttia. Paine-eron nopean nousemisen vuoksi säädetyistä tilavuusvirtatasoista jätettiin huomioimatta kaikki laskennallisesti määritettyjen aikavälien ulkopuolelle jääneet mittauks tulokset.

Koko mittausjakson beta-arvot viiden mikrometrin suodattimelle on esitetty kuvassa 4.7. Beta-arvojen kehityksestä on nähtävissä likamäärän kasvun aiheuttaman beta-arvojen parantuminen mittausajan kuluessa. Tilavuusvirran muutos näkyy kuvaajissa pieninä beta-arvojen laskuina ja nousuina muutosajankohdissa. Koordinaatistoissa beta-arvojen akseli on logaritminen. Likaantumisen johdosta tapahtuva suodattimen yli olevan paine-eron kasvu alkoi kiihtyä ja beta-arvot nousta nopeasti viiden mikrometrin suodattimen mittauksissa n. 3600 sekunnin kulutta mittauksen aloittamisesta.



**Kuva 4.7.** Koko mittausjakson beta-arvot 5  $\mu\text{m}$  suodattimelle.

Mittausjakson beta-arvojen kehityksestä nähdään, kuinka suodattimen normaalitoiminta-alueen suodatussuhde voi olla hyvin alhainen, verrattuna suodattimelle koko multipass- testin ajalta laskettuihin arvoihin. Pienien, yli neljän mikrometrin partikkeleiden suodatussuhde kasvaa koko mittausajanjakson. Viiden mikrometrin partikkeleiden suhte pysyy alun tasoittumisen jälkeen tasaisena aina 3600 sekuntiin asti, jonka jälkeen se kasvaa merkittävästi ja päättyy mittauksen lopussa noin kymmenkertaiseksi alun tilanteesta. Näin tapahtuu myös yli kuuden mikrometrin partikkeleiden suodatussuhteelle. Kymmenen mikrometrin ja tätä suurempien partikkeleiden beta-arvojen vaihtelu on suuri. Tämä johtuu partikkeleiden muuttuvasta ja yleensä vähäisestä määrästä suodattimen alavirrassa. Suurien partikkeleiden suodatussuhde laskee n. 3600 sekuntiin asti, jonka jälkeen se alkaa nousta ja päättyy lopuksi lähelle mittauksen alussa olevaa lukemaa.

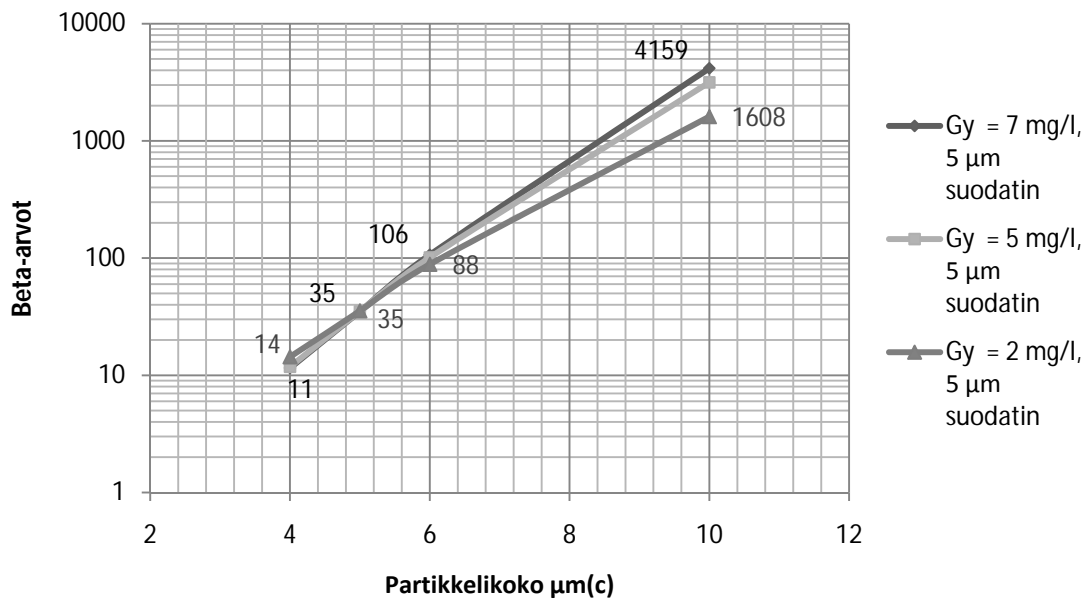


**Kuva 4.8.** Beta-arvojen vertailu 5  $\mu\text{m}$  suodattimelle .

Kuvassa 4.8. on esitetty koko mittausjakson ja lasketun normaalitoiminta-alueen beta-arvojen kuvaajat. Kuvaajiin on merkitty pistein erikokoisille partikkeleille laskettujen beta-arvojen keskiarvot. Suodattimen normaalitoiminta-alueelta lasketut beta-arvot olivat koko mittausjakson ajalta laskettuja beta-arvoja alhaisemmat aina kymmenen mikrometrin (c) ja tätä suurempiin partikkeleihin asti. Kymmenen mikrometrin partikkeleilla koko mittausjakson beta-arvo oli alhaisempi kuin normaalitoiminnan arvo. Tämä johtui mittauksen aikana ja varsinkin lopussa tapahtuneista nopeista isojen ( $>10\mu\text{m}$ ) partikkeleiden lukumäärien alenemisista suodattimen ylävirrassa. Partikkelilukumäärän nopean pienenemisen vaikutus suodattimelle laskettuihin beta-arvoihin voidaan nähdä kuvasta 4.7. Syitä isojen partikkeleiden lukumäärän nopeaan alenemiseen voi olla useita esim. likapartikkeleiden pilkkoutuminen pienemmiksi ja syöttövirran likakonsentraation hetkellinen muutos päätilavuusvirtaa muutettaessa.

Yhtälön (14) avulla laskettujen erilaisten ylävirran gravimetristen tasojen beta-arvokuvaajat on esitetty kuvassa 4.9. Raja-arvot päätilavuusvirralle ja tätä kautta järjestelmän gravimetrisille tasoille muodostivat turbulenttisen virtauksen rajavirtausnopeus ja pääjärjestelmän pumpun tuotto sekä suuren virtauksen aiheuttama suodattimen paine-eron nouseminen. Kuvaan 4.9 on merkitty mitattujen beta-arvojen ( $\beta_4$ ,  $\beta_5$ ,  $\beta_6$  ja  $\beta_{10}$ ) keskiarvot 2, 5, 7 mg/l ylävirran gravimetrisillä tasoilla viiden mikrometrin suodattimelle. Pienillä ylävirran partikkelimäärillä (2 mg/l) mittauksissa saatiin viiden mikrometrin suodattimelle  $\beta_4$  -arvoksi n. 14 pyöristettynä kokonaisluku tarkkuuteen ja suuremmilla partikkelimäärillä arvo pieneni tasaisesti aina lukemaan 11 asti. Erilaisilla gravimetrisillä tasoilla mitatut  $\beta_4$  -arvot jäivät kaikki hieman standardin

mukaisella multipass-testillä saatavan tuloksen 16 alapuolelle. Vastaavasti viiden mikrometrin partikkeleilla beta-arvo on hyvin lähellä standardin mukaisella testillä saatua arvoa 37. Standardin mukaiset multipass-testitulokset esitetään luvussa 4.4. Likamäärän ei havaittu myöskään vaikuttavat merkittävästi viiden mikronin suodattimen  $\beta_5$  -arvoihin. Suuremmilla kuin viiden mikrometrin partikkeleilla beta-arvojen erot eri gravimetrisilla tasoilla mitattuna alkavat kasvaa. Beta-arvot, jotka ovat  $\geq 1000$  tarkoittavat näillä partikkeleilla  $\geq 99,9$  % suodatustehokkuutta.



**Kuva 4.9.** Beta-arvot erilaisilla lian syötöillä 5  $\mu\text{m}$  suodattimelle.

Mitatulle suodattimelle beta-arvo 200 saavutettiin partikkelikoolla, joka asettui välille  $x = 6 - 7 \mu\text{m(c)}$ . Yli 1000 beta-arvo saavutettiin kaikissa mittaolosuhteissa  $\geq 10 \mu\text{m(c)}$  partikkeleilla. Mitatun viiden mikrometrin suodattimen isojen  $x \geq 7 \mu\text{m(c)}$  partikkeleiden beta-arvot nousivat eniten partikkelimäärän kasvaessa. Tätä kokoa pienemmillä partikkeleilla erot beta-arvojen kesken olivat vähäisemmät.

Mittausjärjestelmä laskee partikkelien kappalemäärät 20 sekunnin ajanjaksoilta yhteen ja antureille tuleva mittaustilavuusvirta on 0,25 l/min. Ylä- ja alavirrassa mittausajankohtana olevat partikkelimäärät millilitraa kohden voidaan laskea yhtälön (18) avulla.

$$N_x = \frac{N_m}{t_m Q_a} \quad (18)$$

jossa,

$N_x$  on partikkelimäärä [kpl/ml]

$N_m$  on järjestelmän laskema partikkelimäärä annetulla mittausjaksolla [kpl/s.]

$t_m$  on mittausajanjakso [s];  $t_m = 20\text{s}$

$Q_a$  on mittausanturivirta [ml/s]



Lasketut partikkelimäärät voidaan muuntaa taulukon 3.1 avulla ISO 4406 puhtausluokiksi. Erilaisten gravimetristen tasojen mittausajankohdan partikkelimäärien keskiarvot ja puhtausluokat on esitetty taulukossa 4.2.

**Taulukko 4.2.** Vaihtuvan virtauksen mittauksen ylä- ja alavirran puhtausluokat 5 µm suodattimelle.

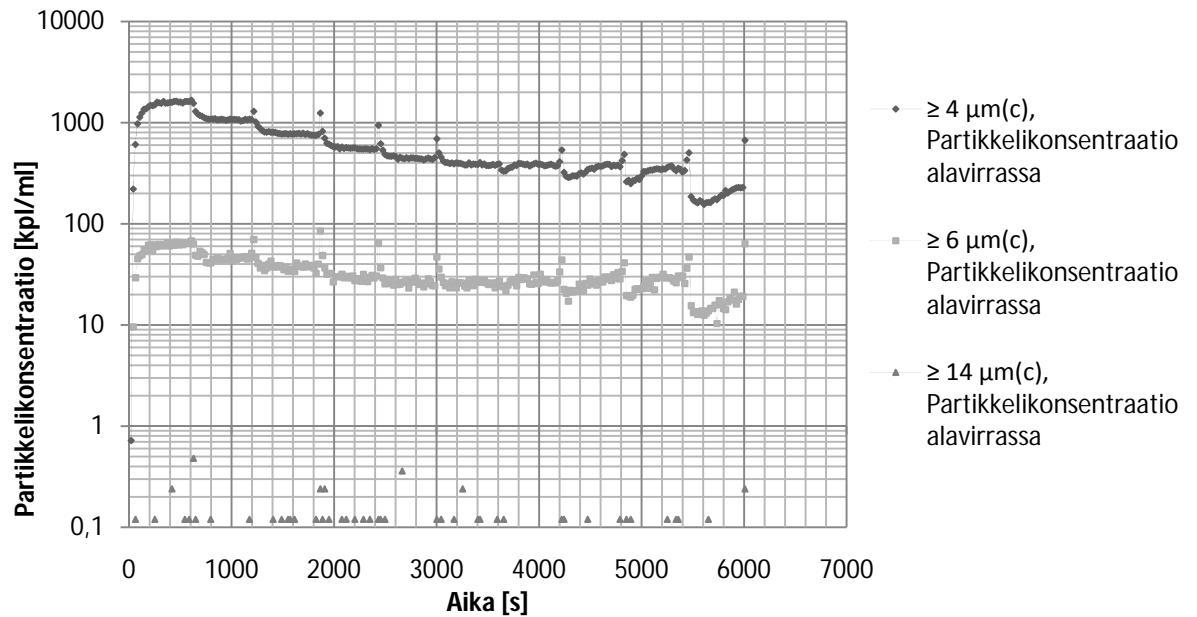
Tilavuusvirta 75 l/min ja $G_y \approx 7$ mg/l						
Ylävirta	Partikkelikoko	[kpl/ml]	ISO 4406 luokat	Alavirta	[kpl/ml]	ISO 4406 luokat
	> 4 µm(c)	12879	21		1092	17
	> 6 µm(c)	4612	19		46	13
	> 14 µm(c)	340	16		0,006	0
Tilavuusvirta 98 l/min ja $G_y \approx 5$ mg/l						
Ylävirta	Partikkelikoko	[kpl/ml]	ISO 4406 luokat	Alavirta	[kpl/ml]	ISO 4406 luokat
	> 4 µm(c)	9969	20		811	17
	> 6 µm(c)	3565	19		37	12
	> 14 µm(c)	261	15		0,03	2
Tilavuusvirta 128 l/min ja $G_y \approx 4$ mg/l						
Ylävirta	Partikkelikoko	[kpl/ml]	ISO 4406 luokat	Alavirta	[kpl/ml]	ISO 4406 luokat
	> 4 µm(c)	7464	20		575	16
	> 6 µm(c)	2667	19		262	12
	> 14 µm(c)	193	15		0,04	2
Tilavuusvirta 150 l/min ja $G_y \approx 3$ mg/l						
Ylävirta	Partikkelikoko	[kpl/ml]	ISO 4406 luokat	Alavirta	[kpl/ml]	ISO 4406 luokat
	> 4 µm(c)	6390	20		445	16
	> 6 µm(c)	2299	18		26	12
	> 14 µm(c)	165	15		0,017	1
Tilavuusvirta 163 l/min ja $G_y \approx 2$ mg/l						
Ylävirta	Partikkelikoko	[kpl/ml]	ISO 4406 luokat	Alavirta	[kpl/ml]	ISO 4406 luokat
	> 4 µm(c)	5875	20		390	16
	> 6 µm(c)	2123	18		25	12
	> 14 µm(c)	151	14		0,03	2

Suodattimen ylä- ja alavirran puhtausluokkien vertailulla voidaan määrittää mitatun suodattimen kyky ylläpitää järjestelmän puhtautta erilaisilla tulovirran likämäärillä. Taulukosta 3.1 nähdään, että suuremmilla puhtausluokilla  $\geq 21$ , luokkien raja-arvot ovat varsin kaukana toisistaan. Tästä johtuen gravimetrisen tason muutos välillä 7 – 2 mg/l ei näkynyt  $x \geq 4$  µm(c) partikkeleiden puhtausluokassa, kuin yhden luokan muutoksena suodattimen ylävirrassa. Partikkelikonsentraatio ylävirrassa muuttui  $N = 12879$  kpl/ml arvosta alle puoleen  $N = 5875$  kpl/ml arvoon. Samoin alavirran puhtausluokka muuttui vain arvosta 17 arvoon 16, partikkelimäärän pudotessa  $N = 1092$  kpl/ml määrään  $N = 390$  kpl/ml.

Mitatuilla suodattimen beta-arvoilla nimellisesti viiden mikrometrin suodatin saavuttaa ylävirran puhtaustason ollessa 21/19/16 alavirran puhtauden 17/13/0 multipass-mittausjärjestelmässä mitattuna. Keskiarvoisina suodatustehokkuuksina ilmoitettuna, suodatin poistaa  $x \geq 4$  µm(c) partikkeleista  $\approx 92$  %,  $x \geq 6$  µm(c)

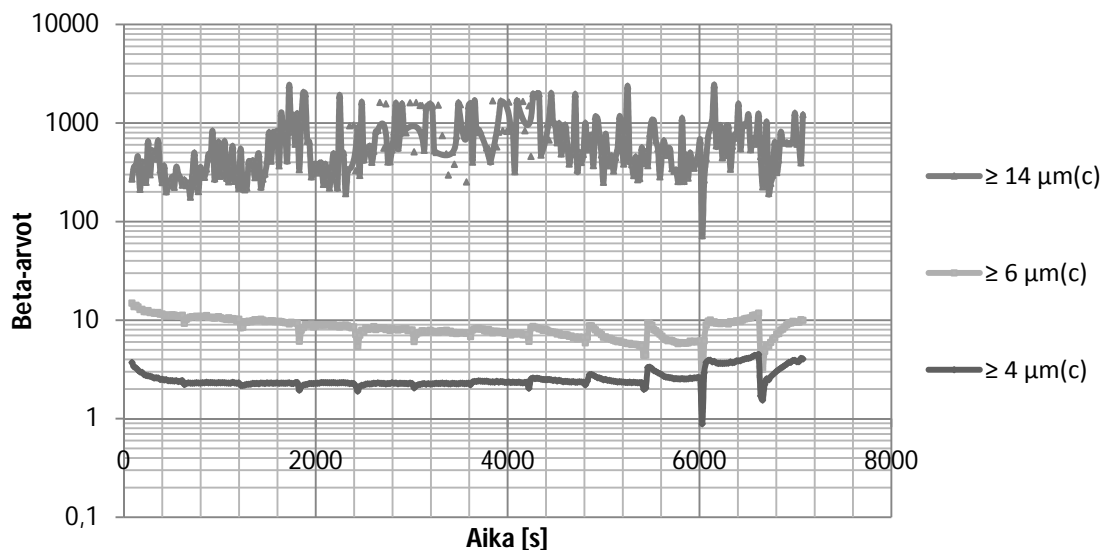
partikkeleista  $\approx 98\%$  ja  $x \geq 14 \mu\text{m(c)}$  partikkeleista  $\approx 99.9\%$ . Ylävirran puhtaustason muuttuessa arvoon 20/18/14 saavuttaa sama suodatin alavirran puhtauden 16/12/2.

Kuvassa 4.10. on esitetty yhtälöllä (18) lasketut partikkelimäärät viiden mikrometrin suodattimen alavirrassa koko vaihtuvan virtauksen ajalta. Tilavuusvirran muutos näkyy partikkelilukumäärien kasvuna muutosajankohdassa. Varsin nopeasti lukumäärät kuitenkin palautuvat mittauksista lasketun suodatussuhteen määrittämälle tasolle erilaisista ylävirran gravimetrisista tasoista.



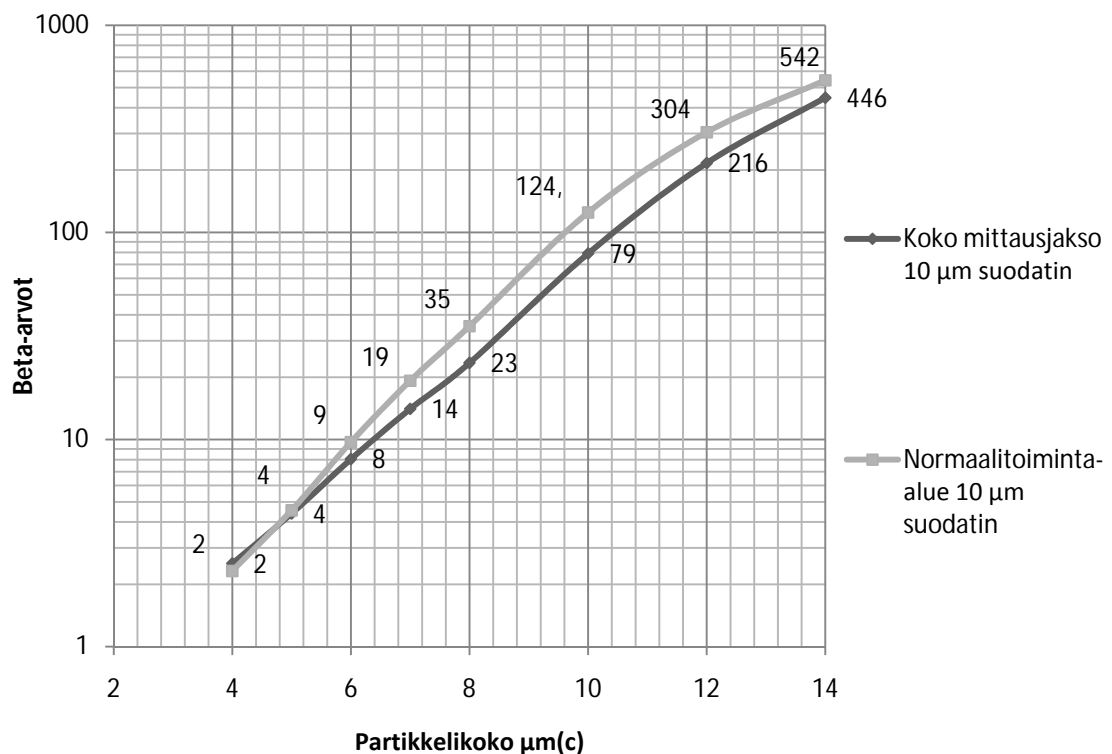
**Kuva 4.10.** Partikkelimäärät 5  $\mu\text{m}$  suodattimen alavirrassa koko mittausjaksolta.

Viiden mikrometrin suodattimen mittauksen jälkeen vaihtuvan tilavuusvirran mittaukset toteutettiin kymmenen mikrometrin suodattimelle. Tämän mittausjakson beta-arvojen kehitys on havainnollistettu kuvan 4.11. avulla.



**Kuva 4.11.** Koko mittausjakson beta-arvot 10  $\mu\text{m}$  suodattimelle.

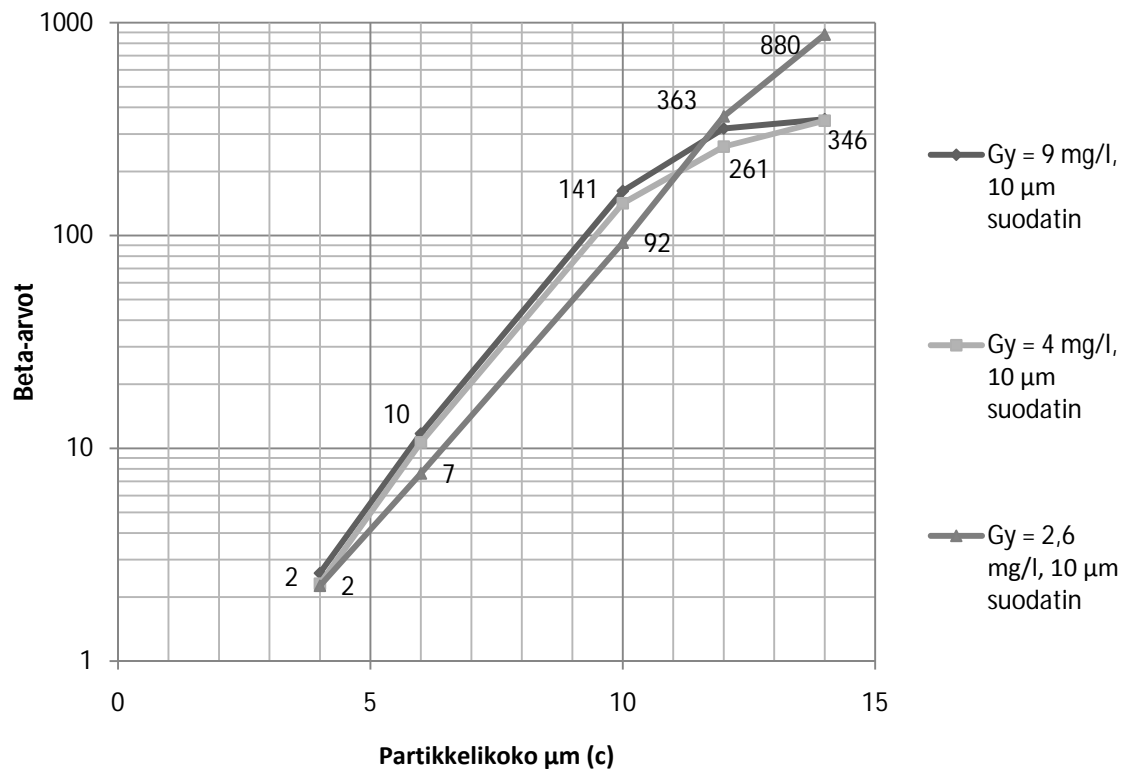
Kymmenen mikrometrin suodattimen beta-arvojen kehitys ja muutokset ovat pienempiä likamäärän muuttuessa, verrattaessa tuloksia viiden mikrometrin suodattimen mittaukseen (kuva 4.12). Neljän mikrometrin ja tätä suurempien partikkeleiden beta-arvo on koko mittauksen ajan hyvin lähellä arvoa 2. Suurempien partikkelien kuten  $\beta_6$  -arvo tasaantuu alun korkean lukeman jälkeen normaalitoiminnan arvoon 4. Isoilla 14 mikrometrin partikkeleilla beta-arvo vaihtelee alle 100 ja yli 1000 välillä mittauksen aikana. Koko mittausjakson keskiarvo  $\beta_{14}$  -arvolle oli 446 ja normaalitoiminta alueen arvoksi laskettiin 542.



**Kuva 4.12.** Beta-arvojen vertailu 10  $\mu\text{m}$  suodattimelle.

Kymmenen mikrometrin suodattimelle koko mittausjaksolta mitatut beta-arvot muodostettiin 3 bar paine-eroon asti. Yli 6 mikrometrin partikkeleiden beta-arvojen mittausajanjaksojen keskiarvot laskivat koko mittauksen ajan. Yli 14 mikrometrin partikkeleiden beta-arvojen keskiarvo pysyi tasaisena koko mittausajanjaksolta laskettuna. Kymmenen mikrometrin suodattimen mittausulos eroaa viiden mikrometrin suodattimelle saatavasta tuloksesta niin beta-arvojen suuruuden, kuin niiden kehityksen osalta. Karkeammalle kymmenen mikrometrin suodattimelle lasketut normaalitoiminta-alueen beta-arvot olivat koko mittausajanjaksolta laskettuja beta-arvoja korkeammat, kun taas viiden mikrometrin suodattimella koko mittausajanjaksolta lasketut beta-arvot olivat normaalitoimintaa alueen arvoja korkeammat.

Kymmenen mikrometrin suodattimen suodatussuhde pienille  $< 8 \mu\text{m(c)}$  partikkeleille on alhainen  $\beta_{<8} \leq 20$ . Neljän mikrometrin partikkeleille suodatussuhde on n. 2 läpi koko mittausjakson. Seuraavan puhtausluokan määrittelemällä kuuden mikrometrin partikkeleilla suodatussuhde on 7 – 10 välissä mittausajanjaksolla. Suuremmilla yli 14 mikrometrin partikkeleilla suodatussuhteen arvon vaihtelu oli suuri. Kuvaan 4.13 on merkitty mitattujen beta-arvojen ( $\beta_4, \beta_6, \beta_{10}, \beta_{12}$  ja  $\beta_{14}$ ) keskiarvot kolmella eri ylävirran gravimetrisilla tasolla kymmenen mikrometrin suodattimelle.



**Kuva 4.13.** Beta-arvot erilaisilla lian syötöillä kymmenen mikrometrin suodattimelle.

Mittauksessa vallinneet ylä- ja alavirran partikkelilukumäärät sekä näistä lasketut puhtausluokat on esitetty taulukossa 4.3. Partikkelimäärät ovat mittausajankohdan keskiarvoja. Päättilavuusvirta pidettiin vakiona jokaisessa tilavuusvirtatasossa 10 minuuttia. Kuten viiden mikrometrin suodattimen mittauksessa, myös kymmenen mikrometrin suodattimen mittauksissa, jokaisen tilavuusvirtatason avulla luodun gravimetrisen tason annettiin tasaantua n. 2 – 3 minuuttia säätötoimenpiteiden jälkeen. Tämän jälkeen partikkelimäärät ja beta-arvot laskettiin seuraavan 6 minuutin mittausjaksolta tilavuusvirtatason keskeltä.

Partikkelilukumäärissä ja näistä määritetyissä puhtausluokissa nähdään kasvua verrattuna viiden mikrometrin suodattimen mittaukseen. Tämä johtuu kymmenen mikrometrin suodattimen mittauksen korkeammasta syötön gravimetrisestä tasosta ja suodattimen alhaisemmasta suodatussuhteesta. Karkeamman kymmenen mikrometrin suodattimen mittauksessa päättilavuusvirran gravimetriset tasot ja tasoja vastaavat partikkelimäärät sekä puhtausluokat on esitetty taulukossa 4.3.

**Taulukko 4.3.** Vaihtuvan virtauksen mittauksen ylä- ja alavirran puhtausluokat 10 µm suodattimelle.

Tilavuusvirta 51 l/min ja $G_y \approx 9$ mg/l						
Ylä- virta	Partikkelikoko	[kpl/ml]	ISO 4406 luokat	Ala- virta	[kpl/ml]	ISO 4406 luokat
	> 4 µm(c)	30215	22		12538	21
	> 6 µm(c)	8659	20		768	17
	> 14 µm(c)	615	16		2,76	9
Tilavuusvirta 104 l/min ja $G_y \approx 4$ mg/l						
Ylä- virta	Partikkelikoko	[kpl/ml]	ISO 4406 luokat	Ala- virta	[kpl/ml]	ISO 4406 luokat
	> 4 µm(c)	21833	22		9408	20
	> 6 µm(c)	5810	20		558	16
	> 14 µm(c)	398	16		1,2	7
Tilavuusvirta 130 l/min ja $G_y \approx 3,4$ mg/l						
Ylä- virta	Partikkelikoko	[kpl/ml]	ISO 4406 luokat	Ala- virta	[kpl/ml]	ISO 4406 luokat
	> 4 µm(c)	13969	21		6042	20
	> 6 µm(c)	3555	19		399	16
	> 14 µm(c)	232	15		0,73	7
Tilavuusvirta 155 l/min ja $G_y \approx 2,8$ mg/l						
Ylä- virta	Partikkelikoko	[kpl/ml]	ISO 4406 luokat	Ala- virta	[kpl/ml]	ISO 4406 luokat
	> 4 µm(c)	11782	21		5159	20
	> 6 µm(c)	3003	19		370	16
	> 14 µm(c)	193	15		0,26	5
Tilavuusvirta 165 l/min ja $G_y \approx 2,6$ mg/l						
Ylä- virta	Partikkelikoko	[kpl/ml]	ISO 4406 luokat	Ala- virta	[kpl/ml]	ISO 4406 luokat
	> 4 µm(c)	11200	21		4931	19
	> 6 µm(c)	2865	19		387	16
	> 14 µm(c)	182	15		0,24	5

Mittauksesta määritetty puhtausluokkatarkastelu osoittaa, että kymmenen mikrometrin suodatin pystyy suodattamaan järjestelmän ylävirran puhtausluokkien ollessa 22/20/16 keskimäärin alavirran puhtauden tasoihin 21/17/9. Ylävirran puhtauden parantuessa luokkiin 21/19/15 saavutetaan suodattimen alavirrassa keskimäärin puhtausluokat 19/16/5. Viiden ja kymmenen mikrometrin suodattimille tehdyt vaihtuvan virtauksen mittaukset suoritettiin ISO MTD -testipölyä käyttäen.

Kymmenen mikrometrin suodattimelle tehdyn vaihtuvan virtauksen beta-arvoja on verrattu standardin mukaisen multipass-testin beta-arvoihin liitteessä 11. Vertailun suodattimet olivat saman kokoluokan C suodattimia. Vertailun kuvaajista nähdään vaihtuvan virtauksen aiheuttamat beta-arvojen muutokset tilavuusvirtaa säädettäessä. Lisääntyneen tai vähentyneen testipölyn määrän suodattimen ylävirrassa ei havaita muutoin vaikuttavan suodattimelle laskettuihin beta-arvoihin. Vertailujen mittauksien beta-arvo kuvaajat ovat lähes identtiset lukuun ottamatta virtausnopeuden muutoksen aiheuttamia hetkellisiä poikkeamia. Vertailu osoittaa, että multipass-testilaitteistolla ja ISO MTD -testipölyllä mitattujen likamäärien muutoksien ei havaittu vaikuttavan

suodattimelle laskettujen beta-arvojen suuruuteen koko mittausaikavälillä, hetkittäisiä muutoksia lukuun ottamatta. Mitatuilla suodatusasteilla beta-arvojen suuruuden ja tätä kautta järjestelmän puhtauden kannalta merkittävämpää oli suodattimen elinkaaren vaihe ja järjestelmän tilavuusvirrassa tapahtuvat vaihtelut.

Kuten mittaustuloksista nähdään suodattimen beta-arvoihin vaikuttaa merkittävästi suodattimen elinkaaren vaihe. Suodattimen beta-arvoille saadaan hyvin toisistaan poikkeavia arvoja jo standardin mukaisella multipass- testillä, jossa ylävirran gravimetrinen taso pyritään pitämään vakiona, riippuen laskenta-ajanhetkestä ja -pituudesta. Suodatussuhteiden erot eri suodattimen elinkaaren vaiheiden välillä standardin mukaisessa mittauksessa ovat niin suuret, että likamäärän vaihtelun aiheuttama muutos suodattimen beta-arvoihin on näihin verrattuna varsin pieni.

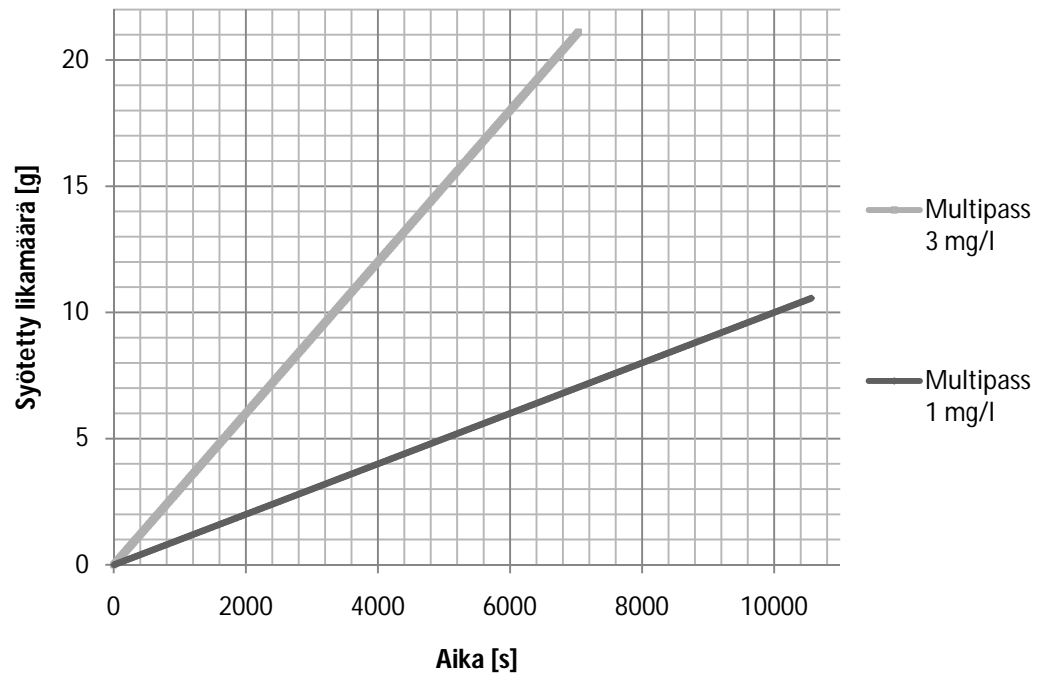
#### **4.4. Multipass-mittaukset eri lähtötason likakonsentraatioilla**

Suodatusasteille 5 ja 10 µm tehtiin standardin mukaiset multipass-testit, joihin vaihtuvan virtauksen tuloksia voitiin verrata. Testissä käytetty testipöly ISO 12103-1, A3 oli samaa kuin vaihtuvan virtauksen mittauksissa. Järjestelmän paine säädettiin 3,5 bar ± 0,5 bar lukemiin, kuten VV-mittauksissa. Pääjärjestelmän gravimetrisiksi tasoiksi, joissa beta-arvojen kehitystä vertailtiin, valittiin 1 mg/l ja 3 mg/l. Käytetyt mittauserot 5026, 5028, 5030 ja 5031 ovat multipass- testejä eri lian syötöillä sekä numerot 5025 ja 5018 ovat vaihtuvan virtauksen mittauksia. Mittauksien tarkemmat pöytäkirjat ja alkuarvot on esitetty liitteissä 2 ja 3. Mitatut suodattimet kuuluivat kokoluokkiin A, B ja C. Multipass-testeillä saaduista beta-arvoista laskettiin normaalitoiminta-alueen arvot ja koko mittausjakson aikana saadut beta-arvot. Suodattimen normaalitoiminta-alueen beta-arvotarkastelussa jätettiin arvioinnin ulkopuolelle suodattimen elinkaaren lopussa tapahtuvan paine-eron nopean nousumisen vaikutukset beta-arvoihin.

##### **4.4.1. Viiden mikrometrin suodattimen multipass-testitulokset**

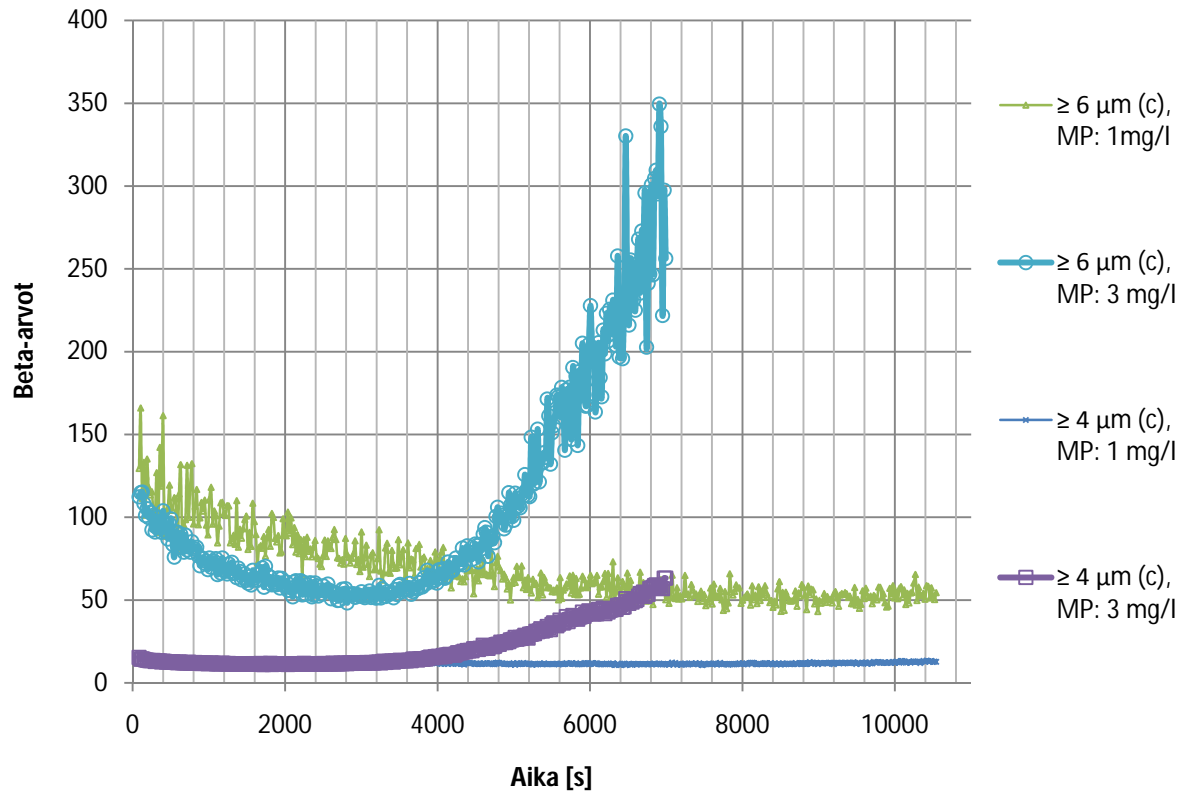
Multipass-testeissä syötetyt likamäärät ajan suhteen on esitetty kuvassa 4.14. Likamäärä on laskettu syöttötilavuusvirran, syöttöpiirin gravimetrisen tason ja testiajan avulla, kuten vaihtuvan tilavuusvirran mittauksissa. Testipiirin gravimetrinen taso pyrittiin pitämään vakiona, säätämällä syöttötilavuusvirta ja päätilavuusvirta vakioiksi sekä sekoittamalla syöttöpiiriin ennalta määritetty gravimetrinen taso. Pääpiirin gravimetrinen taso ei kuitenkaan pysy täysin muuttumattomana, johtuen esim. suodattamattoman lian kiertämisestä järjestelmässä. Multipass-mittauksissa käytetyllä ylävirran gravimetrisellä tasolla on vaikutus suodattimelle mittauksessa saataviin beta-arvoihin. Pienemmällä lian syötöllä beta-arvojen kehitys on maltillisempaa ja suuremmalla lian syötöllä muutokset tapahtuvat varsin nopeasti. Molemmissa multipass-mittauksissa syöttö- ja päätilavuusvirta olivat samansuuruisia.

Poiston suuruus pyrittiin säätämään syöttötilavuusvirran mukaan molemmissa mittauksissa. Poistotilavuusvirran avulla pääjärjestelmän tilavuus pyrittiin pitämään vakiona. Likamäärän laskennassa poiston kautta järjestelmästä lähtevää likamäärää ei oteta huomioon, eikä järjestelmässä ollut poistotilavuusvirran partikkelimäärän mittausta. Tämä tulisi ottaa huomioon erityisesti suodattimen testipölylikapasiteetilaskennassa, koska osa alavirrassa olevasta testipölystä poistuu järjestelmästä poistovirtauksen mukana.

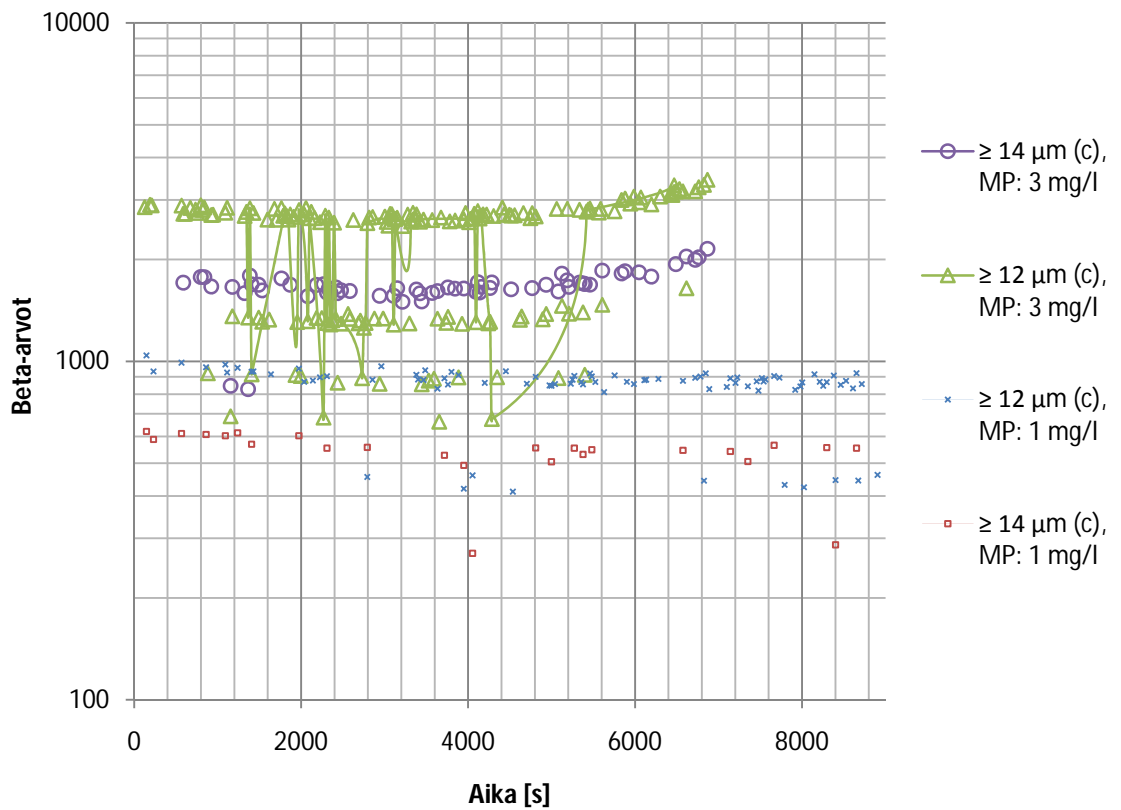


**Kuva 4.14.** Multipass-testeissä syötetty likamäärä 1, 3 mg/l –likakonsentraatioilla.

Kuvissa 4.15 ja 4.16 on piirretty  $\beta_4$ ,  $\beta_6$ ,  $\beta_{12}$  ja  $\beta_{14}$  -arvojen mittausaikajakson kuvaajat. Neljän ja kuuden mikrometrin partikkeleiden beta-arvojen kuvaajista nähdään likamäärän vaikutus suodatussuhteeseen. Viiden mikrometrin suodattimella pienten partikkeleiden beta-arvot alkoivat kasvaa, kun pääjärjestelmään oli syötetty n. 10 grammaa ISO MTD testipölyä. Kun ylävirran gravimetrinen taso oli 3 mg/l, tämä tapahtui n. 3500 sekunnin kuluttua mittauksen aloittamisesta ja alhaisemmalla ylävirran gravimetrisellä tasolla 1 mg/l aika oli n. 9800 sekuntia mittauksen aloittamisesta.



Kuva 4.15. Beta-arvot  $5 \mu\text{m}$  suodattimelle, koko multipass-mittausjakson ajalta.

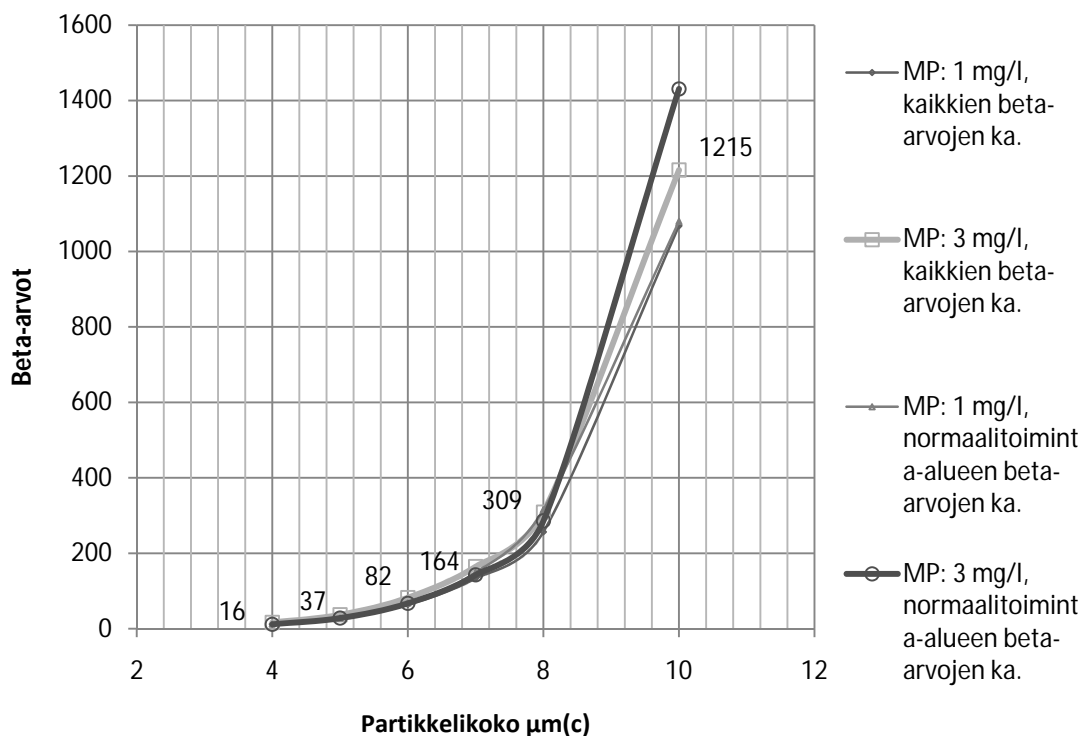


Kuva 4.16. Beta-arvot  $5 \mu\text{m}$  suodattimelle, koko multipass-mittausjakson ajalta.



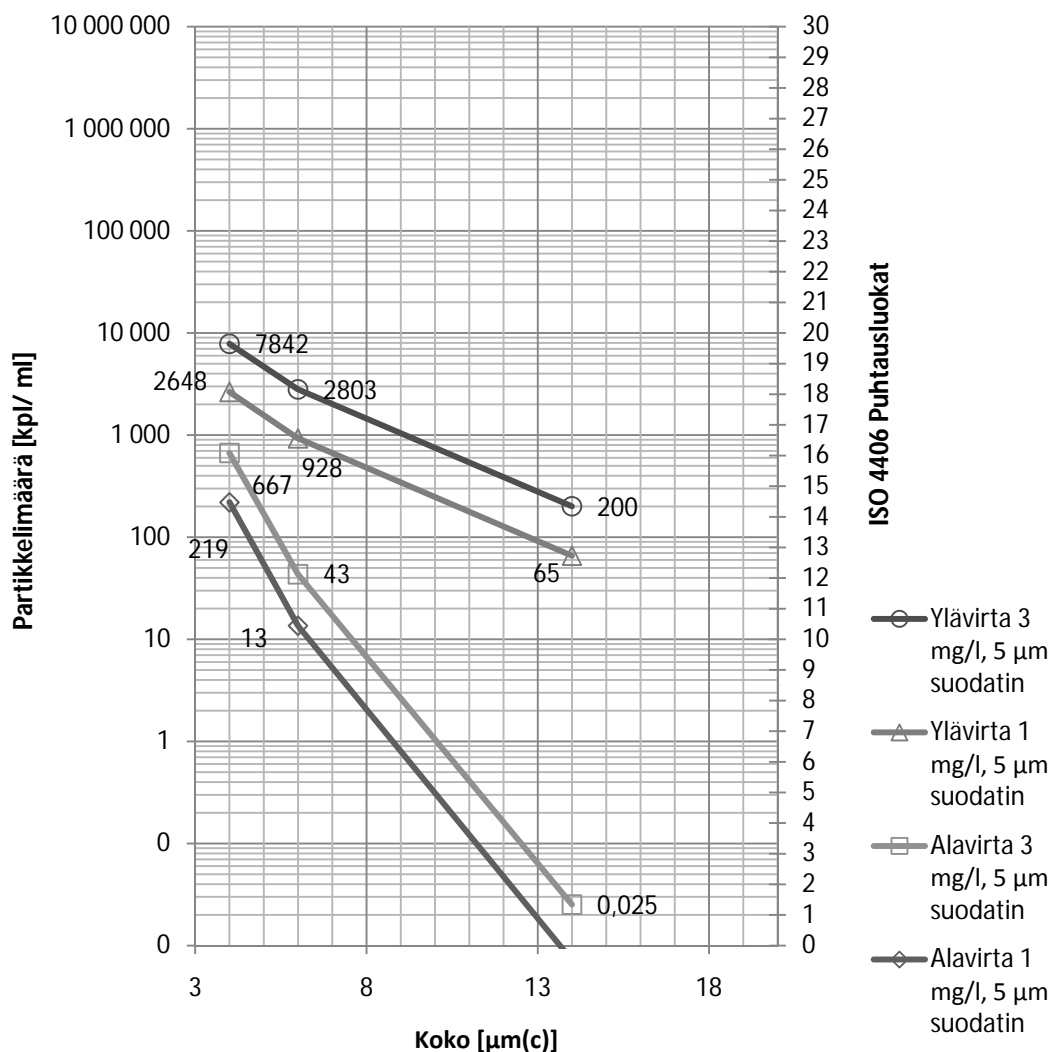
Viiden mikrometrin suodattimen beta-arvot alkavat nousta, kun paine-ero suodattimen yli ylittää 0,8 bar. Tässä vaiheessa testipiiriin oli multipass-testissä syötetty n. 10 grammaa ISO MTD -testipölyä. Käytännön järjestelmissä suodattimen elinikä tämän kriittisen pisteen jälkeen voi olla järjestelmän likaolosuhteista ja materiaalista riippuen hyvinkin lyhyt. Ajanjakso, joka kuluu suodattimen paine-eron nousemiseen kriittiseen pisteeseen asti, on yleensä pitkä suhteessa paine-eron nousemiseen kriittisen pisteen jälkeen suodattimen elinkaaren lopussa aina ohivirtausventtiilin avautumispaineeseen asti. Kriittisen pisteen jälkeinen paine-eron nopea kasvu ja tästä aiheutuva beta-arvojen nopea kehitys nähdään myös mittauksien beta-arvokuvaajista. Yhden milligramman per litra multipass-mittauksessa paine-eron kehitys oli maltillisempaa, johtuen järjestelmän suhteellisesti pienemmästä likamäärästä. Alhaisemmalla likamäärällä suodatin ei tukkeudu yhtä nopeasti ja näin paine-eron kehitys on myös maltillisempaa.

Multipass-testilaitteistossa likaolosuhteet tasoittuvat ja mittaussanturit huuhtoutuvat tehtyjen mittauksien mukaan suhteellisen nopeasti. Tämä johtuu järjestelmän päätilavuuden pienestä koosta 35 – 40 litraa ja päätilavuusvirran suhteellisen suuresta arvosta (60 l/min) tämän suhteen. Järjestelmän ylävirran partikkelimäärä tasaantuu n. 5 minuutin kuluttua mittauksen alkamishetkestä. Tämän perusteella voidaan beta- arvoille laskea suodattimen normaalitoiminnan keskiarvot mittaussajanjaksoilta 5 – 50 minuuttia, kun pääjärjestelmän ylävirran gravimetrisen taso on 3 mg/l ja 5 – 130 minuuttia, kun gravimetrisen taso on 1 mg/l. Normaalitoiminnan beta-arvot on esitetty kuvassa 4.17.



**Kuva 4.17.** Beta-arvojen keskiarvot 5  $\mu\text{m}$  suodattimelle.

Suuremmilla partikkeleilla  $x \geq 10 \mu\text{m(c)}$  mitattuihin beta-arvoihin vaikuttaa partikkeleiden vähäinen määrä pääjärjestelmässä ja suodattimen hyvä suodatussuhde isoilla partikkeleilla. Pienestä isojen partikkeleiden lukumäärästä johtuen beta-arvot voivat vaihdella suuresti testin aikana, yhden tai useamman partikkelin päästessä suodattimen läpi alavirtaan. Viiden mikrometrin suodatin suodattaa näistä isommista partikkeleista yleensä lähes kaikki, jolloin isompien partikkelien beta-arvot ovat todella suuria esim.  $\beta_{16} \geq 10\,000$  lähes koko testin ajan, mutta yksittäinen suodattimen läpäissyt partikkeli pudottaa beta-arvoa rajusti. Samalla tämä hetkellinen beta-arvon pudotus vaikuttaa myös mittausajanjaksolta laskettuun beta-arvojen keskiarvoon. Ilmiöstä johtuen tulisi suuremmille partikkeleille määrittää beta-arvot testipölyllä, joka sisältää määrältään enemmän isoja partikkeleita. Suuremmalla partikkelilukumäärällä läpäisyn todennäköisyys ja läpäisymäärä on isompi, jolloin suodatussuhteen muutokset ovat pienemmät. Mittauksissa käytetyllä ISO MTD -testipölyllä isojen partikkelien lukumäärä suodattimen ylä- ja alavirrassa oli varsin pieni (kuva 4.18.), jolloin suodattimelle lasketut beta-arvot vaihtelivat suuresti mittauksien kuluessa.



Kuva 4.18. Partikkelimäärät 5  $\mu\text{m}$  suodattimelle.

Standardin mukaisten multipass-mittauksien puhtausluokat suodattimen ylä- ja alavirrasta 5 µm suodattimelle kahdella eri partikkelikonsentraatiolla on esitetty taulukossa 4.4.

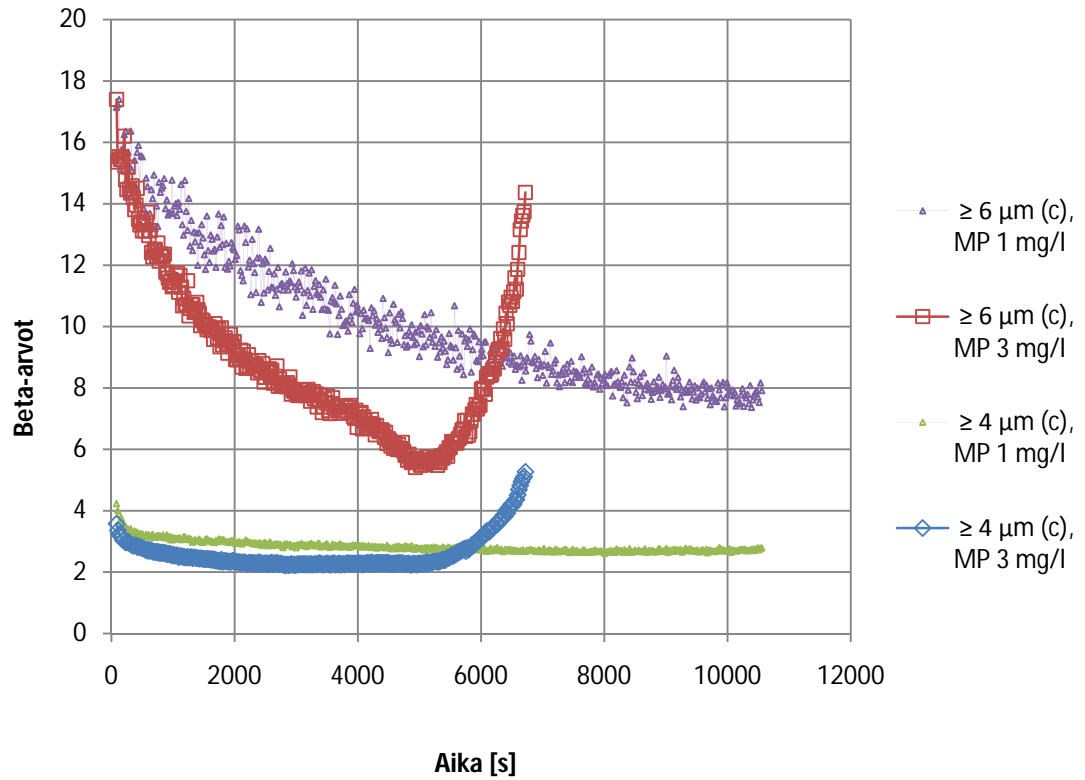
**Taulukko 4.4.** Partikkelikonsentraatiot ja puhtausluokat 5 µm suodattimen ylä- ja alavirrassa.

	<b>Partikkelikonsentraatio 1 mg/l</b>	<b>Partikkelikonsentraatio 3 mg/l</b>
<b>Ylävirran puhtausluokka</b>	19/17/13	20/19/15
<b>Alavirran puhtausluokka</b>	15/11/0	17/13/1

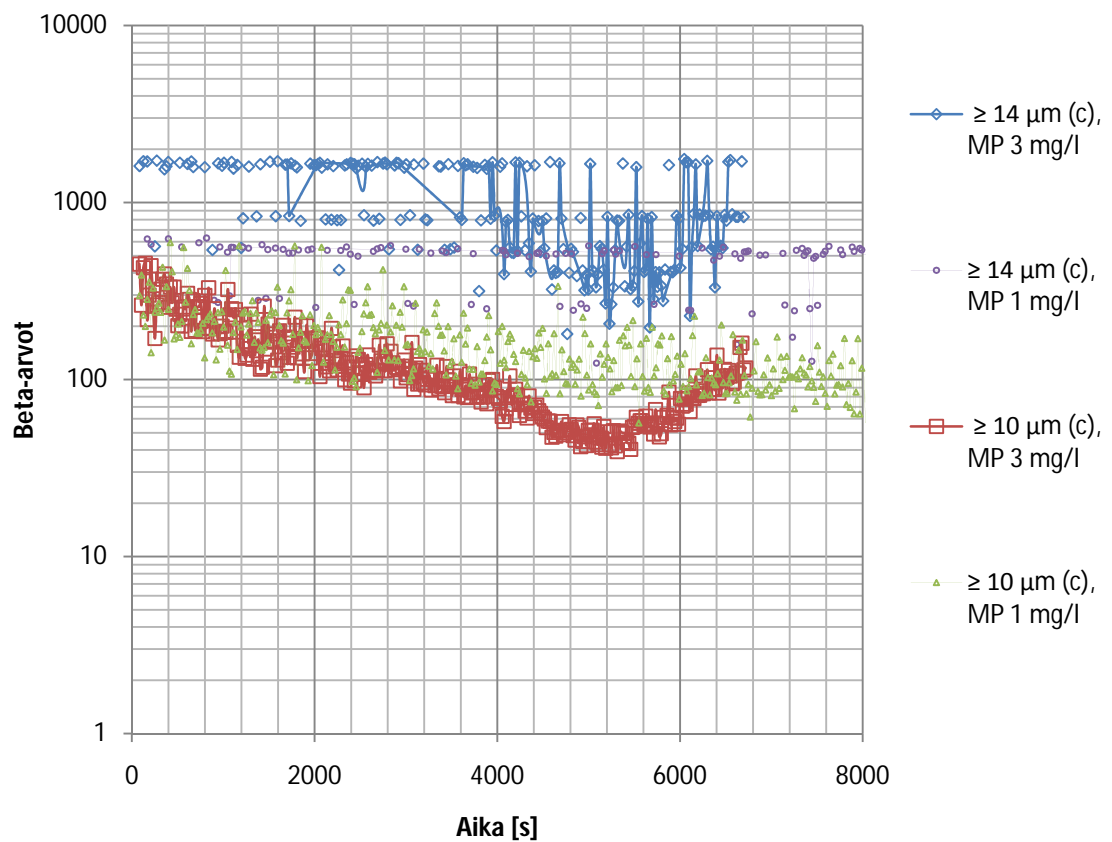
Puhtausluokkamäärittelyssä käytettiin partikkelimäärinä mittausaikajaksolta saatuja laskenta-aikavälin keskiarvoja. Partikkelimäärät on pyöristetty kokonaislukutarkkuuteen yksikössä [kpl/ml].

#### **4.4.2. Kymmenen mikrometrin suodattimen multipass-testitulokset**

Likamäärän vaikutus kymmenen mikrometrin suodattimen suodatussuhteisiin mitattiin kahdella eri likakonsentraatiolla ISO MTD -testipölyä. Likakonsentraatiot suodattimen ylävirrassa olivat 1 ja 3 mg/l. Kuvissa 4.19 ja 4.20 on piirretty suodattimen  $\beta_4$ -,  $\beta_6$ -,  $\beta_{10}$ - ja  $\beta_{14}$  -arvojen mittausaikajakson kuvaajat. Beta-arvojen kuvaajista nähdään likamäärän vaikutus multipass- testillä mitattuun suodatussuhteeseen. Kymmenen mikrometrin suodattimella pienten partikkeleiden beta-arvot alkoivat kasvaa nopeasti, kun pääjärjestelmän oli syötetty n. 35 grammaa ISO MTD testipölyä. Mittauksessa numero 5026, 3 mg/l ylävirran gravimetrisellä tasolla tämä tapahtui n. 5000 sekunnin kuluttua mittauksen aloittamisesta. Mittauksessa numero 5030, 1 mg/l suodattimen beta-arvot laskivat koko mittausajanjakson ja likaantumisen aiheutuva suodattimen tukkeutuminen sekä tästä seurauksena syntyvä beta-arvojen nousu jäi mittausaikajakson ulkopuolelle.

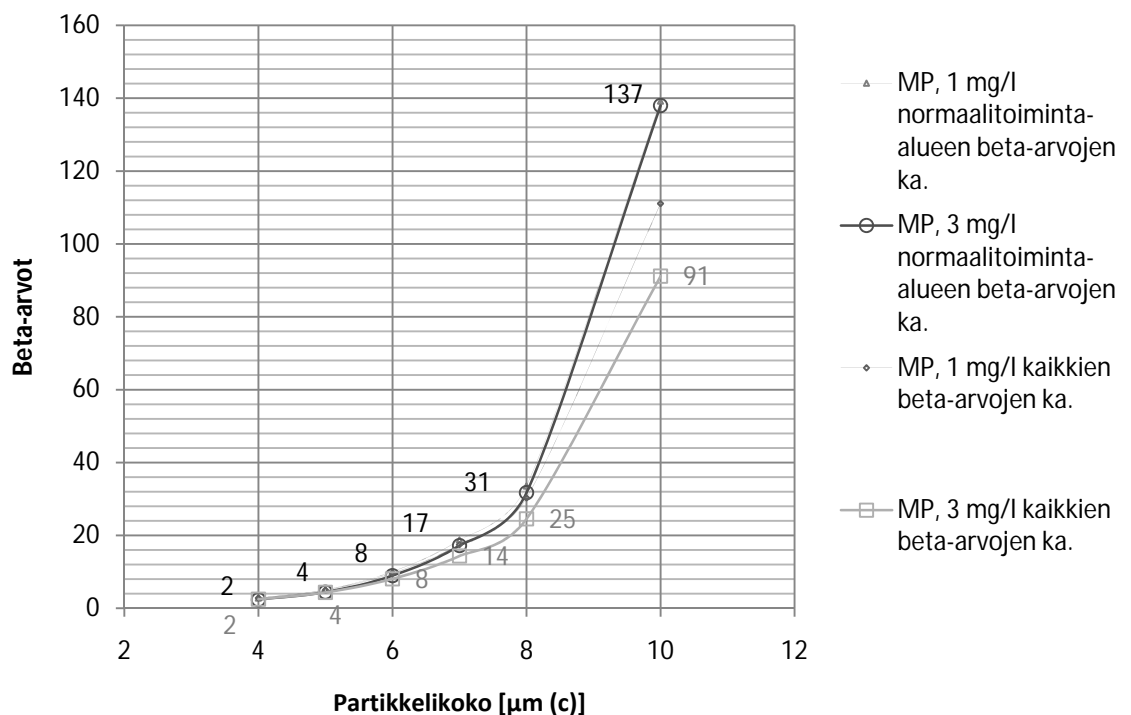


*Kuva 4.19. Beta-arvot 10  $\mu\text{m}$  suodattimelle koko multipass-mittauksien ajalta.*



*Kuva 4.20. Beta-arvot 10  $\mu\text{m}$  suodattimelle koko multipass-mittauksien ajalta.*

Kymmenen mikrometrin suodattimella normaalitoiminta-alue määritettiin paine-eron raja-arvon avulla. Raja-arvoksi valittiin kohta, jossa suodattimen beta-arvot alkavat nousta nopeasti likaantumisen vaikutuksesta. Tämä paine-ero oli mitatuilla kymmenen mikrometrin suodattimilla 0,7 – 1 bar välissä. Pienellä ylävirran gravimetrisella tasolla 1 mg/l paine-ero ei noussut suodattimen yli, vaikka koko syöttösäiliön tilavuus oli syötetty testijärjestelmään. Tällä gravimetrisella tasolla suodattimen beta-arvoja voitiin tarkastella alun likatasapainon tasoittumisen ja mittausantureiden huuhtoutumisen jälkeen koko loppumittausajanjaksolta. Multipass-testeistä lasketut suodattimen beta-arvot on merkitty kuvaan 4.21. Beta-arvot on laskettu ylä- ja alavirran partikkelilukumääristä yksikössä [kpl/ml] ja pyöristetty kokonaislukutarkkuuteen.



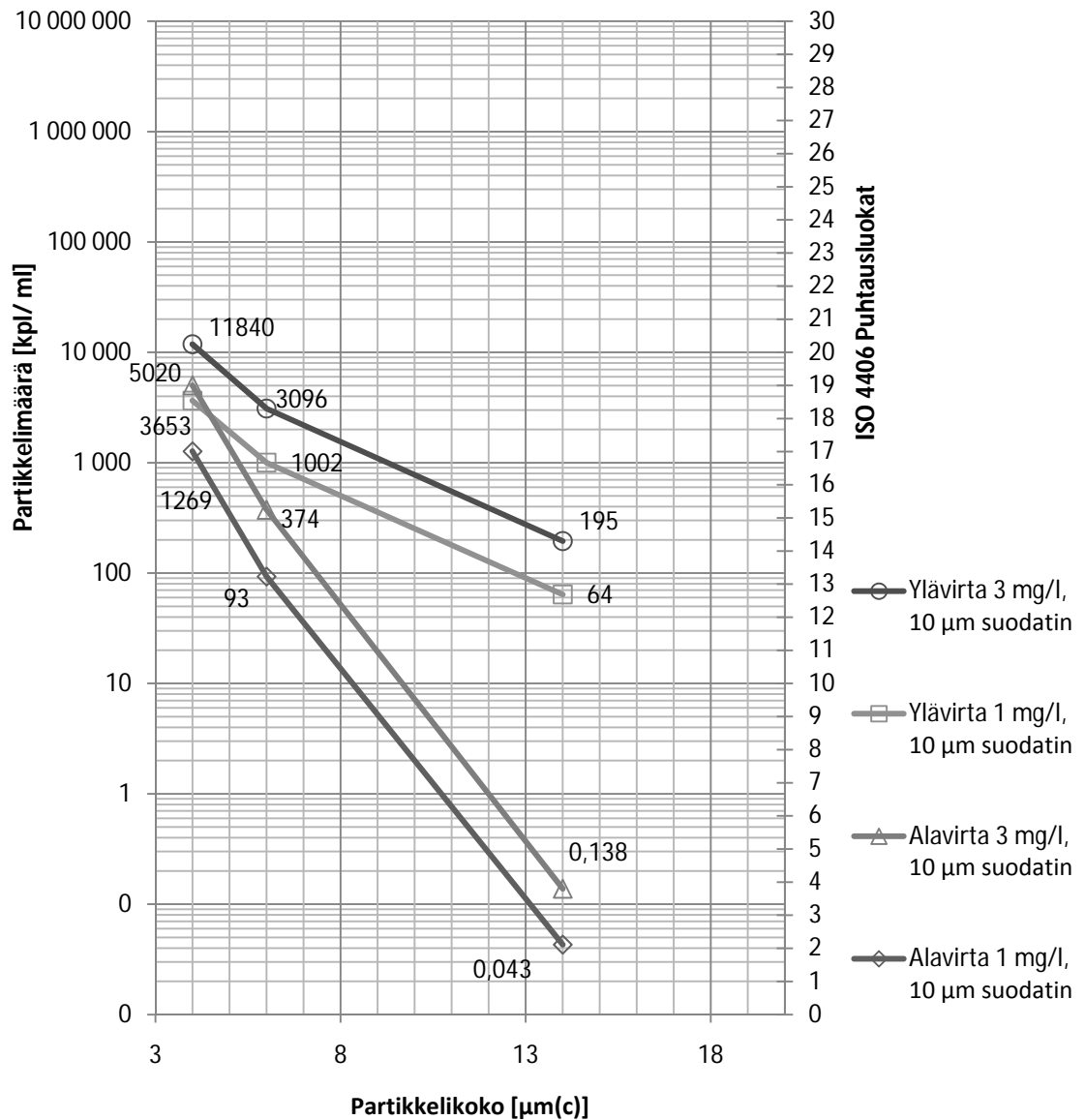
**Kuva 4.21.** Beta-arvojen keskiarvot 10 µm suodattimelle.

Kymmenen mikrometrin suodattimen multipass-testien puhtausluokkatarkastelussa alavirran puhtausluokat eri partikkelikokoluokkille olivat 2 – 10 luokkaa alhaisemmat kuin ylävirran puhtausluokat (taulukko 4.5 ja kuva 4.22).

**Taulukko 4.5.** Partikkelikonsentraatiot ja puhtausluokat 10 µm suodattimen ylä- ja alavirrassa.

	Partikkelikonsentraatio 3 mg/l	Partikkelikonsentraatio 1 mg/l
<b>Ylävirran puhtausluokka</b>	20/19/15	18/17/13
<b>Alavirran puhtausluokka</b>	19/15/4	17/13/2

Pienemmällä testipiirin gravimetrisella tasolla 1 mg/l, muutokset olivat puhtausluokkina tarkasteltuna samansuuruiset 3 mg/l mittauksen kanssa (kuva 4.22 ja taulukko 4.5). Standardin määrittelemät puhtausluokkien raja-arvojen välit ovat suhteellisen suuret, jolloin eri partikkelikokojen suodatussuhteen muutokset eivät vaikuta merkittävästi saavutettavaan puhtaustasoon varsinkaan isoilla puhtausluokkien arvoilla.

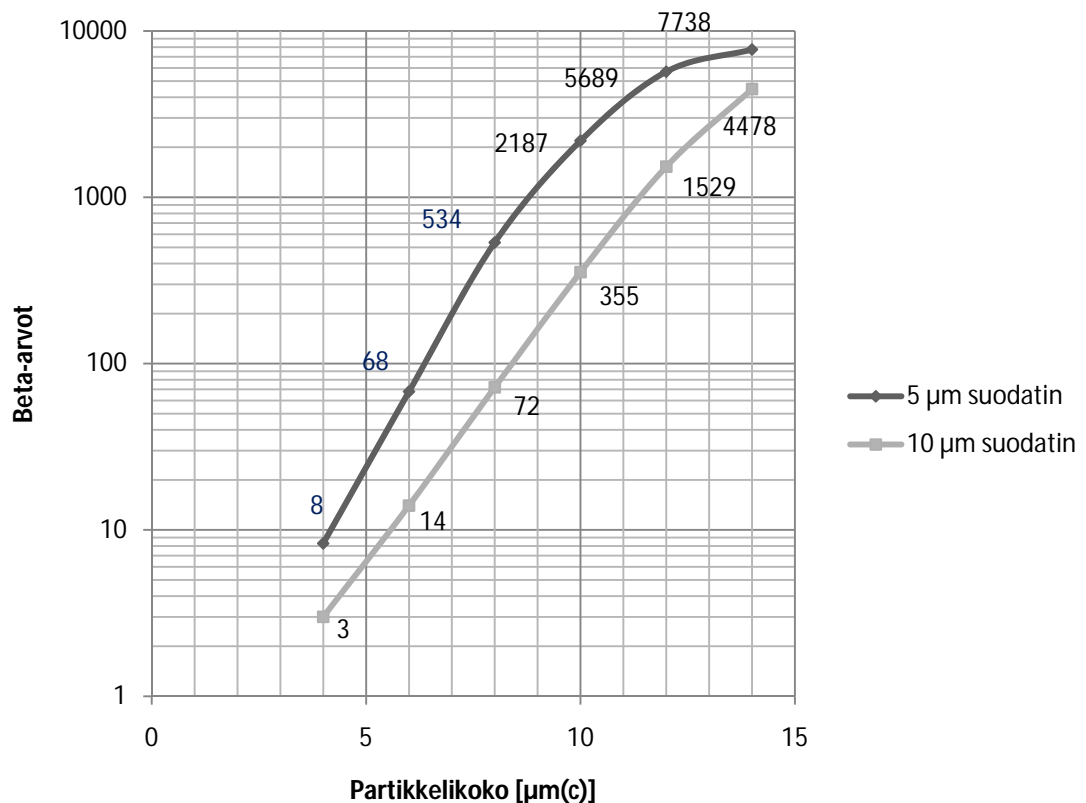


**Kuva 4.22.** Multipass- testien partikkelilukumäärät ja puhtausluokkavertailu 10  $\mu\text{m}$  suodattimelle.

#### 4.5. Partikkelikokojakauman vaikutuksen mittaaminen

Partikkelikokojakauman vaikutuksen mittaamiseksi, tehtiin suodatusasteille 5 ja 10 mikrometriä multipass-mittaukset karkeammalla ja hienommalla testipölyllä. Testipölyn ISO A4 Coarse Test Dust partikkelikokojakauma sisältää kumulatiivisesti suuremman osuuden isoja likapartikkeleita kuin ISO MTD -testipöly. Testipölyn ISO A2 Fine Test Dust kokojakauma on hienojakoinen ja se sisältää kumulatiivisesti enemmän pienempiä likapartikkeleita kuin testipöly ISO MTD. Testipölyjen partikkelikokojakaumien vertailu on esitetty liitteessä 5.

Karkealla testipölyllä (CTD) ja 1 mg/l ylävirran gravimetrisella tasolla mitatun suodattimen paine-ero nousi tasaisesti mittauksen kuluessa. Paine-eron kriittinen piste, jonka jälkeen beta-arvot ja paine-ero nousivat nopeasti, saavutettiin vasta aivan mittauksien lopussa. Beta-arvojen tarkastelun aloitusajankohdaksi valittiin 300 sekuntia mittauksen alkamisesta. Viiden mikronin suodattimelle saaduista tuloksista huomioitiin kaikki 300 sekunnin jälkeen mitatut ja mittauksen loppuun asti saadut partikkelimäärät ja näistä lasketut beta-arvot. Saaduista beta-arvoista laskettiin mittausajanjakson keskiarvot ja nämä on esitetty kuvassa 4.23. Karkealla testipölyllä mitatut suodattimet kuuluivat kokoluokkaan B.



**Kuva 4.23.** Viiden ja kymmenen mikrometrin suodattimien beta-arvot testipölyllä ISO CTD.

Vaikka ylävirran suurien  $x \geq 10 \mu\text{m(c)}$  partikkelien lukumäärä oli viiden mikrometrin suodattimelle tehdyissä CTD mittauksissa MTD mittauksia suurempi, oli yli kymmenen mikrometrin partikkeleilla alavirran partikkelimäärä lähellä nollaa koko mittauksen ajan. Jos partikkeleita on alavirrassa karkealla testipölyllä vähän  $n \leq 2 \text{ kpl/ml}$ , ovat beta-arvot suuria  $\beta_x \geq 2000$ . Viiden mikrometrin suodatin suodattaa isoista  $x \geq 10 \mu\text{m(c)}$  partikkeleista lähes kaikki ja vain yksittäiset partikkelit läpäisevät suodattimen satunnaisesti. Alavirran partikkelimäärien vaihtelu aiheuttaa suuresta ylävirran lähtömäärästä suuren beta-arvojen vaihtelun.

Multipass-testissä mittausjärjestelmään syötetty likamäärä on suuri ja voidaan todeta, että todellisissa järjestelmissä näin suuret isojen partikkeleiden määrät ovat varsin harvinaisia. Jos kuitenkin todellisissa järjestelmissä esiintyy isoja likapartikkeleita, viiden mikrometrin suodatin suodattaa ne tehokkaasti. Kymmenen ja viiden mikrometrin suodattimien suodatustehokkuusvertailu eri partikkelikokoluokille on esitetty taulukossa 4.6. Beta-arvo 200, joka vastaa suodatustehokkuutta 99,5 % saavutetaan mittauksien perusteella  $n. 7 \mu\text{m(c)}$  kokoisilla partikkeleilla viiden mikrometrin suodattimella ja  $n. 9 \mu\text{m(c)}$  partikkeleilla kymmenen mikrometrin suodattimella.

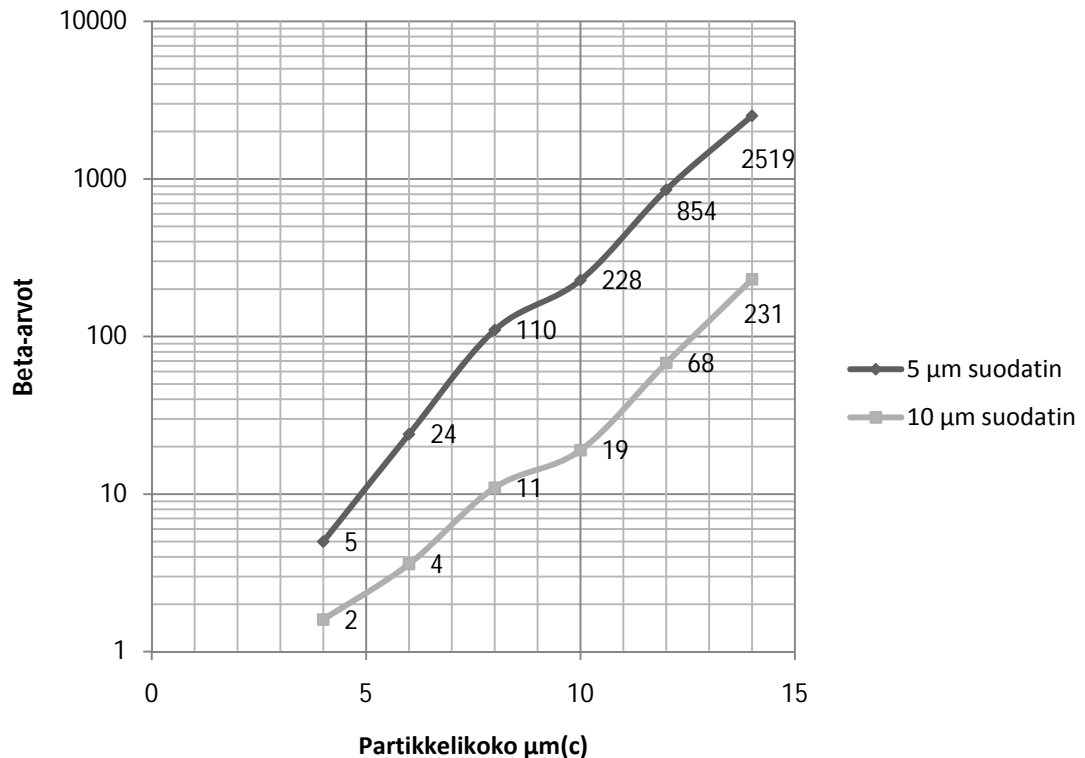
**Taulukko 4.6.** Suodatustehokkuusvertailu mitatuille suodattimille.

	Suodatustehokkuus	
	5 $\mu\text{m}$ suodatin [%]	10 $\mu\text{m}$ suodatin [%]
E <sub>4</sub>	87,95	66,67
E <sub>6</sub>	98,52	92,86
E <sub>7</sub>	<b>99,50</b>	-
E <sub>8</sub>	99,81	98,61
E <sub>9</sub>	-	<b>99,50</b>
E <sub>10</sub>	-	99,72
E <sub>&gt;10</sub>	99,97	-
E <sub>&gt;14</sub>	$\approx 100$	$\approx 100$

Kymmenen mikrometrin suodattimelle tehdystä ISO CTD mittauksesta laskettiin beta-arvot mittausajanjaksolta 300 – 4800 sekuntia. Yli kymmenen mikrometrin partikkeleille beta-arvot on laskettu ylä- ja alavirran partikkelimäärien keskiarvoista laskenta-aikaväliltä. Alle kymmenen mikrometrin partikkeleille beta-arvot on laskettu eri mittausajankohtien beta-arvojen keskiarvoista. Suuremmilla partikkeleilla  $x \geq 14 \mu\text{m(c)}$  alavirran partikkelimäärät olivat lähellä nollaa lähes koko mittausaikajakson ajan ja vain yksittäiset partikkelit läpäisivät suodattimen satunnaisesti.



Kymmenen mikronin suodattimelle tehdystä FTD testipölymittauksessa beta-arvot laskettiin aikaväliltä 300 – 4800 sekuntia. Suodattimen paine-ero ja beta-arvot lähtivät nousemaan nopeasti kun järjestelmään oli syötetty n. 14 grammaa testipölyä. Testipölyllä ISO FTD mitatut suodattimet kuuluivat kokoluokkaan A ja mittauksien tarkemmat tiedot on esitetty liitteessä 3. Suodattimille laskettujen beta-arvojen keskiarvot on esitetty kuvassa 4.24.



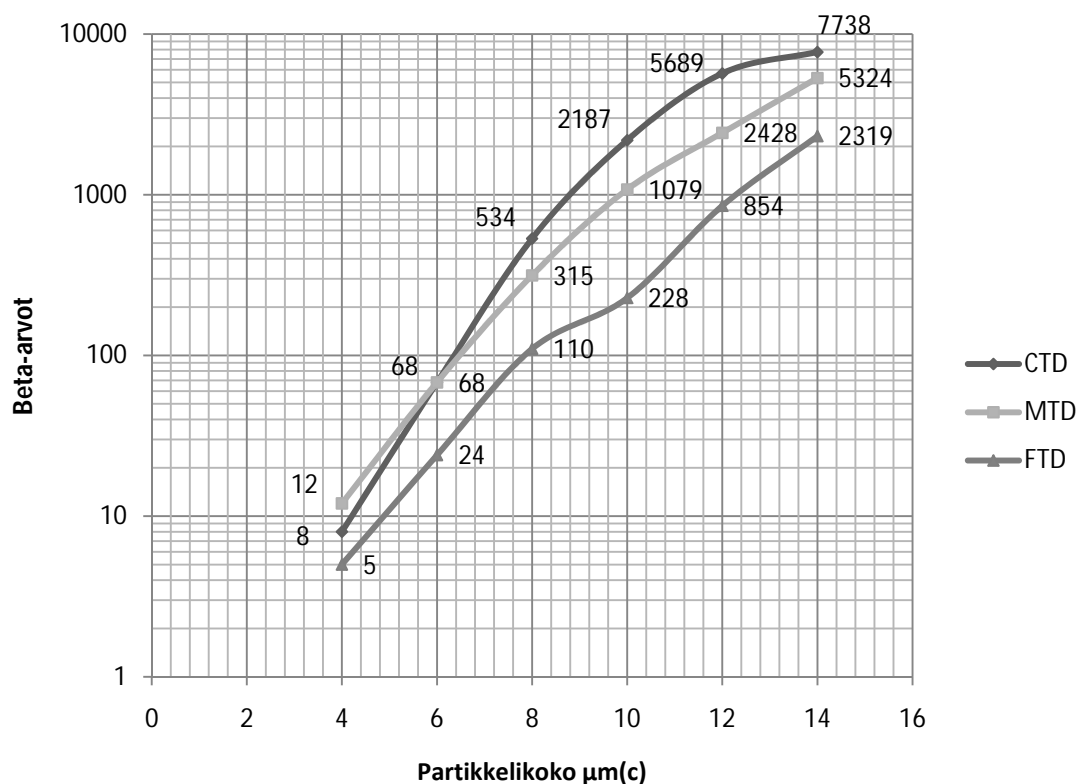
**Kuva 4.24.** Viiden ja kymmenen mikrometrin suodattimien beta-arvot testipölyllä ISO FTD

ISO FTD-testipölyllä tehdyt multipass-mittaukset tehtiin 1 mg/l ylävirran gravimetrisella tasolla molemmille suodatusasteille. Viiden mikrometrin suodattimen paine-ero nousi tasaisesti syötetyn likamäärän suhteessa aina paine-eron raja-arvoon n. 0,8 bar asti. Tähän raja-arvoon mennessä oli testijärjestelmään syötetty n. 7 grammaa FTD-testipölyä. Kriittisen pisteen jälkeen paine-ero ja beta-arvot alkoivat kasvaa nopeasti likaantumisen aiheuttaman tukkeutumisen johdosta. Viiden mikrometrin suodattimelle laskettiin beta-arvot mittausaikajaksolta 300 – 6000 sekuntia.

#### 4.5.1. Beta-arvojen tarkastelu eri testipölyille

Eri testipölyllä tehtyjen multipass- mittauksien beta-arvojen kuvaajat on esitetty kuvissa 4.25 ja 4.26. Viiden mikrometrin suodattimen mittaukset osoittivat testipölyn vaikuttavan suodattimelle mittauksien avulla saataviin beta-arvoihin. Erot beta-arvojen välillä olivat suurimmat isoilla  $x \geq 8 \mu\text{m}(c)$  partikkeleilla. Alle kahdeksan mikrometrin

partikkeleilla MTD ja CTD-testipölyillä mitatut arvot ovat lähellä toisiaan. Testipölyillä ISO FTD mitatut beta-arvot ovat jokaisessa partikkelikokoluokassa muilla testipölyillä saatuja arvoja alempana. Mitattu viiden mikrometrin suodatin poistaa isoista yli kymmenen mikrometrin partikkeleista lähes kaikki. Alavirran isojen partikkeleiden lukumäärä vaihtelee paljon ollen välillä nolla, jolloin beta-arvojen vaihtelu mittauksien aikana on suurta. Jos alavirrassa ei ole likapartikkeleita, ei suodattimelle voida laskea kaavan (9) avulla suodatussuhteen arvoa. Alavirran partikkelilukumäärän vaihtelu aiheuttaa beta-arvoihin hajontaa ja ilmiöstä johtuen suodattimelle laskettujen isojen partikkeleiden beta-arvojen keskiarvoihin on syytä suhtautua varauksella. Eri testipölyillä mitattujen viiden mikrometrin suodattimen beta-arvojen vertailu on esitetty kuvassa 4.25.

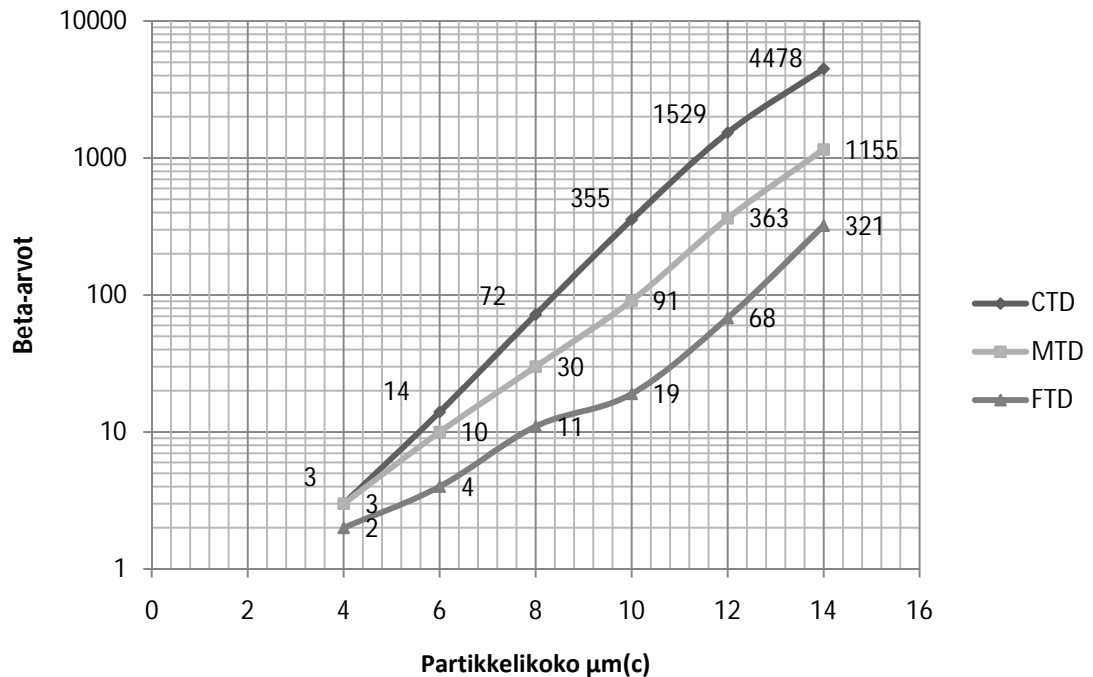


**Kuva 4.25.** Viiden mikrometrin suodattimen FTD, MTD ja CTD -testipölyillä laskettujen beta-arvojen keskiarvot.

Mittauksissa viiden mikrometrin suodattimelle määritettiin beta-arvo 200, kun partikkelikoko on n. 7  $\mu\text{m}(c)$  testipölyllä CTD ja n. 7,5  $\mu\text{m}(c)$  MTD testipölyllä sekä n. 9,5  $\mu\text{m}(c)$  testipölyllä FTD. Puhtausluokkien ISO 4406 partikkelikoolla 4  $\mu\text{m}(c)$  beta-arvot ovat välillä 5 – 12, koolla 6  $\mu\text{m}(c)$  beta-arvot ovat välillä 24 – 68 ja 14  $\mu\text{m}(c)$  partikkelikoolla 2319 – 7738.

Kymmenen mikrometrin suodattimelle beta-arvojen vaihtelu pienillä partikkeleilla on vähäistä, eri testipölyillä mitattuna. Neljän mikrometrin partikkeleiden beta-arvot ovat lähellä toisiaan, 2 – 3 välillä. Kuuden mikrometrin partikkeleilla

hajontaa tulee enemmän arvojen ollessa 4 – 14 välillä. Suurilla neljäntoista mikrometrin partikkeleilla beta-arvojen vaihtelu on isointa, arvojen ollessa välillä 321 – 4478. Kymmenen mikrometrin suodattimelle eri testipölyillä mitatut beta-arvot on esitetty kuvassa 4.25.



**Kuva 4.26.** Kymmenen mikrometrin suodattimen FTD, MTD ja CTD -testipölyillä laskettujen beta-arvojen keskiarvot.

Koko mitatulla partikkelikokojakaumalla nimellisesti kymmenen mikrometrin suodattimen beta-arvojen muutos eri testipölyjen avulla mitattuna on vähäisempää, kuin viiden mikrometrin suodattimen mittauksissa. Testipölyn partikkelikokojakauman havaittiin kuitenkin vaikuttavan mitattujen suodatusasteiden beta-arvoihin. Partikkelikoon kasvaessa erot eri testipölyillä mitattujen beta-arvojen kesken kasvavat molemmilla suodatusasteilla.

#### 4.6. Likakonsentraation vaikutus voitelujärjestelmän puhtauteen

Likamäärän vaikutuksen mittaamiseen käytettiin kuvan 4.2 testilaitteistoa. Mitatut suodattimet kuuluivat kokoluokkiin B ja C. Suodattimen läpi menevä tilavuusvirta ja voiteluaineen viskositeetti pidettiin vakiona koko mittauksen ajan. Päätilavuusvirtaa säädettiin pumpun tuottoa muuttamalla sekä suodattimelle tulevaa tilavuusvirtaa kuristamalla. Päätilavuusvirran arvoiksi säädettiin mittauksissa 120 – 125 l/min ja paineeksi ennen suodatinta 2 – 4 bar. Voiteluaineen viskositeetti pyrittiin pitämään vakiona arvossa 100 cSt jäähdyttämällä öljyä mittauksien aikana. Standardin mukaisesta multipass-testistä eroten järjestelmään ei syötetty uutta testipölyä mittauksen kuluessa.

Voiteluaineeseen punnittiin ennalta määritetty testipölymäärä ja testipölyn annettiin sekoittua järjestelmään erillisen sekoituskierron avulla. Voiteluaine suodatettiin erillisen puhdistuspiirin avulla ennen jokaista mittausta ja testipölyn lisäämistä sekä järjestelmän alkupuhtaus varmistettiin mittaamalla. Alkupuhtauden raja-arvoiksi valittiin ISO 4406 luokat 18/10/0 viiden mikrometrin suodattimen mittauksissa ja 19/12/0 kymmenen mikrometrin suodattimen mittauksissa, lisäksi suodattimen paine-eroa mitattiin sen ylä- ja alavirrasta. Partikkelimäärien ja puhtausluokkien mittausratkaisina suodattimen ylä- ja alavirrassa toimivat Parker LCM20 partikkelilaskurit, joiden tekniset tiedot on esitetty liitteessä 8. Laitteiden kalibrointi tarkistettiin multipass- testipenkissä testipölyllä ISO MTD. Kalibroinnin tulokset on esitetty liitteessä 4. Samoja laskureita käytettiin lisäksi myöhemmin suodattimille tehdyissä singlepass-mittauksissa, jotka on esitelty luvussa 4.6.3.

#### 4.6.1. Likakonsentraation mittaukset 5 µm suodattimelle

Ensimmäisessä lähtötason likamäärän vaikutuksen mittauksessa järjestelmään lisättiin kolme grammaa ISO MTD testipölyä ja mitattu suodatusaste oli viisi mikrometriä. Voiteluainetta oli säiliössä 1000 litraa ja suodattimen läpi menevä tilavuusvirta pidettiin vakiona 123 l/min ja järjestelmän paine n. 4 bar arvossa. Erilaisten likamäärämittausten tarkoitus oli selvittää suodattimen kyky puhdistaa järjestelmä vaadittuun puhtaustasoon sekä mitata suodattimelle laskettujen beta-arvojen kehitystä mittausten kuluessa. Mitatut puhtausluokat ja viiden mikrometrin suodattimen mittaushetken beta-arvot eri lähtötason likamäärille on esitetty taulukoissa 4.4. ja 4.5. Suodattimelle lasketut beta-arvot on pyöristetty kokonaisluvun tarkkuuteen.

**Taulukko 4.4.** Kolmen gramman likakonsentraation vaikutus viiden mikrometrin suodattimella saavutettavaan puhtaustasoon.

Aika [min]	Ylävirran puhtausluokat ja partikkelilukumäärät [kpl/ml]		Alavirran puhtausluokat ja partikkelilukumäärät [kpl/ml]		Hetkelliset Beta-arvot
0	20/17/14	9107 1284 92	19/13/5	3636 56 0,21	$\beta_4 = 2$ $\beta_6 = 23$ $\beta_{14} = 438$
15	20/15/11	5493 186 13	19/12/4	3113 29 0,14	$\beta_4 = 2$ $\beta_6 = 6$ $\beta_{14} = 93$
30	20/13/9	5382 66 3,35	19/12/5	2756 21 0,21	$\beta_4 = 2$ $\beta_6 = 3$ $\beta_{14} = 16$
60	20/15/11	5493 186 13	19/12/3	2696 23 0,07	$\beta_4 = 2$ $\beta_6 = 8$ $\beta_{14} = 185$
80	19/12/7	4944 29 1,28	19/11/0	2519 13 0	$\beta_4 = 2$ $\beta_6 = 2$ $\beta_{14} \geq 1000$

**Taulukko 4.5.** Yhdeksän gramman likakonsentraation vaikutus viiden mikrometrin suodattimella saavutettavaan puhtaustasoon.

Aika [min]	Ylävirran puhtausluokat ja partikkelilukumäärät [kpl/ml]		Alavirran puhtausluokat ja partikkelilukumäärät [kpl/ml]		Hetkelliset Beta-arvot
0	21/20/16	19145 6291 461	19/14/5	2831 103 0,42	$\beta_4 = 7$ $\beta_6 = 61$ $\beta_{14} = 1097$
15	20/17/13	6444 987 61	19/14/5	2602 85 0,35	$\beta_4 = 2$ $\beta_6 = 12$ $\beta_{14} = 174$
30	19/15/11	3900 224 14	18/13/3	2195 58 0,07	$\beta_4 = 2$ $\beta_6 = 4$ $\beta_{14} = 200$
60	19/10/3	2710 9 0,07	18/9/0	1385 4,28 0	$\beta_4 = 2$ $\beta_6 = 2$ $\beta_{14} \geq 1000$
120	18/10/5	2489 9 0,21	18/9/0	1302 4 0	$\beta_4 = 2$ $\beta_6 = 2$ $\beta_{14} \geq 1000$

Mittauksia jatkettiin niin kauan kunnes lähtötason puhtausluokat 18/9/0 jälleen saavutettiin mitatun suodattimen avulla. Tämä tapahtui viiden mikrometrin suodattimella kolmen gramman mittauksessa noin 90 minuutin kuluttua mittauksen aloittamisesta. Yhdeksän gramman likakonsentraation mittauksessa puhtausluokkatavoite saavutettiin noin 120 minuutin kuluttua mittauksen aloittamisesta. Muiden mitattujen likakonsentraatioiden mittaustulokset on esitetty liitteessä 10. Kolmen gramman likakonsentraation mittauksessa järjestelmän puhtaus parani suodattimen ylävirrassa varsin hitaasti. Puhtausluokkien avulla järjestelmän likakonsentraatiota tarkasteltaessa havaitaan, että järjestelmän puhtausluokka ei juuri muutu, vaikka voiteluainetta on kierrätetty suodattimen läpi varsin pitkään, jopa yli tunnin ajan. Partikkelilukumääristä kuitenkin nähdään, että suodatin poistaa voiteluaineesta lähes kaikki suuret partikkelit sekä pienistä neljän mikrometrin partikkeleista tasaisesti keskimäärin noin puolet mittauksen kuluessa.

Yhdeksän gramman lähtötason likakonsentraatiolla suodattimen kaikkien partikkelikokojen beta-arvot kasvavat mittauksen alussa. Suodattimen alavirtaan pääsee lisäksi vähemmän partikkeleita, kuin alhaisemman kolmen gramman mittauksessa. Kaikki likakonsentraation vaikutuksen mittaukset tehtiin valituille suodatusasteille multipass-testillä määritettyihin normaalitoiminnan rajapaine-eroihin saakka. Syötetyt likakonsentraatiot olivat paine-eron tarkastelua silmällä pitäen alhaiset, jolloin yksittäisen mittauksen aikana suodattimen paine-ero ei noussut normaalitoiminta-alueen yläpuolelle.

Lähtötason likakonsentraation nähdään vaikuttavan mitatun suodattimen kykyyn poistaa likaa voiteluaineesta. Ensimmäisessä 3 mg/l lähtötason mittauksessa alkupuhtausluokista 20/17/4 viiden mikrometrin suodatin saavuttaa keskimäärin alavirran puhtauden 19/13/5. Järjestelmän puhtauden parantuessa vähitellen mittauksen kuluessa pienenevät suodattimen  $\beta_6$ - ja  $\beta_{14}$ -arvot. Pienien partikkeleiden  $x \geq 4 \mu\text{m}(c)$  beta-arvo pysyy koko mittauksen ajan lähes muuttumattomana arvossa 2. Suuremmilla

lähtötason likakonsentraatioilla 6 ja 9 mg/l suodattimen lähtötason beta-arvot ovat korkeammat ja puhtausluokka muuttuu 6 mg/l gravimetrinen tason mittauksessa luokasta 21/19/15 luokkaan 19/14/5 sekä 9 mg/l lähtötason mittauksessa luokasta 21/20/16 suodattimen alavirrassa luokkaan 19/14/5.

Järjestelmän puhtauden saavutettua tason 18/9/0 ei viiden mikrometrin suodatin enää poistanut jäljellä olevia likapartikkeleita, vaan ne jäivät kiertämään järjestelmään. Puhtausvaatimusten saavuttamiseen kulunut aika vaihteli mittauksien välillä. Suuremman likamäärän 9 mg/l mittauksessa vaadittu järjestelmän puhtaus saavutettiin noin 120 minuutin kuluttua mittauksen aloittamisesta, kun alhaisemman 3 mg/l mittauksessa vaadittu puhtaus saavutettiin noin 90 minuutin kuluttua. Likakonsentraation vaikutuksen lisäksi syitä ilmiöön voi olla useita. Mittausten perusteella vaikuttavia tekijöitä ovat ainakin suodattimen elinkaaren vaihe, suodattimen läpi menevä tilavuusvirta ja käytettävän voiteluaineen viskositeetti sekä näiden muutokset.

#### 4.6.2. Likakonsentraation mittaukset 10 µm suodattimelle

Lähtötason likakonsentraation vaikutuksen mittaukset tehtiin viiden mikrometrin suodattimien lisäksi kymmenen mikrometrin suodattimille. Suodattimien kokoluokka, järjestelmän päätilavuusvirta ja paine sekä muut suodatustehokkuuteen vaikuttavat tekijät pidettiin samoina kuin viiden mikrometrin suodattimen mittauksissa. Suodattimien ylä- ja alavirrasta mitatut partikkelimäärät sekä puhtausluokat eri lähtötason likakonsentraatioista mittauksien kuluessa on esitetty taulukoissa 4.6. ja 4.7. Lisäksi suodattimelle tehtyjen 3 ja 6 gramman lähtötason likakonsentraatioiden mittaustulokset on esitetty liitteessä 10. Kymmenen mikrometrin suodattimen mittauksissa tavoitelluiksi lähtötason puhtaudeksi testipölyn lisäämisen jälkeen valittiin puhtaustaso 19/12/0.

**Taulukko 4.6.** Yhden gramman likakonsentraation vaikutus kymmenen mikrometrin suodattimella saavutettavaan puhtaustasoon.

Aika [min]	Ylävirran puhtausluokat ja partikkelilukumäärät [kpl/ml]		Alavirran puhtausluokat ja partikkelilukumäärät [kpl/ml]		Hetkelliset Beta-arvot
0	20/14/11	5931 114 11	19/13/7	3229 50 1,28	$\beta_4 = 2$ $\beta_6 = 2$ $\beta_{14} = 9$
10	20/14/11	5543 85 5,64	19/12/5	2914 38 0,42	$\beta_4 = 2$ $\beta_6 = 2$ $\beta_{14} = 13$
15	20/13/9	5421 67 3,14	19/12/3	2897 35 0,14	$\beta_4 = 2$ $\beta_6 = 2$ $\beta_{14} = 22$
20	20/13/8	5378 61 2,2	19/12/3	2839 35 0,14	$\beta_4 = 2$ $\beta_6 = 2$ $\beta_{14} = 16$
30	20/13/7	5332 53 1,28	19/12/0	2832 31 0	$\beta_4 = 2$ $\beta_6 = 2$ $\beta_{14} \geq 1000$
60	20/13/6	5200 47 0,35	19/12/0	2760 27 0	$\beta_4 = 2$ $\beta_6 = 2$ $\beta_{14} \geq 1000$

**Taulukko 4.7.** Yhdeksän gramman likakonsentraation vaikutus kymmenen mikrometrin suodattimella saavutettavaan puhtaustasoon.

Aika [min]	Ylävirran puhtausluokat ja partikkelilukumäärät [kpl/ml]		Alavirran puhtausluokat ja partikkelilukumäärät [kpl/ml]		Hetkelliset Beta-arvot
0	21/19/15	14163 3704 241	19/15/5	4487 209 0,35	$\beta_4 = 3$ $\beta_6 = 18$ $\beta_{14} = 689$
5	21/19/15	16705 4458 305	20/16/8	5600 349 1,42	$\beta_4 = 3$ $\beta_6 = 13$ $\beta_{14} = 215$
30	20/17/12	8490 766 35,42	19/14/6	4055 117 0,5	$\beta_4 = 2$ $\beta_6 = 7$ $\beta_{14} = 71$
50	20/14/9	6300 156 3,71	19/13/5	3343 54 0,21	$\beta_4 = 2$ $\beta_6 = 3$ $\beta_{14} = 18$
80	20/14/7	5 50 97 1,28	19/13/3	3143 41 0,07	$\beta_4 = 2$ $\beta_6 = 2$ $\beta_{14} = 18$
120	20/14/6	5826 98 1,21	19/13/4	3225 51 0,14	$\beta_4 = 2$ $\beta_6 = 2$ $\beta_{14} = 9$
180	19/12/6	4582 32 1,01	19/12/0	2802 28 0	$\beta_4 = 1,6$ $\beta_6 = 1,1$ $\beta_{14} \geq 1000$

Ennen testipölyn lisäämistä järjestelmä oli puhdistettu tasoon 18/8/0. Kuten taulukosta 4.7 nähdään, jo yhden MTD-testipölygramman lisääminen tuhannen litran voiteluainemäärään nosti järjestelmän puhtaustason arvoihin 20/14/11. Puhtausluokkien avulla tarkasteltuna kymmenen mikrometrin suodatin saavutti alavirran puhtauden 19/12/5 noin 10 minuutin kuluttua mittauksen aloittamisesta. Tämän jälkeen alavirran partikkelimäärä pysyi tasaisena kaikissa puhtausluokkien partikkelikokoluokissa. Suurilla 14 mikrometrin ja tätä suuremmilla partikkelikokoluokilla alavirran partikkelimäärä oli nolla n. 30 minuutin kuluttua mittauksen aloittamisesta. Tämän jälkeen vain yksittäiset isot partikkelit läpäisivät suodattimen satunnaisesti.

Suodattimen ylävirran puhtaus pysyi pitkään tasaisena puhtausluokkien avulla mitattuna. Partikkelimäärät laskivat hitaasti suodatuksen edetessä. Lähtötilanteessa testipölyn lisäämisen jälkeen partikkelilukumäärät olivat n. 6000 kpl/ml yli neljän mikrometrin ja tätä suurempia partikkeleita, 110 kpl/ml kuuden ja tätä suurempia partikkeleita sekä 11 kpl/ml neljäntoista mikrometrin ja tätä suurempia partikkeleita. Kun mittausta oli kulunut 60 minuuttia, olivat ylävirran partikkelilukumäärät samoilla partikkelikokoluokilla arvoissa 5200 kpl/ml, 47 kpl/ml ja 0,35 kpl/ml. Tavoitepuhtausluokat 19/12/0 saavutettiin vasta noin kahden tunnin kuluttua mittauksen aloittamisesta.

Suuremmalla lähtötason likakonsentraatiolla 9 mg/l ylävirran puhtausluokkien lähtötasot olivat 21/19/15 ja suodattimen alavirrassa puhtausluokat olivat tällöin 19/15/5. Mittauksen kuluessa ylävirran puhtaustaso parani hitaasti, kuten alemman lähtötilanteen mittauksessa. Kolmen tunnin kuluttua mittauksen aloittamisesta ylävirran puhtaustaso oli saavuttanut luokat 19/12/6 ja alavirrassa vallitsi samalla puhtaustaso 19/12/0. Tuloksista nähdään, että mitattu suodatin poistaa ylävirran pienistä  $x \geq 4 \mu\text{m(c)}$  partikkeleista mittausaikavälin beta-arvojen keskiarvon avulla laskettuna noin 50 %. Suuremmilla partikkeleilla beta-arvojen kehitys on nopeampaa mittauksen

edetessä. Kuuden mikrometrin ja tätä suurempien partikkeleiden beta-arvo nousee mittauksen alussa arvoon 18 ja laskee mittauksen kuluessa lähelle arvoa 2. Mitatun suodattimen alavirta sisälsi koko mittauksen ajan jonkin verran kuuden mikrometrin ja tätä suurempia partikkeleita. Partikkelikokoluokka 14 mikrometriä ja tätä suuremmat partikkelit suodattuivat järjestelmästä kokonaan noin 180 minuutin kuluttua mittauksen aloittamisesta. Tätä ennen järjestelmä sisälsi aina jonkin verran myös isoja 14  $\mu\text{m(c)}$  partikkeleita. Mittaustuloksista nähdään, että kymmenen mikrometrin suodattimelta kuluu noin kolme tuntia ennen kuin järjestelmän puhtaustaso on vaatimusten mukaisella tasolla. Aika on pitkä käytettyyn tilavuusvirtaan, lähtötason likamäärään ja järjestelmän voiteluainemäärään nähden.

Mittausjärjestelmän kokonaispuhtaus suodattimen ylävirrassa paranee hitaasti, kun suodatusasteelle ominainen puhtaustaso on saavutettu. Ominaisen puhtaustason jälkeen pidentämällä suodatusaikaa saavutetaan vain hyvin vähäisiä muutoksia järjestelmän puhtauteen, tai muutoksia ei puhtaudessa enää tapahdu laisinkaan. Jos järjestelmän puhtautta haluttaisiin parantaa saavutetusta tasosta, tulisi järjestelmään asentaa hienompi suodatin. Käytännön järjestelmissä puhtaustason saavuttamiseen voi kulua merkittävästi mittauksissa saatua aikaväliä pidempi aika, johtuen likamäärän aiheuttamasta kiihtyvistä kulumisesta sekä muista kuten olosuhdetekijöiden vaikutuksesta.

Kahden mitatun suodatusasteen väliset erot saavutettavan järjestelmän puhtauden välillä olivat selkeät. Ensimmäisenä mitattu suodatusaste, viisi mikrometriä, pystyi saavuttamaan järjestelmän puhtauden 18/9/0 erilaisista lähtötason likamääristä mittauksien kuluessa ja karkeampi suodatusaste, kymmenen mikrometriä, saavutti mittauksissa puhtausluokat 19/12/0. Pienillä neljän mikrometrin partikkeleilla suodattimien välinen ero on suuri. Viiden mikrometrin suodattimen mittauksessa neljän mikrometrin ja tätä suurempien partikkelien määrä pieneni alimmillaan lähelle arvoa 1300 kpl/ml ja kymmenen mikrometrin suodattimelle vastaava luku oli n. 2600 kpl/ml.

Tiheämpi viiden mikrometrin suodatin lisäksi saavutti tavoitepuhtaustason nopeammin samasta lähtötilanteen likamäärästä kuin kymmenen mikronin suodatin. Isommilla  $x \geq 6 \mu\text{m(c)}$  ja  $x \geq 14 \mu\text{m(c)}$  partikkeleilla erot suodattimien välillä olivat pienemmät partikkelilukumäärissä mitattuna, mutta puhtausluokkien avulla verrattaessa ero oli jopa kolme puhtausluokkaa. Molemmat mitatut suodatusasteet suodattivat yli neljäntoista mikrometrin partikkelit kokonaan. Hienommalla viiden mikrometrin suodattimella isot partikkelit suodattuivat n. 80 minuutin kohdalla mittauksen aloittamisesta ja karkeammalla kymmenen mikrometrin suodattimella ne olivat suodattuneet järjestelmästä n. 150 minuutin kohdalla. Kuuden mikrometrin ja tätä suurempia partikkeleita jäi viiden mikrometrin suodattimen mittauksessa järjestelmään keskimäärin 4 kpl/ml mittauksen lopussa, kun vastaava lukema kymmenen mikronin suodattimen mittauksessa oli 25 kpl/ml. Molemmissa mittauksissa tapahtui hetkittäisiä partikkelimäärien nousuja mittauksien kuluessa. Partikkelimäärien hetkittäiset nousut suodattimen ylävirrassa voivat olla seurausta useasta eri tekijästä ja tapahtumasta. Järjestelmän putkien ja säiliön seinämiin kiinnittyneet likapartikkelit voivat esim. irrota



virtausolosuhteiden tai paineen muuttuessa ja näin aiheuttaa hetkittäisen partikkelimäärän kasvun järjestelmässä. Partikkelimäärien mittaustuloksessa esiintyy lisäksi aina jonkinlaista vaihtelua mittaus- ja laskentatarkkuudesta johtuen. Partikkelimäärien ja mittaustulosten vaihtelusta sekä virherajoista johtuen käytännön järjestelmissä epätavallisen kulumisen aiheuttaman likamäärän havaitseminen on partikkelilaskurien avulla haasteellista ja pelkkien puhtausluokkien avulla mitattaessa, varsinkin isoissa puhtausluokissa, täysin mahdotonta.

ISO MTD -testipölyllä mitattuna molempien suodatusasteiden alavirta sisälsi aina jonkin verran kuuden mikrometrin ja tätä suurempia partikkeleita. Yli neljäntoista mikrometrin partikkelit suodattuivat molemmilla suodattimilla järjestelmästä, mutta vasta useiden suodatuskertojen jälkeen. Puhtausluokkien tarkastelussa merkitsevin vaatimusten saavuttamisen kannalta oli  $x \geq 4 \mu\text{m(c)}$  partikkelien lukumäärä. Tällä partikkelikoolla kymmenen mikrometrin suodattimen mittauksessa puhtausluokkaa 18 ei saavutettu koko mittausajanjaksolla lainkaan ja viiden mikrometrin suodattimen mittauksissa luokka saavutettiin vasta useiden suodatuskertojen jälkeen. Muilla puhtausluokkien partikkelikokoluokilla järjestelmän puhtausvaatimukset saavutettiin korkeiden suodatussuhteen arvojen vuoksi nopeammin molemmilla mitatuilla suodatusasteilla.

#### **4.6.3. Singlepass-mittaukset ja viskositeetin vaikutus**

Singlepass- eli kertaläpäisy mittauksilla oli tarkoitus selvittää kuinka hyvin suodattimet pystyvät poistamaan likapartikkeleita järjestelmästä kertaläpäisyllä voiteluaineen viskositeetin muuttuessa. Nimensä mukaisesti mittauksessa suodatettua voiteluainetta ei palautettu lähtösäiliöön vaan se ohjattiin erilliseen varastosäiliöön kerran suodattimen läpi kuljettuaan. Singlepass- mittauksissa järjestelmän partikkelimäärät mitattiin suodattimen ylä- ja alavirrasta. Tehdyissä mittauksissa järjestelmään ei syötetty uutta testipölyä mittauksen kuluessa, vaan järjestelmän säiliöön lisättiin testin alussa ennalta määrätty likamäärä. Viiden mikrometrin suodattimelle suoritettiin singlepass-mittaukset viskositeetin arvoilla 100, 150, 220 ja 320 cSt. Kymmenen mikrometrin suodattimen toiminta mitattiin viskositeeteilla 100 ja 320 cSt. Valitut viskositeetti-arvot ovat tyypillisiä teollisuudessa käytettävälle voiteluaineelle, normaaleissa käyttöolosuhteissa.

Kuten likakonsentraation vaikutuksen mittauksissa myös singlepass-mittauksissa käytettiin kuvan 4.2. mittauslaitteistoa. Mitatut suodatusasteet ja suodattimien kokoluokat olivat myös samat kuin likamäärän vaikutuksen mittauksissa. Tilavuusvirtaa suodattimen läpi pienennettiin hieman arvoon 35 l/min, jotta käytettävissä oleva testiaika saataisiin pidemmäksi. Testitilavuusvirta pyrittiin pitämään vakiona kaikissa mittauksissa pumpun tuottoa säätämällä ja päättilavuusvirtaa kuristamalla. Järjestelmän paine säädettiin tilavuusvirtaa kuristamalla 3 – 5 bar lukemiin. Ennen varsinaisten singlepass-mittauksien aloittamista ja testipölyn lisäämistä tarkistettiin järjestelmän alkupuhtaus mittaamalla. Järjestelmän puhdistus

alkupuhtauteen toteutettiin erillisen suodatuskierron avulla. Viiden mikrometrin suodattimen singlepass-mittauksen partikkelilukumäärät, puhtausluokat ja hetkelliset beta-arvot on esitetty taulukossa 4.8.

**Taulukko 4.8.** Singlepass-mittaus 5  $\mu\text{m}$  suodattimelle arvoilla 100 cSt ja 35 l/min.

Aika [min]	Ylävirran puhtausluokat ja partikkelilukumäärät [kpl/ml]		Alavirran puhtausluokat ja partikkelilukumäärät [kpl/ml]		Hetkelliset Beta-arvot
0	20/16/13	5048 638 51	18/11/0	1605 17 0	$\beta_4 = 3$ $\beta_6 = 37$ $\beta_{14} \geq 1000$
4	20/16/13	5039 634 47	18/11/3	1620 18 0,14	$\beta_4 = 3$ $\beta_6 = 35$ $\beta_{14} = 336$
8	20/16/13	012 637 46	18/11/2	1588 177 0,07	$\beta_4 = 3$ $\beta_6 = 4$ $\beta_{14} = 657$
10	20/16/13	5037 631 47	18/11/2	1632 19 0,07	$\beta_4 = 3$ $\beta_6 = 33$ $\beta_{14} = 671$
12	20/17/13	5075 646 48	18/12/0	1637 20 0	$\beta_4 = 3$ $\beta_6 = 32$ $\beta_{14} \geq 1000$
14	20/17/13	5096 649 42	18/12/0	1653 20 0	$\beta_4 = 3$ $\beta_6 = 32$ $\beta_{14} \geq 1000$
16	20/17/13	5049 652 50	18/12/0	1623 22 0	$\beta_4 = 3$ $\beta_6 = 29$ $\beta_{14} \geq 1000$

Singlepass- mittauksissa suodattimen ylä- ja alavirran puhtaus mitattiin n. 4 minuutin välein alun 6 minuutin järjestelmän huuhtoutumisen ja likatasapainon tasaantumisen jälkeen. Viiden mikrometrin ja kokoluokkaan C kuuluvan suodattimen läpi ajettiin kertasuodatus periaatteella 35 l/min tilavuusvirta. Tilavuusvirta laskettiin suodatinkokoluokan perusteella niin, että se vastasi kokoluokan D (Wind) suodattimen 150 l/min normaalitoiminnan tilavuusvirtaa, materiaali- ja kokotiedoista laskettuna. Koska tilavuusvirtaa ei palautettu järjestelmän pääsäiliöön, alhaisempi tilavuusvirta lisäksi mahdollisti pidemmän singlepass-mittausajan tuhannen litran pääjärjestelmän voiteluainemäärällä.

Voiteluaineen viskositeetti pidettiin valituissa arvoissa jäähdyttämällä sitä tarpeen vaatiessa. Taulukossa 4.4. on merkittynä singlepass- mittauksen aikana saadut partikkelimäärät, puhtausluokat ja suodattimelle lasketut mittaushetken beta-arvot. Mittausjärjestelmän alkupuhtaus ennen testipölyn lisäämistä oli ISO 4406 luokituksen mukaan 19/10/0. Tämän jälkeen järjestelmään lisättiin yksi gramma ISO MTD testipölyä ja lian annettiin sekoittua erillisen säiliökierron avulla järjestelmään n. 15 minuuttia. Lian syötön jälkeen mittausjärjestelmän puhtausluokiksi mitattiin 20/16/13, 100 cSt mittauksessa. Suodattimelle mitattu kertalapäisyn beta-arvo  $x \geq 4$  mikrometrin partikkeleille pysyi lähes muuttumattomana mittauksen kuluessa ( $\beta_4 = 3$ ). Kuuden mikrometrin ja tätä suurempien partikkeleiden beta-arvo vaihteli arvojen 37 ja 29 välillä, käyden 8 minuutin kohdalla alimmillaan arvossa 4. Neljäntoista mikrometrin ja

tätä suurempien partikkeleiden beta-arvo oli mittauksen alussa ja lopussa  $\beta_{14} \geq 1000$ . Mittauksen keskellä useamman suuren partikkelin läpäistyä suodattimen  $\beta_{14}$ -arvo kävi alhaisimmillaan lukemassa 336.

Singlepass-mittauksien kestoja rajoitti järjestelmän tilavuus sekä käytettävä tilavuusvirta. Mittausjärjestelmän säiliötä ei voitu ajaa aivan tyhjäksi, jotta pumppujen imulinjat pysyisivät voiteluainepinnan alapuolella. Valitulla mittaustilavuusvirralla ja 1000 litran voiteluainemäärällä mittausten kestoksi saatiin n. 18 minuuttia. Jokaisen mittauksen jälkeen voiteluaine oli suodatettava ja pumpattava takaisin mittausrjestelmään ennen uuden mittauksen aloittamista. Puhtausluokkatarkastelussa nimellisesti viiden mikrometrin suodatin saavutti singlepass- mittauksessa lähtötason 20/16/13 – 20/17/13 puhtausluokista alavirran puhtauden 18/11/0 – 18/11/3, tilavuusvirralla 35 l/min ja voiteluaineen viskositeetilla 100 cSt.

Korkeammalla voiteluaineen viskositeetilla 320 cSt ja samalla järjestelmän alkupuhtauden arvolla 20/17/15 suodattimen beta-arvot laskivat jokaisella partikkelikoolla hieman. Puhtausluokissa tarkasteltuna tämä tarkoitti alavirran puhtausluokkia 19/14/8 – 19/14/3, tilavuusvirralla 35 l/min. Alkupuhtauden varmistamisesta ja yhtä suuresta likamäärän lisäyksestä huolimatta lähtötason partikkelimäärissä oli eroa eri mittausten välillä. Korkeamman 320 cSt viskositeetin mittauksessa partikkelimäärät olivat suuremmat suodattimen ylävirrassa, kuin alhaisemman 100 cSt mittauksessa jo mittauksen alussa (taulukko 4.9).

**Taulukko 4.9.** Singlepass-mittaus 5  $\mu$ m suodattimelle arvoilla 320 cSt ja 35 l/min.

Aika [min]	Ylävirran puhtausluokat ja partikkelimäärät [kpl/ml]		Alavirran puhtausluokat ja partikkelimäärät [kpl/ml]		Hetkelliset Beta-arvot
0	20/17/13	7941 861 76	19/14/8	4249 149 1,35	$\beta_4 = 2$ $\beta_6 = 6$ $\beta_{14} = 56$
4	20/17/13	8095 924 78	19/14/8	3842 108 1,42	$\beta_4 = 2$ $\beta_6 = 8$ $\beta_{14} = 55$
8	20/17/14	8251 979 87	19/14/7	3822 107 1,07	$\beta_4 = 2$ $\beta_6 = 9$ $\beta_{14} = 81$
10	20/17/14	7968 889 81	19/14/6	3822 108 0,64	$\beta_4 = 2$ $\beta_6 = 8$ $\beta_{14} = 126$
12	20/17/13	7953 850 71	19/14/3	3793 101 0,07	$\beta_4 = 2$ $\beta_6 = 8$ $\beta_{14} \geq 1000$
14	20/17/13	7799 799 67	19/14/7	3766 94 0,71	$\beta_4 = 2$ $\beta_6 = 9$ $\beta_{14} = 94$
16	20/17/13	7678 748 60	19/14/6	3728 97 0,64	$\beta_4 = 2$ $\beta_6 = 8$ $\beta_{14} = 94$

Suodattimelle lasketut mittaushetken beta-arvot laskivat kaikilla puhtausluokkien partikkelikokoluokilla 320 cSt mittauksessa verrattuna 100 cSt viskositeetin

mittaukseen. Neljän mikrometrin partikkeleiden beta-arvo muuttui arvosta 3 arvoon 2. Beta-arvon lasku tarkoitti puhtausluokkatarkastelussa yhden puhtausluokan muutosta ylöspäin suodattimen alavirrassa. Kuuden mikrometrin ja tätä suurempien partikkeleiden beta-arvon keskiarvo putosi alle 10, kun se alhaisemman 100 cSt mittauksessa oli suodattimelle vielä yli 30. Kuuden mikrometrin ja tätä suurempien partikkeleiden puhtausluokassa tämä merkitsi 2 – 3 puhtausluokan nousua suodattimen alavirrassa. Isoilla yli neljäntoista mikrometrin partikkeleilla muutos beta-arvojen suhteen mittauksien välillä oli suurin. Alhaisemmalla 100 cSt voiteluaineen viskositeetilla mitatun suodattimen  $\beta_{14}$ -arvon keskiarvo oli mittauksen ajalta yli 1000, kun se korkeammalla 320 cSt viskositeetilla oli vain n. 200. Puhtausluokissa tämä tarkoitti 3 – 5 luokan eroa mittauksen välillä. Eri viskositeeteilla suodattimen ylä- ja alavirrasta mitattujen puhtausluokkien arvot sekä partikkelilukumäärät ovat esillä liitteissä 6 ja 7. Partikkelilukumäärät ovat mittausajanjakson keskiarvoja.

Mittauksissa käytettyjen partikkelilaskureiden mittausaikaväli oli 2 minuuttia. Partikkelilukumäärät vaihtelivat yksittäisen mittauksen sisällä varsinkin suurilla partikkeleilla, jopa useiden puhtausluokkien verran. Suuresta vaihtelusta johtuen suodattimelle lasketut beta-arvot muuttuivat mittauksen kuluessa. Kuten likakonsentraation vaikutuksen mittauksissa osoitettiin, ylävirran likakonsentraatio vaikuttaa suodattimen beta-arvoihin ja tätä kautta järjestelmän puhtauteen. Suodattimen alavirran puhtauteen singlepass-mittauksissa vaikuttivat voiteluaineen viskositeetti ja ylävirran likamäärä yhdessä. Koska eri viskositeettien singlepass-mittauksissa ei lähtötilanteen likakonsentraatiota saatu täysin vakioksi, on kahden eri tekijän vaikutusta vaikea erottaa toisistaan. Vaikka puhtausluokissa mitattuna lähtötilanteen puhtaus olikin lähes identtinen, partikkelilukumäärissä erot esim. pienien neljän mikrometrin partikkelien kohdalla saattoivat olla jopa tuhansia partikkeleita millilitrassa. Näin suurien partikkelilukumäärien muutoksen todettiin aikaisemmissa mittauksissa vaikuttavan suodattimella saavutettavaan alavirran puhtauteen.

Kymmenen mikrometrin suodattimella viskositeetin nousun aiheuttamat puhtausluokkien muutokset eivät olleet yhtä suuria kuin viiden mikrometrin suodattimen singlepass-mittauksissa. Keskimäärin puhtausluokkien muutokset olivat noin puoli puhtausluokkaa neljän ja tätä suuremmilla partikkeleilla, noin yksi luokka kuuden ja tätä suuremmilla partikkeleilla sekä neljäntoista ja tätä suuremmilla partikkeleilla suurimman mittauksen välinen ero oli noin 4 puhtausluokkaa.

## 5. SUODATUSTEHOKKUUDEN LASKELMAT

Voitelujärjestelmän puhtausvaatimuksen määrittelee yleensä sen likaherkimmät komponentit. Vaatimuksista ei kuitenkaan käy ilmi miten nopeasti ja millaisista lähtötason likamääristä vaadittu puhtaustaso on suodatuksen avulla saavutettava. Mittaukset osoittivat käyttöolosuhteiden ja järjestelmän erilaisten ominaisuuksien vaikuttavan suodattimella saavutettavaan puhtaustasoon merkittävästi. Mittauksissa lisäksi havaittiin, että järjestelmän sisältämä partikkelimäärä voi hetkittäin muuttua nopeasti ja puhtausvaatimukset voidaan saavuttaa vasta hyvin pitkän aikavälin kuluttua suodatuksen edetessä. Laskennan avulla suodattimille voidaan määrittää raja-arvot, joilla puhtausvaatimusta ei valitulla suodatusratkaisulla enää saavuteta.

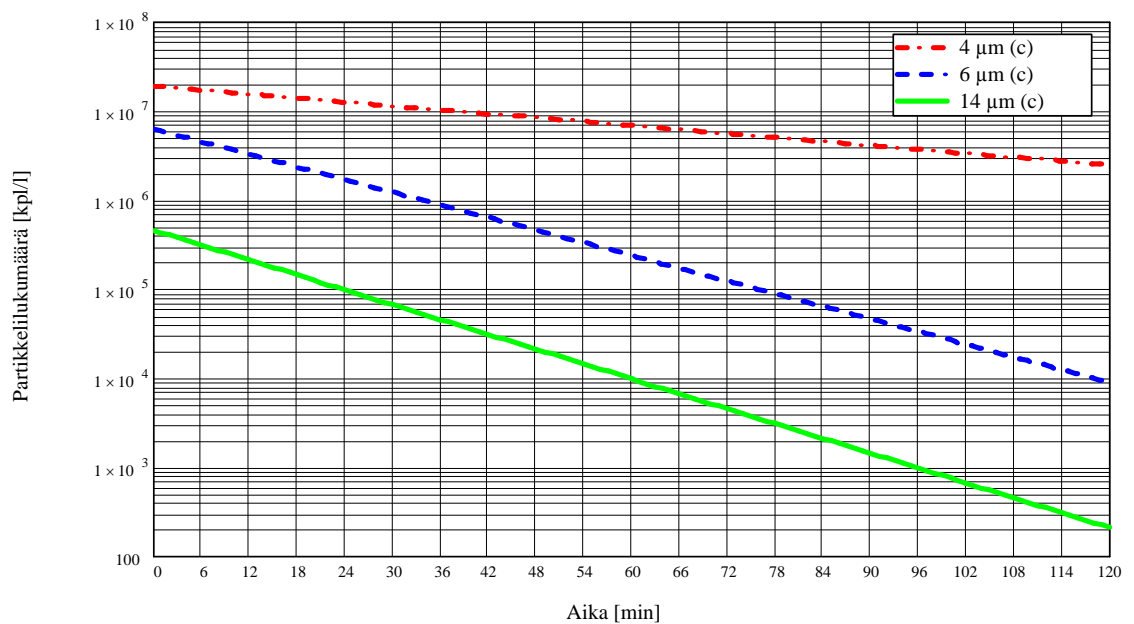
Voitelujärjestelmien puhtausvaatimukset vaihtelevat yleisesti ISO 4406 puhtausluokkien avulla ilmoitettuna välillä 13/11/9 – 19/17/14. Laskelmien avulla on tarkoitus selvittää, millaisilla suodattimen beta-arvoilla puhtausvaatimukset saavutetaan erilaisista lähtötason likakonsentraatioista. Laskelmat lähtevät olettamuksesta, jossa suodattimen beta-arvot eivät muutu suodatustapahtuman aikana. Kuten mittaustuloksista on nähtävissä, näin ei käytännön olosuhteissa ole ja suodattimen beta-arvot vaihtelevat erilaisten tekijöiden vaikutuksesta. Yleisessä suodatusyhtälössä (13), lisäksi muut suodatukseen vaikuttavat tekijät kuten tilavuusvirta ja syötetty likamäärä oletetaan vakioiksi. Nämä olettamukset huomioon ottaen voidaan laskelmilla tehdä vain alustavia mitoitustarkasteluja ja suodattimen valinta tulee varmistaa mittauksilla tarvittavan puhtaustason varmistamiseksi. Laskelmat eivät myöskään ota kantaa suodattimen likakapasiteettiin ja sen riittävyteen.

Mitattujen suodattimien beta-arvot muuttuvat niiden käyttöiän kuluessa. Kun suodattimen likaantumisen johtuva paine-ero on riittävän suuri, alkavat beta-arvot nousta tukkeutumisen johdosta nopeasti. Mittauksilla osoitettiin, että suodattimen toimintaan vaikuttavat myös monet muut tekijät, kuten tilavuusvirran vaihtelut ja voiteluaineen viskositeetti. Erilaisten tekijöiden vaikutusten kartoittaminen vaatii laajoja mittauksia ja jokainen suodatinmateriaali sekä -koko tulisi mitata aina erikseen. Lisäksi tekijöiden vaikutus tulisi mitata niin, että muut vaikuttavat tekijät pidetään vakioina ristikkäisvaikutusten minimoimiseksi. Tekijöiden vaikutukset suodattimen toimintaan voivat olla myös hyvin lyhytaikaisia, jolloin niiden huomioiminen järjestelmän kokonaispuhtauden ja teoreettisen laskennan kannalta on haastavaa. Laskennassa eri tekijöiden vaikutuksia voidaan yrittää ottaa huomioon esim. suodatussuhteen- tai erilaisten varmuuskertoimien avulla. Todellisten vaikutusten huomioon ottamiseksi ja kertoimien määrittämiseksi, tulisi suorittaa laajoja materiaali- ja suodatinkohtaisia mittauksia vaikuttava tekijä kerrallaan.

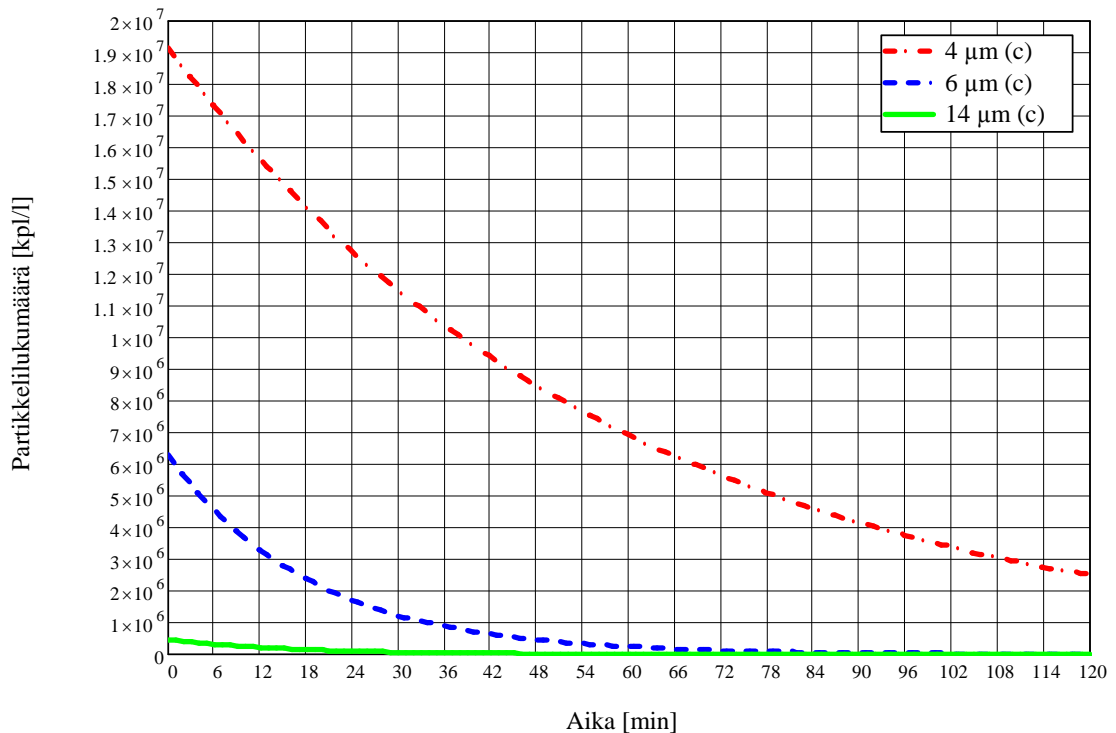
Multipass-mittaustulokset osoittavat likamäärän lisäyksen vaikuttavan suodattimen beta-arvoihin suodattimen elinkaaren lyhentyessä. Lian partikkelikokojakauman multipass-mittauksissa eri testipölyjen avulla havaittiin partikkelikokojakauman vaikuttavan suodattimelle mitattujen beta-arvojen suuruuteen ja lisäksi erilaisilla testipölyillä saadaan saman kokoluokan sekä suodatusasteen suodattimille erilaiset likakapasiteetit samaan paine-eroon asti multipass-testillä mitattaessa (liite 12). Mitatuilla suodatinmateriaaleilla ilmiö aiheuttaa beta-arvojen kasvun mittausaikajaksolta laskettuna. Mitatuilla suodattimilla todelliset normaalitoiminnan beta-arvot olivat kaikissa partikkelikokoluokissa pienemmät kuin multipass- testillä saadut beta-arvot.

## 5.1. Likakonsentraation vaikutuksen laskelmat

Likakonsentraation vaikutuksen laskennassa käytetään hyväksi viiden mikrometrin suodattimelle suoritettuja ja luvussa 4.6 esitettyjä likamäärän vaikutuksen mittaustuloksia. Tarkoituksena on selvittää suodattimen teoreettiset beta-arvot mittauksilla saaduista partikkelimääristä suodatusyhtälön (13) avulla. Lähtötilanteen likamäärät ovat laskennassa mittauksella saatujen määrien mukaiset. Järjestelmän säiliöön lisättiin ISO MTD testipölyä gravimetrisen tasoon 9 mg/l asti. Tälle Gravimetriselle tasolle saatiin lähtötilanteen partikkelimääräksi 19 145 000 kpl/l neljän mikrometrin ja tätä suurempia partikkeleita, 6 291 000 kpl/l kuuden mikrometrin ja tätä suurempia partikkeleita sekä 461 000 kpl/l neljäntoista mikrometrin ja tätä suurempia partikkeleita. Partikkelimäärät vastasivat puhtausluokkia 21/20/16. Laskennallisesti ratkaistu partikkelimäärien kehitys on esitetty kuvissa 5.1 ja 5.2.



**Kuva 5.1.** Laskettu partikkelimäärien kehitys viiden mikrometrin suodattimelle logaritmisella asteikolla, kun  $G_y = 9 \text{ mg/l}$ .

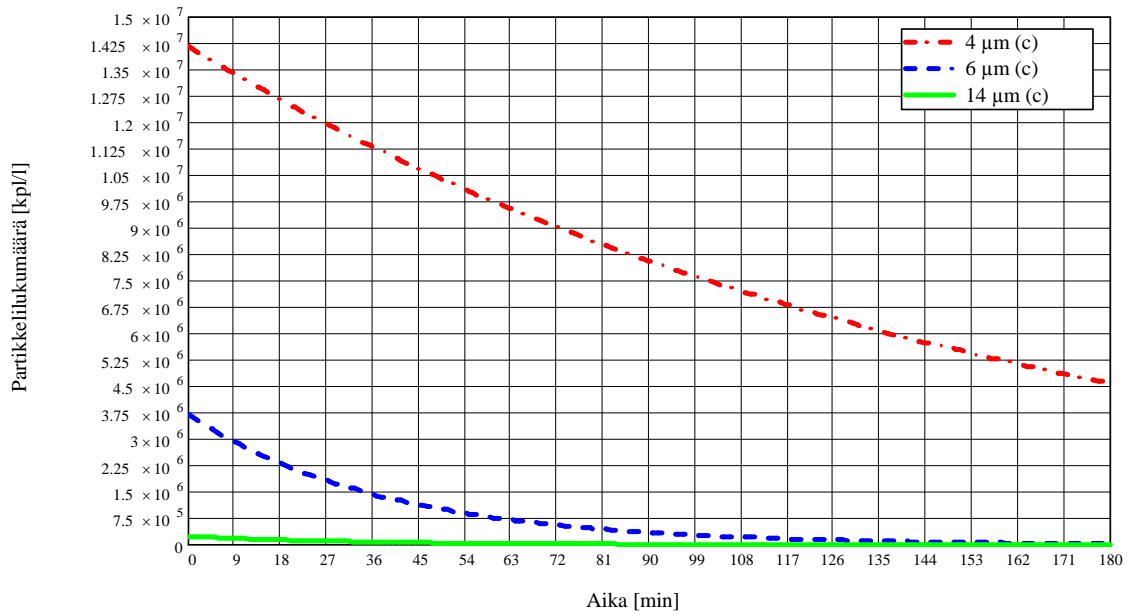


**Kuva 5.2.** Laskettu partikkelimäärien kehitys viiden mikrometrin suodattimelle lineaarisella asteikolla, kun  $G_y = 9$  mg/l.

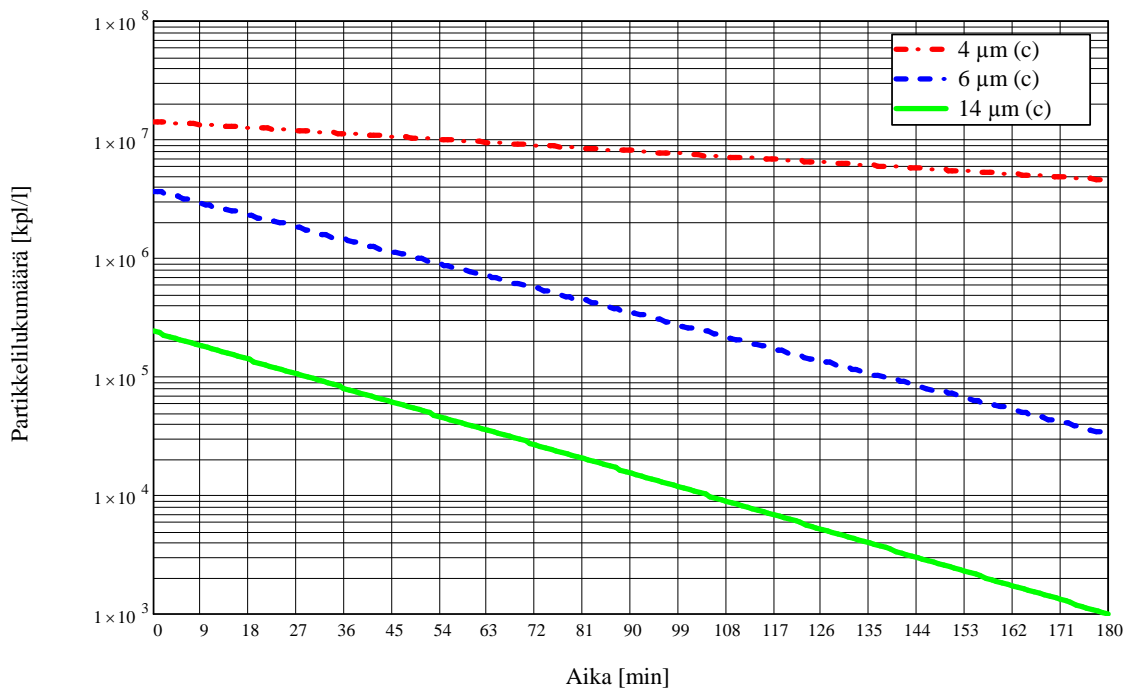
Partikkelilukumäärien kehitys on laskettu yhtälöllä (13) mittausaikavälin 0 – 120 minuuttia partikkelimääristä. Mittausjärjestelmän tilavuus oli 1000 litraa ja käytetty tilavuusvirta 120 l/min. Järjestelmän suodattimen ylävirrassa 120 minuutin jälkeen vallinneet partikkelimäärät olivat 2 489 000 kpl/l neljän mikrometrin ja tätä suurempia partikkeleita, 9 000 kpl/l kuuden mikrometrin ja tätä suurempia partikkeleita sekä 210 kpl/l neljäntoista mikrometrin ja tätä suurempia partikkeleita. ISO 4406 puhtausluokiksi muutettuna määrät vastaavat luokkia 18/10/5. Yhtälöstä (12) voidaan ratkaista suodattimen mittausaikavälin puhtausluokkien partikkelikokojen beta-arvot. Nämä olivat mitatulle viiden mikrometrin suodattimelle  $\beta_4 = 1,165$ ,  $\beta_6 = 1,834$  ja  $\beta_{14} = 2,145$  kolmen desimaalin tarkkuudella laskettuna. Yhtälöllä (12) lasketut mittausaikavälin beta-arvot ovat selvästi pienemmät kuin taulukossa 4.5 esitetyt suodattimen ylä- ja alavirrasta määritetyt hetkelliset beta-arvot sekä näistä lasketut keskiarvot.

Vastaavat laskelmat suoritettiin kymmenen mikrometrin suodattimen likamäärän  $G_y = 9$  mg/l mittauksista. Suodattimen mittauksista tulokset on esitetty taulukossa 4.8. Ylävirran lähtötilanteen partikkelilukumäärät olivat 14 163 000 kpl/l neljän mikrometrin ja tätä suurempia partikkeleita, 3 704 000 kpl/l kuuden mikrometrin ja tätä suurempia partikkeleita sekä 241 000 kpl/l neljäntoista mikrometrin ja tätä suurempia partikkeleita. Lähtötilanteen määrät vastasivat puhtausluokkia 21/19/15. Mittausaikaväli suodattimelle oli 0 – 180 minuuttia. Mittauksen lopussa 180 minuutin kuluttua partikkelimäärät olivat järjestelmässä 4 582 000 kpl/l neljän mikrometrin ja tätä suurempia partikkeleita, 32 000 kpl/l kuuden mikrometrin ja tätä suurempia

partikkeleita sekä 1010 kpl/l neljäntoista ja tätä suurempia partikkeleita. Lopussa vallinneet partikkelimäärät vastasivat puhtausluokkia 19/12/6. Partikkelimäärien kehitys on esitetty kuvissa 5.3 ja 5.4. Kuvan 5.4. partikkelilukumääräakseli on logaritminen erikokoisten partikkeleiden määräkehityksen havainnollistamiseksi.



**Kuva 5.3.** Laskettu partikkelimäärien kehitys kymmenen mikrometrin suodattimelle lineaarisella asteikolla, kun  $G_y = 9 \text{ mg/l}$ .



**Kuva 5.4.** Laskettu partikkelimäärien kehitys kymmenen mikrometrin suodattimelle logaritmisella asteikolla, kun  $G_y = 9 \text{ mg/l}$ .



Suodattimelle lasketut beta-arvot olivat  $\beta_4 = 1,055$ ,  $\beta_6 = 1,280$  ja  $\beta_{14} = 1,340$  kolmen desimaalin tarkkuudella laskettuna. Kymmenen ja viiden mikrometrin suodattimille lasketut mittausaikavälin beta-arvot pienentyvät mittausaikavälin kasvaessa. Näin havaittiin tapahtuvan myös likamäärän vaikutuksen mittauksissa (taulukot 4.6 ja 4.7).

## 5.2. Puhtausluokkalaskelmat

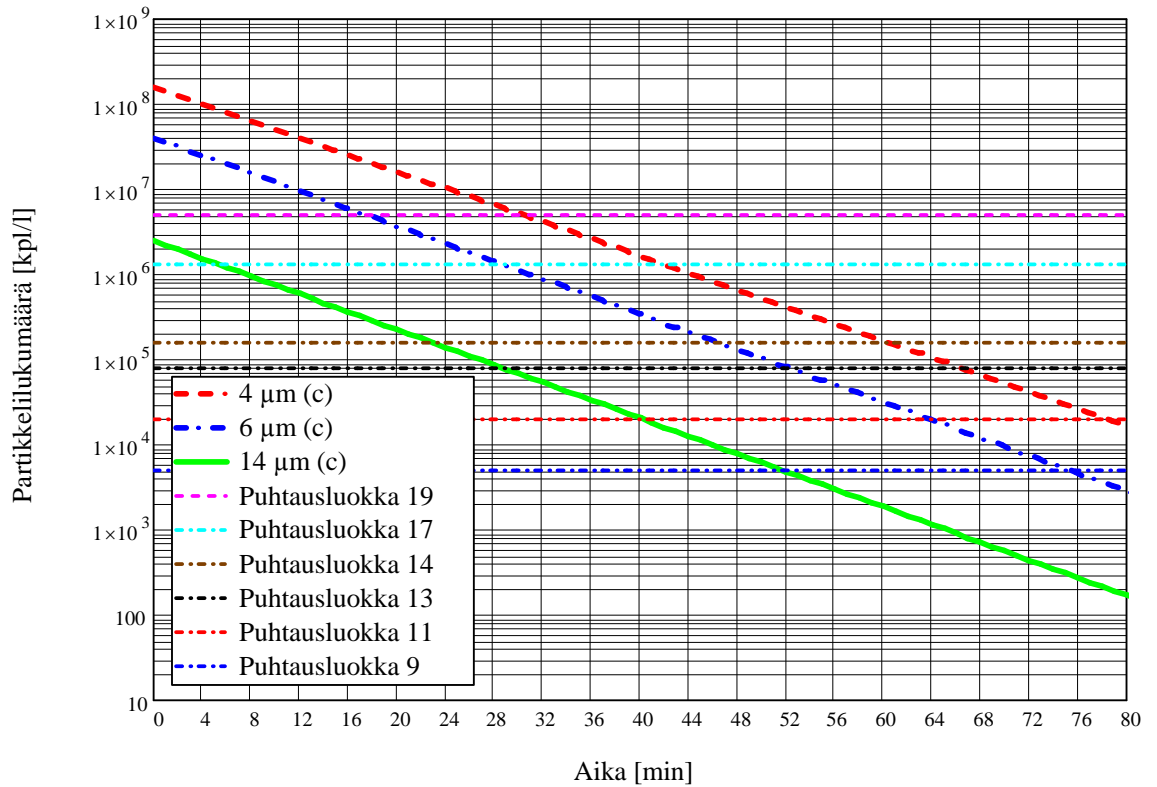
Laskelmissa valitut lähtötilanteen puhtausluokat olivat 24/22/18 ja 20/18/14. Näistä puhtausluokista valittiin aloituspisteiksi partikkelilukumäärien yläraja-arvot eli luokan sisällä suurin mahdollinen partikkelilukumäärä. Määrien raja-arvot on esitetty taulukossa 3.1. Lähtötilanteen puhtausluokista laskettiin partikkelilukumäärän kehitys ja aika jolloin järjestelmän puhtaus täyttää luokat 19/17/14 ja 13/11/9. Laskelmien tarkoituksena oli selvittää, kuinka suodattimen beta-arvo vaikuttaa puhtausluokkatason saavuttamisaikaan erilaisista lähtötason likamääristä.

Laskelmissa käytetyn järjestelmän tilavuus oli 1000 litraa, tilavuusvirta 120 l/min ja järjestelmään ei syötetty uutta likaa. Laskennassa käytetyt järjestelmän alkuarvot vastasivat muuttuvan likakonsentraation mittauksien testilaitteistoa ja alkuarvoja. Järjestelmän likakonsentraation kehitys on laskettu yhtälön (13) avulla. Suodattimen beta-arvoiksi valittiin standardin mukaisella multipass-testillä saadut arvot koko mittausajanjaksolta. Viiden mikrometrin suodattimen multipass-beta-arvoilla  $\beta_4 = 22$ ,  $\beta_6 = 147$  ja  $\beta_{14} = 3000$  lasketut partikkelilukumäärien kehitykset sekä puhtausluokkien 19, 17, 14, 13, 11 ja 9 yläraja-arvot ovat esitettynä kuvissa 5.5 ja 5.6. Kuvissa 5.5 ja 5.6 partikkelilukumäärä-akselit ovat logaritmisia tulosten esittämisen selkeyttämiseksi. Taulukossa 5.1 on esitetty laskettujen puhtausluokkien saavuttamiseen kulunut aika viiden mikrometrin suodattimella eri lähtötason puhtausluokista.

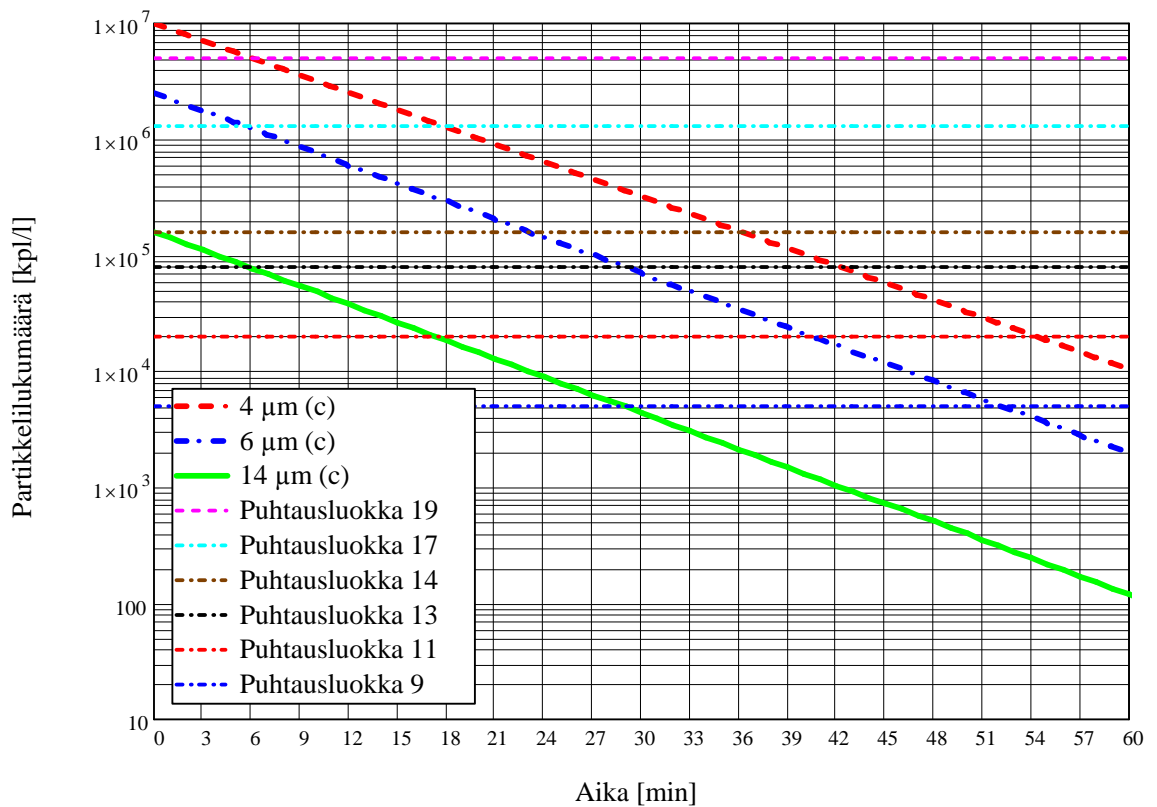
*Taulukko 5.1. Laskennallinen suodatusaika viiden mikrometrin suodattimelle tutkittujen puhtausluokkien välillä.*

<b>Tutkitut lähtöpuhtausluokat</b>	24/22/18	20/18/14
Tavoitetaso 19/17/14	30min/28min/22min	6min/5min/0min
Tavoitetaso 13/11/9	66min/64min/51min	42min/40min/28min

Laskenta osoittaa, että suodattimen beta-arvojen, tilavuusvirran ja järjestelmän tilavuuden pysyessä vakioina, puhtauden lähtötasolla on suuri merkitys vaatimusten mukaisten puhtausluokkien saavuttamisessa. Järjestelmä, jonka alkupuhtaus on neljä puhtausluokkaa alempi jokaisella partikkelikoolla, saavuttaa tavoitepuhtauden 19/17/14 keskimäärin 5 kertaa nopeammin kaikissa partikkelikokoluokissa. Tämä voidaan nähdä selkeästi vertaamalla kuvien 5.5 ja 5.6 partikkelilukumäärien kuvaajia ja ratkaisemalla partikkelilukumäärät ajan suhteen yhtälöstä (13).



**Kuva 5.5.** Laskettu järjestelmän partikkelimäärän kehitys 5 $\mu$ m suodattimella logaritmisella asteikolla lähtöluokista 24/22/18.



**Kuva 5.6.** Laskettu järjestelmän partikkelimäärän kehitys 5 $\mu$ m suodattimella logaritmisella asteikolla lähtöluokista 20/18/14.

Mittauksilla osoitettiin todellisen järjestelmän puhtauden saavuttavan suodattimelle ominaisen puhtaustason suodattimen beta-arvojen pienentyessä partikkelimäärän vähentymisen suhteen. Beta-arvojen muutos ei mittauksissa ollut tasaista, vaan arvot kehittyivät suodattimen likaantuessa ja erilaiset tekijät, kuten tilavuusvirran muutokset aiheuttivat beta-arvoihin hetkittäisiä vaihteluita.

### 5.2.1. Partikkelisyötön laskelmat

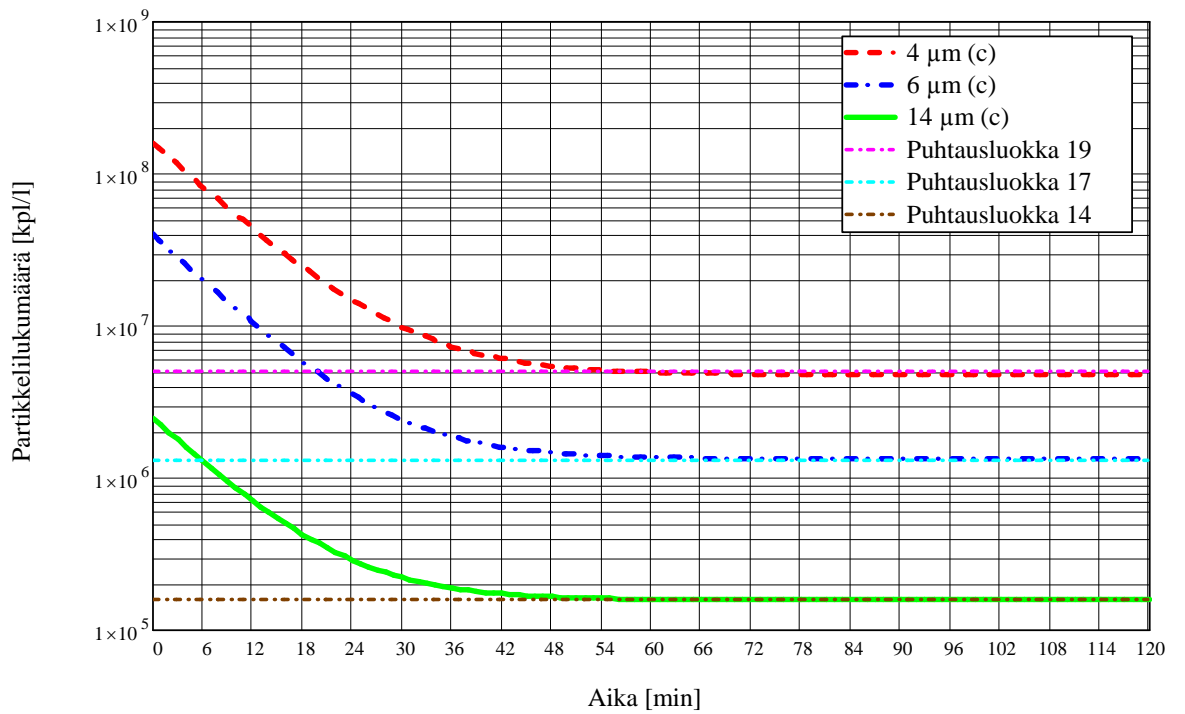
Partikkelilukumäärälaskennalla voidaan määrittää suodattimelle ominaisen syöttönopeuden suuruus, jolla puhtausluokkavaatimukset vielä saavutetaan. Syöttönopeuden laskenta ei kuitenkaan ota huomioon suodattimen likakapasiteettia tai beta-arvojen muutosta järjestelmän partikkelilukumäärän muuttuessa. Yhtälön (13) avulla partikkelilukumäärien kehitystä laskettaessa myös tilavuusvirran kasvattaminen nopeuttaa järjestelmän puhdistumista. Käytännön järjestelmissä tilavuusvirran suuruutta rajoittaa monet erilaiset tekijät, kuten suodattimen koko, mitoitettu tilavuusvirta-alue, jolla suodattimen yli oleva paine-ero ei nouse liian suureksi sekä pumpun maksimituotto.

Viiden mikrometrin suodattimen partikkelisyötön laskennassa käytettiin standardin mukaisella multipass-testillä ja ISO MTD-testipölyllä mitattuja suodatussuhteen arvoja  $\beta_4 = 22$ ,  $\beta_6 = 147$  ja  $\beta_{14} = 3000$ . Myös järjestelmän muut alkuarvot, kuten tilavuus ja käytetty tilavuusvirta olivat samat kuin luvun 5.2 laskelmissa. Partikkelilukumäärä-akselit ovat luvun 5.2.1 kuvissa logaritmisia. Ratkaisemalla partikkelisyöttönopeuden suuruus yhtälöstä (13) saadaan selville, kuinka suuri partikkelisyöttönopeus [kpl/min] tarvitaan, jotta järjestelmän puhtausvaatimustasoa 19/17/14 ei saavuteta lähtöpuhtaudesta 24/22/18 suodattimen beta-arvojen pysyessä vakioina multipass-testillä saaduissa arvoissa.

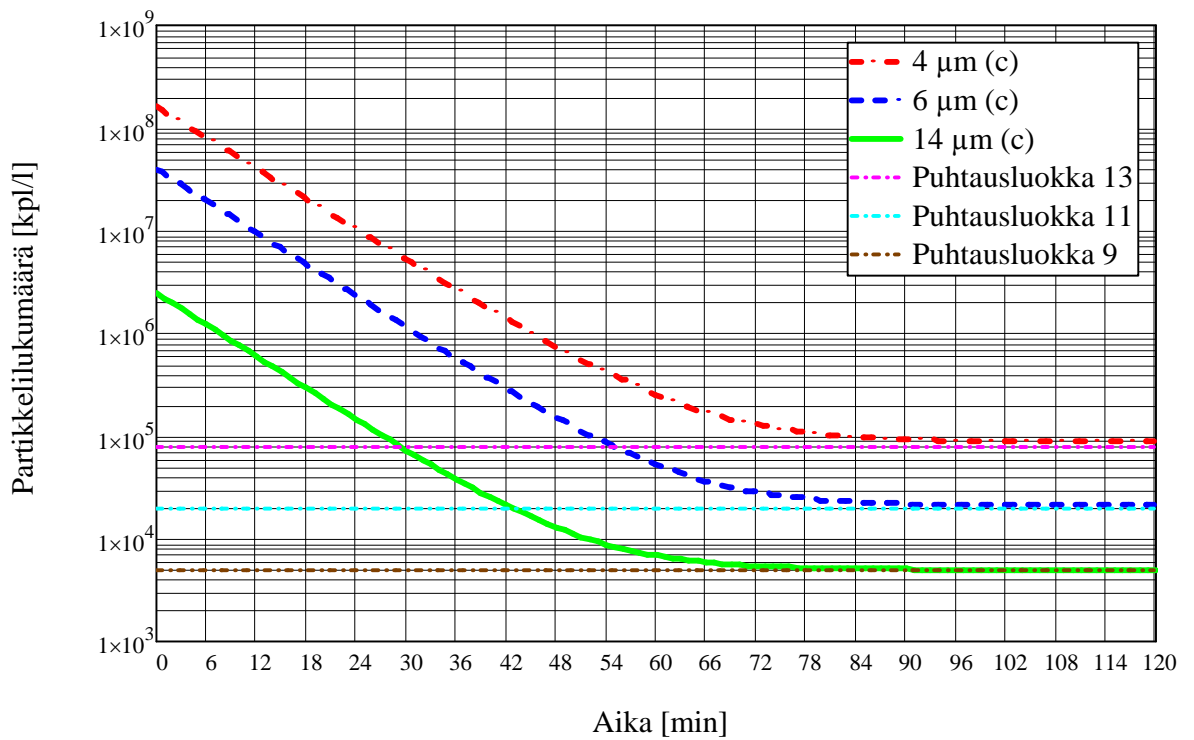
Molemmissa partikkelisyöttönopeuden laskuissa tarvittavat syötön partikkelilukumäärät ovat korkeita, jotta järjestelmän puhtausvaatimusta ei saavuteta multipass-mittauksilla määritetyillä beta-arvoilla ja mittausjärjestelmän alkuarvoilla sekä tilavuusvirralla 120 l/min. Syöttönopeuden tulisi lisäksi pysyä koko lasketun aikavälin 120 minuuttia samassa tasossa. Partikkelilukumäärien kehitys ja tavoitepuhtausluokat lasketuilla syöttönopeuden arvoilla on esitetty kuvissa 5.7. ja 5.8. Tarvittava likapartikkeleiden syöttönopeus, jolla valittua puhtausvaatimustasoa ei saavuteta, on esitetty taulukossa 5.2 viiden mikrometrin suodattimelle.

**Taulukko 5.2.** Laskennallinen syöttönopeus viiden mikrometrin suodattimelle, jolla puhtausvaatimusta ei saavuteta valituilla puhtaustasoilla.

Tutkitut lähtöpuhtausluokat	Tavoite puhtaustaso	Syöttönopeus [kpl/min]
24/22/18	Tavoitetaso 19/17/14	$R_{x \geq 4} = 5\,800\,000\,000$ $R_{x \geq 6} = 160\,000\,000$ $R_{x \geq 14} = 20\,000\,000$
24/22/18	Tavoitetaso 13/11/9	$R_{x \geq 4} = 10\,000\,000$ $R_{x \geq 6} = 2\,500\,000$ $R_{x \geq 14} = 600\,000$



**Kuva 5.7.** Laskettu partikkelilukumäärien kehitys lähtöpuhtausluokista 24/22/18 puhtaustasoon 19/17/14 viiden mikrometrin suodattimella ja partikkelisyötöllä.



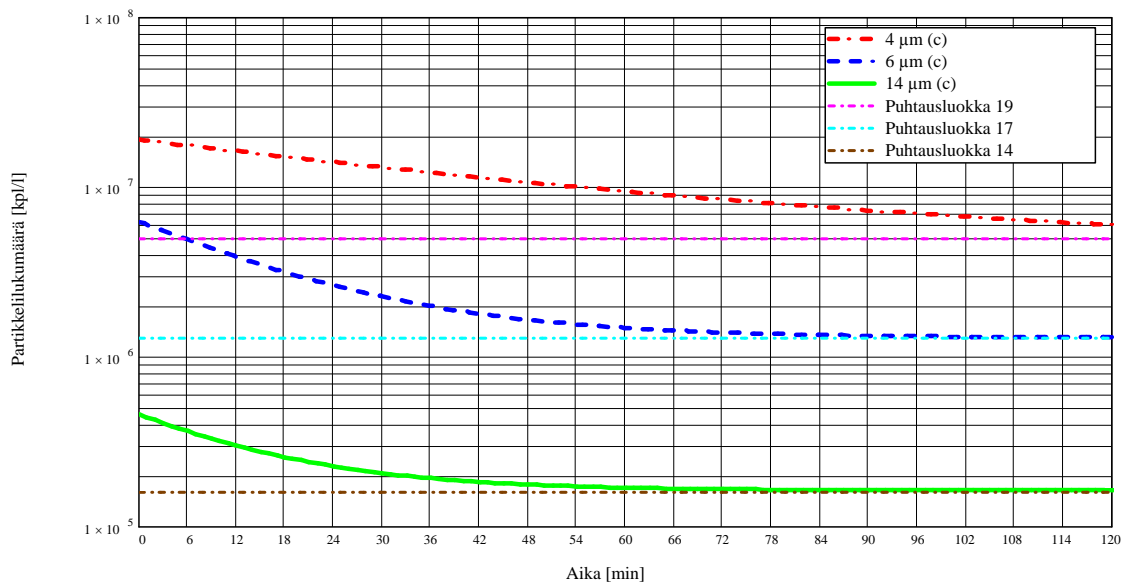
**Kuva 5.8.** Laskettu partikkelilukumäärien kehitys lähtöpuhtausluokista 24/22/18 puhtaustasoon 13/11/9 viiden mikrometrin suodattimella ja partikkelisyötöllä.

Likakonsentraation vaikutuksen mittauksista lasketut viiden mikrometrin suodattimen beta-arvot olivat  $\beta_4 = 1.165$ ,  $\beta_6 = 1.834$  ja  $\beta_{14} = 2.145$ . Suodatin saavutti lähtötason puhtaudesta 21/20/16 mittauksen kuluessa 120 minuutin jälkeen järjestelmän puhtauden 18/10/5 tilavuusvirralla 120 l/min ja järjestelmän tilavuudella 1000 litraa. Partikkelimäärien kehitys ja tavoitepuhtaustasot lasketuilla syöttönopeuden arvoilla sekä suodattimen beta-arvoilla on esitetty kuvissa 5.9 ja 5.10. Likapartikkeleiden syöttönopeus, jolla tavoitepuhtaustasoa ei saavuteta mittauksessa valinneesta puhtauden lähtötasosta, on esitetty taulukossa 5.3.

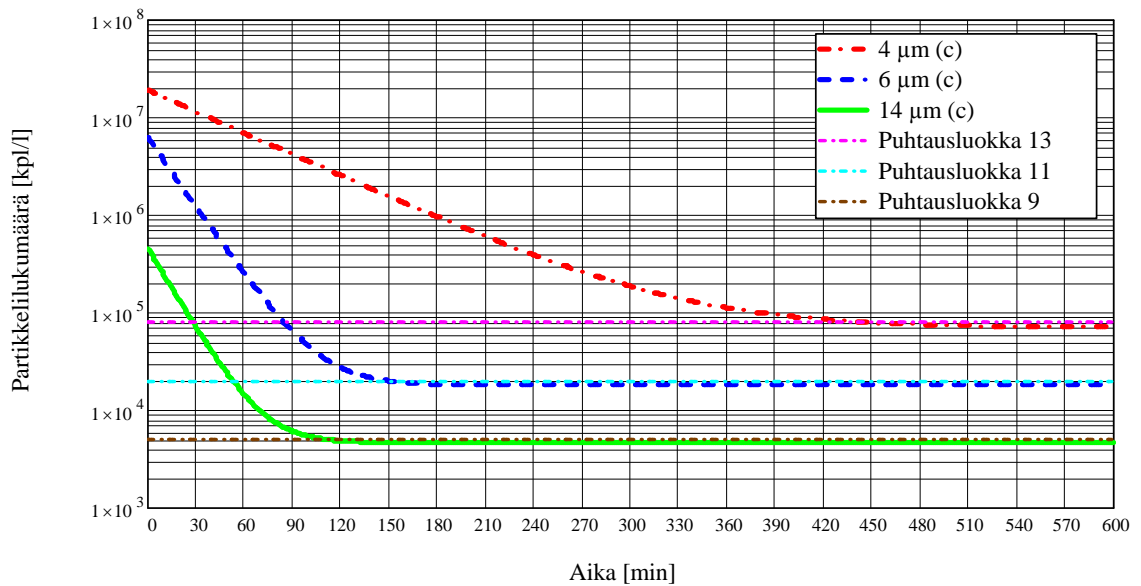
**Taulukko 5.3.** Laskennallinen syöttönopeus viiden mikrometrin suodattimelle, jolla puhtaustasoa ei saavuteta valituilla puhtaustasoilla.

Tutkitut lähtöpuhtaustasot	Tavoite puhtaustaso	Syöttönopeus [kpl/min]
21/20/16	Tavoitetaso 19/17/14	$R_{x \geq 4} = 69\,000\,000$ $R_{x \geq 6} = 71\,000\,000$ $R_{x \geq 14} = 10\,500\,000$
21/20/16	Tavoitetaso 13/11/9	$R_{x \geq 4} = 1\,200\,000$ $R_{x \geq 6} = 1\,001\,000$ $R_{x \geq 14} = 300\,000$

Laskuissa partikkelien muodostumista järjestelmään kuvaavan syöttönopeuden suuruudella on merkitys suodattimella saavutettavan puhtaustason suuruuteen ja aikaan, jossa vaatimus saavutetaan. Jos syötön partikkelimäärät ovat suuret, ei järjestelmän puhtaustasoa saavuteta. Laskelmat kuitenkin osoittavat, että tarvittavat partikkelimäärät, joilla puhtaustasoa lasketuilla suodattimen beta-arvoilla ei saavuteta, ovat varsin suuria. Todellisessa suodatustilanteessa lasketut partikkelimäärät aiheuttaisivat myös suodattimen nopean tukkeutumisen suodatetun likamäärän ollessa suuri.



**Kuva 5.9.** Laskettu partikkelilukumäärien kehitys lähtöpuhtaustasosta 21/20/16 puhtaustasoon 19/17/14 viiden mikrometrin suodattimella ja partikkelisyötöllä.



**Kuva 5.10.** Laskettu partikkelilukumäärien kehitys lähtöpuhtausluokista 21/20/16 puhtaustasoon 13/11/9 viiden mikrometrin suodattimella ja partikkelisyötöllä.

Jos järjestelmään ei lisätä ja sinne ei muodostu uutta likaa, määrittää laskelmissa lähtötilanteen puhtaustaso, tilavuusvirta, beta-arvot ja järjestelmän tilavuus suodattimella saavutettavan puhtaustason. Multipass-testillä määritettyjen viiden mikrometrin suodattimen beta-arvoilla neljän puhtausluokan lähtötason muutos aiheuttaa puhtaustason saavuttamisaikaan noin 24 minuutin eron (kuvat 5.5 ja 5.6). Kun järjestelmän suodattimelle mitataan järjestelmä ja alkuarvokohtaiset suodatussuhteen arvot, voidaan näiden avulla laskea järjestelmän todellinen puhtaustaso mittausajan kuluessa. Järjestelmäkohtaiset suodattimen beta-arvot ovat selvästi alhaisemmat kuin multipass-testistä määritetyt arvot. Tästä johtuen järjestelmän puhtausvaatimus saavutetaan selvästi myöhemmin kuin multipass-beta-arvoilla laskettuna. Jos järjestelmään ei syötetä uutta likaa, yhtälöllä (13) laskettuna järjestelmän partikkelilukumäärät lähestyvät nolaa mittausajan kuluessa. Mittaukset osoittivat, että todellisuudessa näin ei kuitenkaan ole ja järjestelmän puhtaus saavuttaa suodattimelle ominaisen tason, jonka jälkeen partikkelilukumäärät vähenevät vain muutamilla partikkeleilla mittausajan kuluessa.

Järjestelmän partikkelilaskennan tarkkuutta voidaan parantaa erilaisten tekijäkertoimien avulla [3, s. 60]. Esim. P. Nikkilä esittää väitöskirjassaan suodatustehokkuuden laskevan 12 % epätasaisen virtauksen vaikutuksesta. Tämä voidaan ottaa huomioon partikkelilukumäärän kehityksessä laskemalla suodatustehokkuuden alentumisen jälkeiset beta-arvot ja laskemalla näiden avulla epätasaisen virtauksen partikkelilukumäärien kehitys [3]. Laskentatarkkuuden parantamiseksi tulisi myös muille suodatussuhteeseen vaikuttaville tekijöille, kuten lian partikkelikokojakaumalle, likakosentraatiolle ja voiteluaineen viskositeetille määrittää

tekijä- ja suodatinkohtaiset kertoimet. Mittaukset osoittivat, että tekijöiden vaikutus on suodatinkohtainen ja riippuu mm. suodattimen materiaalista ja koosta. Tästä johtuen jokaisen tekijän vaikutuksen määrittämien vaatii laajoja mittauksia erilaisille suodattimille.

### 5.2.2. Suodatusratkaisun valinnasta

Suodattimen valinnassa tulee huomioida järjestelmän ja sen komponenttien puhtausluokkavaatimukset. Usein järjestelmän tai sen komponenttien vaatimaa puhtaustasoa ei tiedetä, jolloin järjestelmälle tulee määrittää suodatukseen vaikuttavat tekijät ja näiden vaikutukset suodatuksen onnistumisen kannalta. Vaatimuksien määrittämisessä huomioidaan kaikki järjestelmän sisältämät komponentit, toimintalämpötila-alue, järjestelmän työjakso, komponenttien käyttöikä, erilaiset suodatukseen ja vikatilanteisiin liittyvät kustannukset sekä muut järjestelmään liittyvät turvallisuus- ja käyttöominaisuudet. Kun järjestelmään liittyvä puhtausvaatimus on selvillä, voidaan tämän jälkeen valita järjestelmään sopiva suodatusratkaisu, jolla puhtausvaatimukset saavutetaan. Suodattimen valinnassa tulee ottaa huomioon suodattimen sijoituspaikka, käyttölämpötilat, sallittu suodattimen paine-ero, järjestelmässä vallitsevat paineet ja tilavuusvirrat, sekä voiteluaineen viskositeetti. Lisäksi suodattimen materiaalin yhteensopivuus käytetyn voiteluaineen kanssa tulee selvittää ennen suodatuksen käyttöönottoa.

Järjestelmän puhtaudesta saadaan erilaisia arvoja riippuen puhtausnäytteen ottopaikasta ja näytteenottotavasta. Koska likamäärän todettiin vaikuttavan suodattimella saavutettavaan puhtaustasoon, on järjestelmän puhtausmittaukseen kiinnitettävä erityistä huomiota, jotta vallitsevasta puhtaudesta saadaan oikea kuva. Jos mahdollista, järjestelmän puhtautta tulisi seurata jatkuvasti useasta kohtaa järjestelmää, sen toiminnan aikana.

Voitelusuodattimien tehtävänä on suojata järjestelmän komponentteja lialta ja joissakin järjestelmissä pysäyttää myös muiden epäpuhtauksien kuten veden ja ilman pääsy järjestelmään. Suodattimen mallin ja rakenteen määrittää sen sijoituspaikka järjestelmässä. Yleisesti voitelujärjestelmissä käytettävät suodattimet sijoitetaan järjestelmän painelinjaan. Voitelujärjestelmät, joissa huoltovälit ovat pitkät sekä tilavuusvirrat suuria, käytetään useita suodattimia rinnankytkettynä. Rinnankytkettyjen suodattimien etuna lisäksi on, että suodattimet voidaan huoltaa ja vaihtaa ilman järjestelmän pysäyttämistä. Mittaukset osoittivat, että voiteluaineen puhtauden kannalta merkittävää ei ole pelkästään suodattimen korkeat beta-arvot, vaan puhtauteen vaikuttavat niin järjestelmän lähtökohtainen puhtaus kuin myös järjestelmään eri tavoin muodostuvan lianmäärä ja partikkelikokojakauma. Poikkeavat kulumismateriaalien laadut ja muodot sekä muut järjestelmän epäpuhtaudet, kuten vesi ja ilma, voivat kaikki heikentää suodatustulosta merkittävästi.

Standardin mukaisilla multipass-mittauksilla määritetyt suodattimen likakapasiteetit mitatuille suodatusasteille antoivat kuvan, että kymmenen mikrometrin suodattimella saavutetaan viiden mikrometrin suodatinta pidempi vaihtoväli pelkkiä

likakapasiteetteja verrattaessa. Todellisessa järjestelmässä hienomman suodattimen käyttö voi pitkällä aikavälillä olla taloudellisempaa ja suodattimen vaihtoväli saadaan pidemmäksi, koska alhaisempi likamäärä järjestelmässä aiheuttaa vähemmän kulumista ja näin myös suodattimen tarvitsee sitoa vähemmän likaa itseensä. Viiden ja kymmenen mikrometrin suodattimille mitatut puhtausluokat suodattimien ylä- ja alavirroista vaihtuvan virtauksen mittauksista on esitetty taulukossa 5.4.

**Taulukko 5.4.** Puhtausluokkatarkastelu viiden ja kymmenen mikrometrin suodattimille vaihtuvan virtauksen mittauksista.

<b>Gravimetrinen taso [mg/l]</b>	<b>Mitatut puhtausluokat 5 µm suodattimen ylävirrassa</b>	<b>Mitatut puhtausluokat 5 µm suodattimen alavirrassa</b>	<b>Mitatut puhtausluokat 10 µm suodattimen ylävirrassa</b>	<b>Mitatut puhtausluokat 10 µm suodattimen alavirrassa</b>
≈ 9	-	-	21/20/16	21/17/9
≈ 7	21/19/16	17/13/2	-	-
≈ 4	20/19/15	16/12/2	22/20/16	20/16/7
≈ 3	20/18/15	16/12/2	21/19/15	19/16/5
≈ 2	20/18/14	16/12/2	-	-

Yleiset puhtausvaatimukset voiteluaineelle hammasvaihdekäytöissä ovat ISO 4406 standardin mukaisien puhtausluokkien avulla ilmoitettuna 18/16/14 ja teollisuusvaihteistoille 17/15/13. Puhtausvaatimusten saavuttamiseksi on otettava huomioon mitoitettujen suodattimien erilaiset elinkaaren beta-arvot ja näiden vaikutus järjestelmän kokonaispuhtauteen. Mitatuilla suodatusasteilla uuden suodattimen beta-arvot olivat yleisesti hyvät, kun taas normaalitoiminnan alueella beta-arvot olivat selvästi multipass-testillä mitattuja arvoja alhaisemmat.

Likakonsentraation vaikutuksen mittauksissa viiden mikrometrin suodattimella mitattiin järjestelmän puhtaustasoksi 18/10/5 mittausjärjestelmän puhtauden lähtötasosta 21/20/16, kun aikaa suodatuksen aloittamisesta oli kulunut 120 minuuttia, käytetyn järjestelmän voiteluainemäärällä ja valitulla tilavuusvirralla. Tällöin suodattimen normaalitoiminnan beta-arvoiksi saadaan partikkelimäärien kehityksestä laskettua  $\beta_4 = 1,165$ ;  $\beta_6 = 1,834$  ja  $\beta_{14} = 2,145$ , kun järjestelmään ei muodostu tai sinne ei lisätä uutta likaa. Samalle suodattimelle multipass-testillä mitattujen beta-arvojen  $\beta_4 = 22$ ,  $\beta_6 = 147$  ja  $\beta_{14} = 3000$  avulla laskettuna suodattimella tulisi saavuttaa mittausjärjestelmässä 120 minuutin kuluttua järjestelmän puhtaus 12/9/5.

Kymmenen mikrometrin suodattimelle tehdyt likakonsentraation vaikutuksen mittaukset osoittivat suodattimella saavutettavan mittausjärjestelmän puhtaustason 19/12/6 järjestelmän puhtauden lähtötasosta 21/19/15, kun suodatuksen aloittamisesta oli kulunut 180 minuuttia. Suodattimen beta-arvoiksi mittausajalta saadaan laskettua mittausjärjestelmän partikkelimäärillä ja alkuarvoilla  $\beta_4 = 1,055$ ;  $\beta_6 = 1,280$  ja  $\beta_{14} = 1,340$ , kun järjestelmään ei lisätä eikä sinne muodostu uutta likaa. Kymmenen



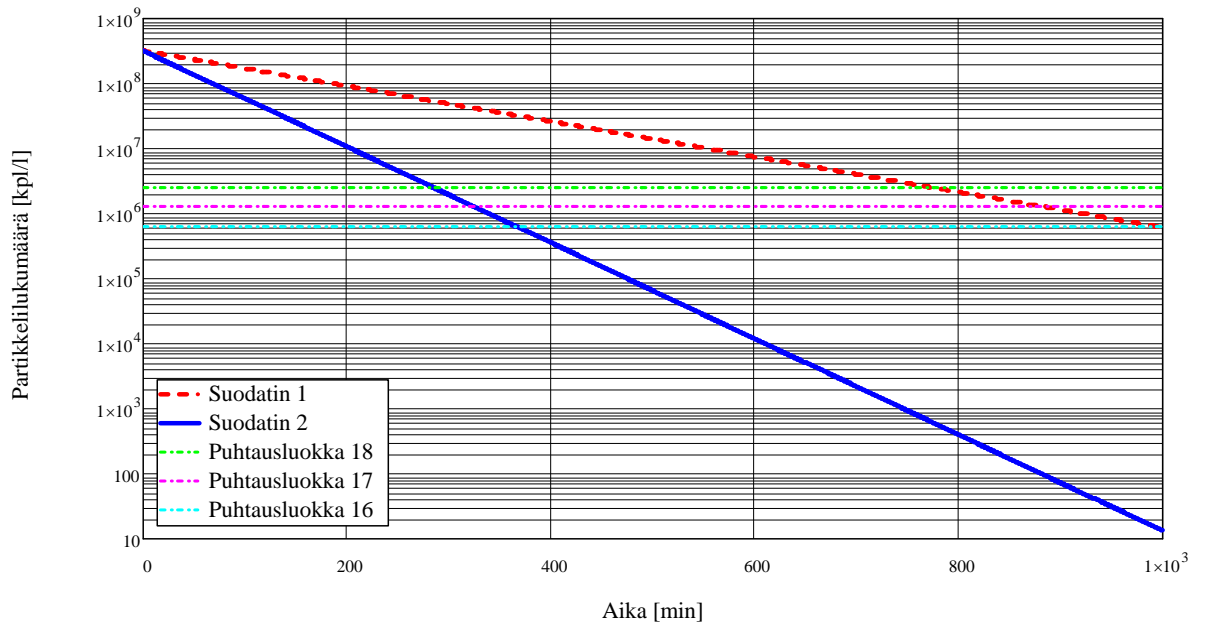
mikrometrin suodattimelle mitatut multipass-suodatussuhteenarvot olivat  $\beta_4 = 2$ ,  $\beta_6 = 8$  ja  $\beta_{14} = 1200$ . Näillä arvoilla laskettuna suodattimella tulisi saavuttaa mittaajärjestelmän puhtaus 15/2/0, kun järjestelmän tilavuutta on suodatettu valitulla tilavuusvirralla 180 minuuttia. Viiden ja kymmenen mikrometrin suodattimien beta-arvo sekä puhtausluokka vertailu on esitetty taulukossa 5.5.

**Taulukko 5.5.** Viiden ja kymmenen mikrometrin suodattimien vertailu eri mittaustulosten avulla.

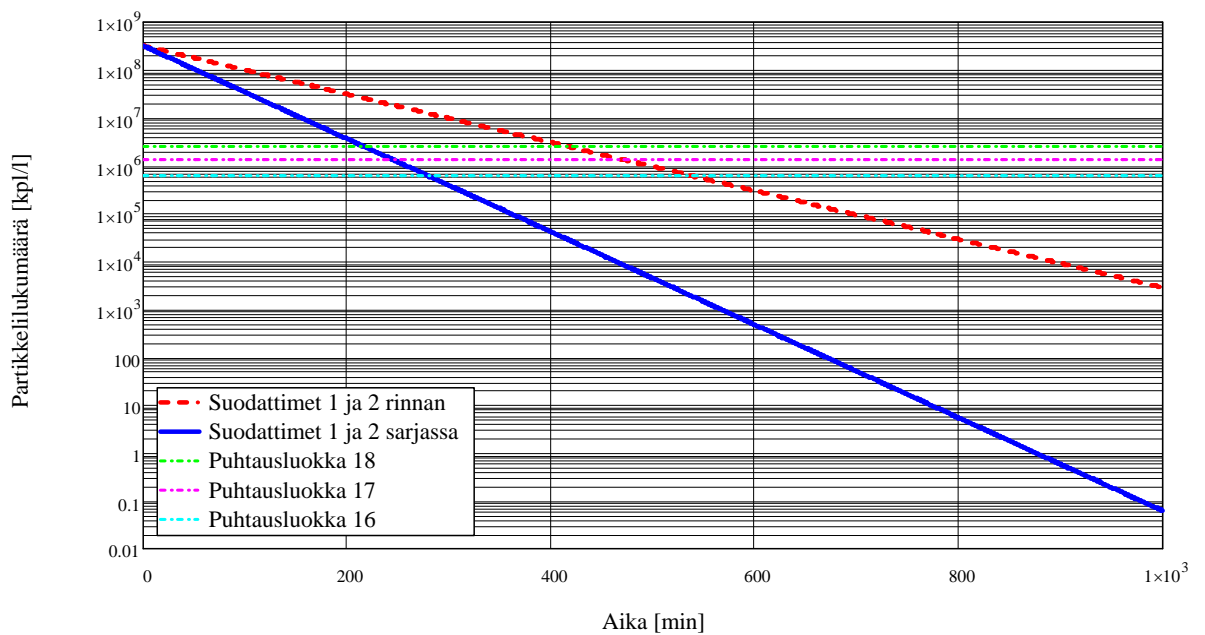
	Likakonsentraation vaikutuksen mittaaminen		Multipass-mittaus	
	5 $\mu\text{m}$ suodatin	10 $\mu\text{m}$ suodatin	5 $\mu\text{m}$ suodatin	10 $\mu\text{m}$ suodatin
<i>Beta-arvot</i>	$\beta_4 = 1,165$ $\beta_6 = 1,834$ $\beta_{14} = 2,145$	$\beta_4 = 1,055$ $\beta_6 = 1,280$ $\beta_{14} = 1.340$	$\beta_4 = 22$ $\beta_6 = 147$ $\beta_{14} = 3000$	$\beta_4 = 2$ $\beta_6 = 8$ $\beta_{14} = 1200$
<i>Puhtausluokat</i>	<i>Ylävirta:</i> 21/20/16 <i>Alavirta:</i> 18/10/5	<i>Ylävirta:</i> 21/19/15 <i>Alavirta:</i> 19/12/6	<i>Ylävirta:</i> 21/20/16 <i>Alavirta:</i> 12/9/5	<i>Ylävirta:</i> 21/19/15 <i>Alavirta:</i> 15/2/0
<i>Puhtausvaatimusten saavuttamiseen kuluva aika</i>	<i>120 minuuttia</i>	<i>180 minuuttia</i>	<b>Laskennallinen</b> <i>120 minuuttia</i>	<b>Laskennallinen</b> <i>180 minuuttia</i>

Mitattujen suodattimien sarja- ja rinnankytkennällä vaikutetaan suodattimille laskettujen tehollisten suodatussuhteiden arvoihin. Viiden ja kymmenen mikrometrin suodattimille laskettujen beta-arvojen avulla voidaan suodattimille laskea niiden rinnan- ja sarjasuodatuksen teholliset beta-arvot yhtälöiden (3) ja (4) avulla. Suodattimien sarjakytkennän tehollisiksi beta-arvoiksi laskettiin arvot  $\beta_4 = 1,229$ ;  $\beta_6 = 2,348$  ja  $\beta_{14} = 2,874$ . Rinnansuodatuksen teholliset beta-arvot olivat  $\beta_4 = 1,107$ ;  $\beta_6 = 1,508$  ja  $\beta_{14} = 1,65$ . Beta-arvojen vaikutus mittauksissa käytetyn järjestelmän yli neljän mikrometrin partikkeleiden kehitykseen on esitetty kuvissa 5.11 ja 5.12.

Järjestelmän alkuarvot olivat samat kuin partikkelimäärän mittauksissa ja lähtötilanteen partikkelimääräksi on valittu puhtausluokka 24 = 320 000 000 kpl/l. Järjestelmään ei lisätty eikä sinne muodostunut uutta likaa, jolloin laskelmien lian syöttönopeus  $R = 0$ . Laskentatuloksista nähdään, että viiden mikrometrin suodattimella saavutetaan puhtausluokat 18, 17 ja 16 neljän mikrometrin ja tätä suuremmilla partikkeleilla noin puolet nopeammin, kuin kymmenen mikrometrin suodattimen tapauksessa, lähtöpuhtausluokasta 24.



**Kuva 5.11.** Laskettu mittausjärjestelmän partikkelikehitys, kun suodattimen 1 suodatusaste on 10  $\mu\text{m}$  ja suodattimen 2 suodatusaste on 5  $\mu\text{m}$ .



**Kuva 5.12.** Laskettu suodattimien 5 ja 10  $\mu\text{m}$  rinnan- ja sarjakytkennän partikkelikehitys.

Viiden ja kymmenen mikrometrin suodattimien sarjaankytkennällä saavutetaan laskennallisesti mittausjärjestelmän puhtausluokka 18, noin 210 minuutin kuluttua lähtötason puhtaudesta 24 neljän mikrometrin ja tätä suuremmilla partikkeleilla. Tämä on n. 60 minuuttia nopeammin kuin viiden mikronin suodattimella yksin vastaavan partikkelimäärän suodattamiseen kuluva aika. Pelkän kymmenen mikrometrin suodattimen avulla järjestelmää suodatettaessa vastaavaan järjestelmän puhtauden

saavuttamiseen tarvittava aika on n. 750 minuuttia ja rinnankytketyillä viiden ja kymmenen mikrometrin suodattimilla n. 600 minuuttia, kun järjestelmään ei lisätä tai sinne ei muodostu uutta likaa. Todellisessa järjestelmässä, kuten mittaukset osoittivat, esiintyy aina likapartikkelien muodostumista. Partikkelien muodostumisesta ja suodattimen beta-arvojen muuttumisesta johtuen järjestelmän puhtaus ei parane laskennan osoittamalla tavalla äärettömästi. Lisäksi erilaisista suodatustehokkuuksista johtuen sarjaan- ja rinnankytketyt suodattimet tukkeutuvat eri ajankohtina, vaikka niiden likakapasiteetit olisivat samat.

Laskenta osoittaa, että voitelujärjestelmän puhtauteen voidaan vaikuttaa erilaisten suodatuskytkentöjen ja -ratkaisuiden avulla. Erilaisten tekijöiden vaikutus suodatusratkaisulla haettavaan hyötyyn ja kokonaispuhtauteen tulisi selvittää tarkasti, ennen varsinaisen suodatusjärjestelmän käyttöönottoa. Mittauksien ja laskennan avulla voidaan selvittää suodattimien toiminnan raja-arvot, joilla järjestelmän puhtausvaatimukset saavutetaan. Yksittäisten tekijöiden vaikutuksen selvittämisen jälkeen tulisi lisäksi mitata tekijöiden yhteis- ja ristikkäisvaikutukset. Tutkimus vaatii laajoja mittauksia ja jokainen suodatinmateriaali, -rakenne ja -koko tulisi mitata erikseen tutkittava muuttuja kerrallaan. Koska tekijöiden vaikutus suodattimen toimintaan voi muuttua, on yksittäisen suodatukseen vaikuttavan tekijän mittaaminen ja laskenta haastavaa. Käytännöllisempi ja vähemmän mittauksia vaativa lähestymistapa tekijöiden vaikutusten kartoittamisessa on määrittää toiminnan raja-arvot, eli ne suodatukseen vaikuttavat arvot, joilla järjestelmän puhtausvaatimus ei toteudu.

## 6. JOHTOPÄÄTÖKSET

Suodattimista voidaan virheellisesti luulla, että suodattimelle valmistajan ilmoittama suodatusaste tarkoittaa partikkelikokoa, johon asti suodatin poistaa likapartikkeleita voiteluaineesta. Työtä varten suoritettujen mittauksien tulokset osoittavat, että näin ei todellisuudessa ole ja järjestelmän partikkelikonsentraatio ja tätä kautta puhtaustaso muuttuu suodatuksen edetessä. Vasta useiden suodattimen läpäisykertojen jälkeen järjestelmän puhtaustaso paranee multipass-testillä saatujen  $\beta$ -arvojen ja näistä lasketun suodatustehokkuuden mukaiseksi. Käytännön järjestelmissä suodattimen beta-arvoihin lisäksi vaikuttavat monet ympäristötekijät ja järjestelmän toiminnasta johtuvat tekijät. Tekijöiden vuoksi suodattimen käytön aikana vallitsevat beta-arvot voivat jäädä alhaisiksi verrattuna laboratoriomittauksilla saataviin tuloksiin. Alhaiset beta-arvot näkyvät järjestelmän puhtauden huonontumisena sekä lisääntyneinä huolto- ja ylläpitokustannuksina.

Mitattujen suodattimien paine-ero nousee nopeasti niiden tukkeutuessa. Tämä on nähtävissä multipass-mittauksien paine-erokuvaajista. Korkea suodattimen likapitoisuus sitoo itseensä lisää likapartikkeleita suodattimen huokosten tukkeutuessa. Ilmiö aiheuttaa beta-arvojen kasvun ja korkealla mittauksen lopetuspaine-erolla voidaan suodattimelle multipass-mittauksen ajalta laskettujen beta-arvojen keskiarvoiksi määrittää normaalitoimintaa ratkaisevasti korkeammat arvot. On kuitenkin hyvä muistaa, että mitattujen suodattimien käyttöikä tarkastelussa aikaväli nopean likaantumisen johtuvan paine-eron nousun alkamisesta suodattimen tukkeutumiseen on lyhyt verrattuna suodattimen normaalitoiminnan aikajaksoon ennen paine-eron nopean kasvun alkamista. Likamäärän vaikutuksen mittauksissa suodattimen beta-arvot laskettiin tukkeutumisesta johtuvan suodattimen yli olevan paine-eron nopean nousemisen raja-arvoon asti. Näin toimittaessa saadaan suodattimen normaalitoiminnan beta-arvoista todellisempi kuva kuin koko mittausjaksolta korkeaan lopetuspaine-eroon asti suodatussuhteita laskettaessa.

Viiden ja kymmenen mikrometrin suodattimille tehtyjen vaihtuvan virtauksen mittauksien normaalitoiminta-alueen beta-arvot olivat kaikissa partikkelikokoluokissa pienemmät, kuin koko mittausjaksojen ajalta lasketut beta-arvot. Lisäksi järjestelmän sisältämän likamäärän suuruudella oli vaikutus suodattimille laskettujen multipass-beta-arvojen suuruuteen. Viiden mikrometrin suodattimen beta-arvot parantuivat likamäärän kasvaessa erityisesti pienillä likapartikkeleilla. Kymmenen mikrometrin suodattimelle erot eri likamäärillä laskettujen beta-arvojen välillä olivat pienemmät. Beta-arvojen erot olivat molemmilla suodatusasteilla lähellä nimellisen suodatusasteen (5 ja 10  $\mu\text{m(c)}$ ) partikkelikokoja.

Multipass-mittauslaitteistolla ja testipölyllä ISO MTD mitattuna, voidaan todeta likakonsentraation suuruuden vaikuttavan suodattimen beta-arvoihin ja tätä kautta suodattimen alavirran puhtauteen mitatuilla suodatusasteilla. Molemmilla suodattimilla likakonsentraation vaikutusta suurempi beta-arvoihin vaikuttava tekijä oli suodattimen käyttöiän vaihe. Molemmilla suodatusasteilla beta-arvot laskivat mittauksen kuluessa aina paine-eron nopean nousemisen raja-arvoon asti, jonka jälkeen arvot nousivat nopeasti jopa alun beta-arvoja korkeammiksi. Erot alussa valinneiden ja alhaisimpien mitattujen beta-arvojen välillä suodattimen elinkaaren aikana olivat suuremmat kuin erilaisten päävirran likamäärien aiheuttamat beta-arvojen muutokset.

Beta-arvojen suuruuteen vaikuttavat lisäksi monet muut suodatin- ja järjestelmäkohtaiset tekijät, joten todellisten beta-arvojen vaihteluvälien ja virherajojen selvittämiseksi tarvitaan lisämittauksia. Suodattimelle tehtävien multipass-mittauksien lopetuspaine-ero tulee määrittää suodattimelle optimaalisen käyttöalueen yläraja-arvon mukaisesti ja tukkeutumisesta aiheutuvat beta-arvojen nousut tulisi jättää laskelmien ulkopuolelle. Lisäksi paine-eron raja-arvon tulisi olla pienempi kuin käytännön järjestelmissä käytettävän mahdollisen ohivirtausventtiilin avautumisen tai paine-eroindikaattorin kytkeytymisen raja-arvo. Näin mitattaessa multipass-testillä voidaan määrittää suodattimen todelliset normaalitoiminnan beta-arvot ja suodattimella saavutettava järjestelmän puhtaus vakiovirtaustilanteessa.

Suodattimen beta-arvojen tulisi lähtökohtaisesti olla samansuuruisia, riippumattoman partikkelikokojakaumasta ja partikkelimäärästä. Eri testipölyillä suoritettujen multipass-mittaukset kuitenkin osoittivat testipölyn partikkelikokojakauman vaikuttavan suodattimen beta-arvoihin ja suodattimelle testin ajalta laskettuun likakapasiteettiin. Pienillä partikkeleilla suodattimen beta-arvojen erot eri testipölyillä mitattuna ovat vähäisemmät ja partikkelikoon kasvaessa myös erot suurenevät. Kun testipölyn kumulatiivinen hiukkaskokojakauma oli hienojakoinen muihin testipölyihin verrattuna, olivat kymmenen mikrometrin suodattimelle mitatut beta-arvot kaikkein pienimmillään. Karkealla testipölyllä suodattimelle mitattiin suuremmat beta-arvot kaikissa partikkelikokoluokissa. Viiden mikrometrin suodattimella pienien, alle kahdeksan mikrometrin partikkeleiden beta-arvot olivat varsin lähellä toisiaan kaikilla testipölyillä mitattuna. Isommilla partikkeleilla erot mitattujen beta-arvojen kesken suurenevät. Molempien suodattimien erot eri testipölyillä mitattujen beta-arvojen välillä olivat niin suuret, että vaikutus näkyy järjestelmän puhtaudessa ja ajassa, jossa järjestelmän puhtaus saavutetaan.

Muuttuvan viskositeetin singlepass-mittaukset viiden ja kymmenen mikrometrin suodattimille osoittivat viskositeetin vaikuttavan suodattimen alavirran puhtauteen tilavuusvirran, paineen ja muiden suodatukseen vaikuttavien tekijöiden pysyessä vakioina. Mittauksien ulkopuolelle jätettiin hyvin matalien lämpötilojen viskositeetit ja näiden vaikutus suodattimen toimintaan, esim. kylmäkäynnistystilanteessa. Korkea voiteluaineen viskositeetti voi aiheuttaa suodatinelementtiin ja sen materiaaliin muutoksia sekä huonontaa suodattimen suodatustehokkuutta pysyvästi. Hyvin alhaisen viskositeetin vaikutusten selvittäminen vaatii lisämittauksia. Viskositeetin vaikutuksen

havaittiin olevan suurempi viiden mikrometrin suodattimelle kuin kymmenen mikrometrin suodattimelle. Materiaali- ja rakennekohtaisten vaikutusten sekä raja-arvojen selvittämiseksi tulisi suodattimille toteuttaa lisämittauksia.

Suodattimelle suoritettujen laboratoriomittaustulosten avulla käytännön järjestelmän partikkelimäärän kehitys ja puhtausvaatimusten täytyminen pyritään selvittämään laskennallisesti. Jotta laskentatarkkuus olisi riittävä, tulee suodatustehokkuuteen ja suodattimen elinikään vaikuttavien tekijöiden suuruus selvittää mittauksilla mahdollisimman tarkasti. Kun suodatukseen vaikuttavat tekijät tunnetaan, voidaan suunniteltujen ja jo olemassa olevien suodatusjärjestelmien toiminta selvittää laskennallisesti. Usein eri tekijöiden vaikutuksen mittaaminen on kuitenkin haastavaa ja tekijöillä voi olla ristikkäisvaikutuksia. Jokainen suodatinkoko, -rakenne ja -materiaali tulisi lisäksi mitata erikseen ja määrittäminen vaatisi laajoja mittauksia. Kattavan määrittämisen haastavuudesta ja laajuudesta johtuen yleensä riittävä laskentatarkkuus saavutetaan toiminnan raja-arvojen avulla. Raja-arvojen määrittäminen perustuu järjestelmän puhtausvaatimuksen täyttymiseen. Raja-arvo mittauksissa pyritään selvittämään tekijä kerrallaan ne arvot, joilla testattavalla suodattimella ei järjestelmän puhtausvaatimusta enää saavuteta tai tekijä aiheuttaa suodattimen rikkoutumisen. Kun raja-arvot tunnetaan, voidaan suodattimelle luoda esim. käyttöaluetaulukko, jossa erilaiset tekijät on huomioitu laskennallisesti järjestelmän puhtausvaatimusten kannalta.

Suodatustehokkuuteen vaikuttavat tekijät ja myös suodattimen likakapasiteetti tulisi tulevaisuudessa ottaa huomioon partikkelilukumäärälaskennassa. Mittaukset osoittivat testipölyn hiukkaskokojakauman vaikuttavan suodattimelle määritettyyn likakapasiteettiin. Standardin mukaisella hienolla testipölyllä saadaan saman kokoluokan ja suodatusasteen suodattimille alhaisempi likakapasiteetti kuin karkeammalla testipölyllä mitattaessa. Toisin sanoen testattujen materiaalien suodattimet tukkeutuvat nopeammin järjestelmän sisältäessä suhteellisesti suuremman osuuden pieniä likapartikkeleita. Käytännön järjestelmissä ilmiö voi aiheuttaa ennen aikaisia suodattimien tukkeutumisia, jos järjestelmä sisältää paljon hyvin pieniä likapartikkeleita, vaikka järjestelmän puhtaustaso olisikin vaatimusten mukaisella tasolla.

Järjestelmän suodatuksen onnistumista tulee seurata jatkuvan mittauksen periaatteella mahdollisimman monesta kohtaa järjestelmää. Kunnonvalvonnan avulla saadaan tietoa järjestelmään syntyvän lianmäärästä ja sen partikkelikokojakaumasta. Järjestelmän likamäärän mittaukset osoittivat, että suodattimen ylävirran likamäärä voi vaihdella jopa yksittäisen mittauksen aikana usean puhtausluokan verran. Koska järjestelmän partikkelimäärän muutokset ovat usein vielä hetkittäisiä, on pelkästään partikkelimääriin perustuvan ja kunnonvalvontamittauksien avulla tehtävän komponenttien kulumisen ja vikaantumisen ennustaminen vaikeaa. Seuranta- ja ennustamistarkkuutta voidaan parantaa liittämällä partikkelilaskennan rinnalle lisäksi muita komponenttien ominaisuuksia kuten lämpötilaa ja tärinää seuraavia mittausjärjestelmiä.

## LÄHTEET

- [1] Antila K., Kajander K. et.al., 2006, Teollisuusvoitelu, Kunnossapito ry, KP-Media Oy, 254 s.
- [2] Anon., 2010, Kiertovoitelujärjestelmät luentokalvosarja, Nesteenpuhtauden spesifikaatiot, Pall & Colly Company, 45 s.
- [3] Anon., 2001, Kunnossapitokoulu, Voiteluaineiden epäpuhtaudet ja niiden vaikutus voiteluvaurioihin, Kunnossapito lehden erikoisliite, No 62, 8 s.
- [4] Anon, 2006, Parker LCM20, Condition monitoring handbook, Parker Hannifin, P.849101, issue 2, 44 s.
- [5] Anon., 2008, SKF, Forum information, Suomi, joulukuu nro 18, 4 s.
- [6] Anon., 2001, Suodatustekniikka, Pall Corporation, Englanti, joulukuu, 16 s.
- [7] Anon., 2006, Suodatus tehostaa ja varmistaa prosessinne toimivuuden – esite, HyXo Oy, nro 3, 12 s.
- [8] Aronen O., 2010, Kiertovoiteluöljyt, ExxonMobil L&S, Mobil Industrial Experts – luentokalvosarja, 44 s.
- [9] Bensch, L.E., 1975, Selecting hydraulic filters for unsteady flow conditions. Basic Fluid Power Research Program, Annual Report, No. 9, Stillwater, Oklahoma, Paper 75-23
- [10] Bensch L.E., 1972, Surge flow effects on filter performance. Basic Fluid Power Research Program, Annual Report No. 7, Stillwater, Oklahoma, Paper 72-CC-5, s. 211-215
- [11] Bensch L.E., 1972, The influence of cyclic flow on filtration performance, Basic Fluid Power Research Program, Annual Report, No. 6, Stillwater, Oklahoma, Paper 72-CC-5 s. 79-97

- [12] Cantley, R. E., 1977, The Effect of Water in Lubricating Oil on Bearing Fatigue Life, ASLE Transactions Volume 20, Number 3, July, s. 240-246
- [13] Filter Manufacturers Council, 2004, Technical Service Bulletin 04-2R1, ISO Updates to Multi-pass Oil Filter Test Procedures, 2 s.
- [14] Haahti, P., 1986, Hydraulinesteopas, Metalliteollisuuden Kustannus Oy, Helsinki, ISBN 951-817-304-4, 52 s.
- [15] Ihanamäki T., 1995, Hydraulioöljyjen kvalitatiivinen analyysi, Diplomityö, TTY, Konetekniikan osasto, Tampere, 98 s.
- [16] Immonen, A., 2007, Hydraulikomponenttien käyttöiän tarkastelu, Diplomityö, TTY, Konetekniikan koulutusohjelma, Hydrauliteknikka, Tampere, 85 s.
- [17] Kanninen K., 1983, Hydraulikkasuodattimien ominaisuuksiin vaikuttavat tekijät, Diplomityö, TTY, Konetekniikan osasto, Tampere, 102 s.
- [18] Kauranne H., Kajaste J., Vilenus M., 1998, Hydrauliteknikan perusteet. 3.-5.painos. Vantaa, WSOY. 354 s.
- [19] Kivioja S., Kivivuori S., Salonen P., 2004, Tribologia. kitka, kuluminen ja voitelu. Helsinki, Otatieto, 351 s.
- [20] Multanen P., 2002, Hydraulic Filter Performance under Variable Flow Conditions, Acta Polytechnica Scandinavica, Mechanical Engineering Series No. 162, Väitöskirja, Tampereen Teknillinen yliopisto, marraskuu, 131 s.
- [21] Nikkilä, P. 2001, Mobilehydrauliikan puhtaustaso ja sen simulointi, Väitöskirja, Tampereen teknillinen korkeakoulu, 120 s.
- [22] Odi-Owei, S. & Roylance, B. J. 1986. The effect of solid contamination on the wear and critical failure load in a sliding lubricated contact, Wear 112(1986), pp. 239-255.
- [23] Puustelli, R., 2006, Öljyjen hapettuminen ja hapettumistuotteiden poistaminen, Fluid Finland, Nro 2., s. 10-12
- [24] Rinkinen, J., Kiiso, T., 1993, Using Portable Particle Counters in Oil system Contamination Control, Procasted 3<sup>rd</sup> Scandinavian International Fluid Power Conference, University of Linköping, Linköping, toukokuu, Ruotsi.



- [25] Rinkinen J., 2007, Öljyn kunnonvalvonta ja inline-kunnassapito sekä komponenttien online-diagnostiikka hydraulijä ja kiertovoitelujärjestelmissä, Fluid Finland, No 3, s. 6-14
- [26] Standard ISO 16889:2008, Hydraulic fluid power, Filters. Multi-pass method for evaluating filtration performance of a filter element, Second Edition, 15.june, 2008. 41 s.
- [27] Stecki, J. S., (Ed.), 2000, Total Contamination Control. Fluid Power Net Pty Ltd, Melbourne, 247 s.
- [28] Stecki J.S. editor, 1998, Total Contamination Control, Fluid Power Net Publication, Australia, ISBN 0-646-35306-3, 177 s.
- [29] Tessmann R.K., Bensch L.E., 1976, Contaminant capacity of a filter – Its real meaning. Basic Fluid Power Research Program, Annual Report No. 9, Stillwater, Oklahoma, Paper 76-18
- [30] Tessmann R. K., 1973, Filter Service life versus particle size distribution. Basic Fluid Power Research Program Annual Report No. 7, Stillwater, Oklahoma, Paper 73-cc-3, s. 203-206
- [31] Vuolle P., 2004, Kiertovoitelujärjestelmät luentokalvosarja – Hydac Oy, 15 s.
- [32] Välttilä J., 1988, Voitelu- ja hydraulioöljyjen epäpuhtausanalyysit, VTT, Konepajan tuotantotekniikan laboratorio, Espoo, 38 s.

# LIITE 1: SUODATUKSEEN LIITTYVIÄ ISO- STANDARDEJA

*Taulukko 1. Suodatukseen liittyviä ISO-standardeja.*

<b>ISO 2941:2009</b>	Suodatinelementit, määrittelee arvot suodattimen kokoonpuristumiselle ja hajoamiselle.
<b>ISO 2942:2004</b>	Suodatinelementit, määrittelee suodattimien valmistamista ja materiaalien eheyttä koskevat raja-arvot
<b>ISO 2943:1998</b>	Suodatinelementit, määrittelee suodatinelementtien materiaalin yhteensopivuuden suodatettavien nesteiden kanssa.
<b>ISO 3722:1976</b>	Hydraulinesteet, määrittelee hydraulinesteiden näytteenoton ja näytteenottometodit
<b>ISO 3968:2001</b>	Suodattimet, määrittelee suodattimen toimintaa paineen sekä tilavuusvirran mukaan.
<b>ISO 4021:1992</b>	Hydraulijärjestelmä, määrittelee kuinka näytteenotto tulisi tehdä toimivasta järjestelmästä.
<b>ISO 4405:1991</b>	Hydraulinestenäytteet, määrittelee puhtaustasot ja partikkelimäärät gravitaatiometrillä saaduille tuloksille.
<b>ISO 4406:1999</b>	Hydraulijärjestelmä, määrittelee puhtaustasot eri partikkelimäärillä.
<b>ISO 4407:2002</b>	Hydraulinestenäytteet, määrittelee puhtaustasot ja partikkelimäärät optisella mikroskoopilla saaduille tuloksille.
<b>ISO 10949:2002</b>	Hydraulikomponentit, määrittelee ohjearvot hydraulikomponenttien puhtaudelle.
<b>ISO 11170:2003</b>	Suodatinelementit, määrittelee suodatinelementille tehtävät kokeet ja testit.
<b>ISO 11171:2010</b>	Hydraulinesteiden puhtaus, määrittelee automaattisen partikkelilaskureiden kalibroinnin.
<b>ISO 11500:2008</b>	Hydraulinesteiden puhtaus, määrittelee valolla toimivien automaattisten partikkelilaskureiden toiminnan.
<b>ISO 11943:1999</b>	Hydraulinesteiden puhtaus, määrittelee automaattisten online-mittareiden kalibroinnin.
<b>ISO 16889:2008</b>	Suodatinelementit, määrittelee multipass- -testin suodattimien testaamiseen.
<b>ISO 18413:2002</b>	Hydraulikomponentit, määrittelee puhtauteen liittyvän tarkastusdokumentaation ja tarkastukseen liittyvät toimenpiteet.
<b>ISO 21018-3:2008</b>	Suodatinelementit, määrittelee suodatinelementin ominaisuuden kestää väsymysvaurioita tilavuusvirran vaihdellessa korkean viskositeetin hydraulinesteillä.
<b>ISO 23181:2007</b>	Suodatinelementit, arvosteluasteikko suodatustehokkuudelle vaihtelevilla hydraulinesteen tilavuusvirroilla.

## LIITE 2: MULTIPASS-MITTAUKSIEN ALKUARVOT 5 µM SUODATTIMELLE

*Taulukko 1. Multipass-mittausten alkuarvot viiden mikrometrin suodattimelle.*

<i>Testinumero ja tunnus: MP = multipass- VV = vaihtuva virtaus</i>	5028 MP Testipöly: Medium Test Dust	5018 VV Testipöly: Medium Test Dust	5031 MP Testipöly: Medium Test Dust	5067 MP Testipöly: Coarse Test Dust	5042 MP Testipöly: Medium Test Dust	5040 MP Testipöly: Fine Test Dust
<i>Järjestelmän gravimetrinen taso [mg/l]:</i>	1	Muuttuva	3	1	1	1
<i>Päätilavuusvir-ta [l/min]:</i>	60	Muuttuva	60	60	20	60
<i>Syöttötilavuus- virran ka. [l/min]:</i>	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25
<i>Poistotilavuus- virran ka. [l/min]:</i>	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25
<i>Lopetus paine-ero [bar]:</i>	1	5	5	0,4	0,1	2
<i>Elementin kuplapiste [mbar]:</i>	30	31	31	27	28	29
<i>Suhteellinenkos- teus RH-%:</i>	56	58	59	19	18	52
<i>Sähkönjohta-vuus [pS/m]:</i>	3860	3190	3430	3750	4180	3620
<i>Testisäiliön tilavuus [l]:</i>	35	40	35	35	7	35
<i>Syöttösäiliön tilavuus [l]:</i>	42 + 8 = 50	42 + 8 = 50	28 + 8 = 36	42 + 8 = 50	42 + 8 = 50	42 + 8 = 50
<i>Beta-arvojen tarkasteluvälin suodattimen paine-eron nousu mittauksen alusta [bar]</i>	0,6 bar Tarkastelu- aika: 300 – 8000 sekuntia	0,7 bar Tarkasteluai- ka tilavuusvirtata sojen keskeltä 5 min	0,6 bar Tarkasteluai- ka: 300 - 3000 sekuntia	0,4 bar 300 s. - Koko mittausjakso	0,1 bar 300 s. - Koko mittausjakso	0,7 bar 300 – 4000 sekuntia

## LIITE 3: MULTIPASS-MITTAUKSIEN ALKUARVOT 10 µM SUODATTIMELLE

*Taulukko 1. Multipass-mittausten alkuarvot kymmenen mikrometrin suodattimelle.*

<i>Testinumero ja tunnus: MP = multipass- VV = vaihtuva virtaus</i>	5026 MP Testipöly: Medium Test Dust	5025 VV Testipöly: Medium Test Dust	5030 MP Testipöly: Medium Test Dust	5033 MP Testipöly: Fine Test Dust
<i>Järjestelmän gravimetrinen taso [mg/l]:</i>	3	Muuttuva	1	1
<i>Päätilavuusvir-ta [l/min]:</i>	60	Muuttuva	60	60
<i>Syöttötilavuus-virran ka. [l/min]:</i>	0,25	0,25	0,25	0,25
<i>Poistotilavuus-virran ka. [l/min]:</i>	0,25	0,25	0,25	0,25
<i>Lopetus paine-ero [bar]:</i>	1	5	5	5
<i>Elementin kuplapiste [mbar]:</i>	30	31	31	25
<i>Suhteellinen kosteus RH-%:</i>	56	58	59	53
<i>Sähkönjohta-vuus [pS/m]:</i>	3860	3190	3430	3400
<i>Testisäiliön tilavuus [l]:</i>	35	40	35	35
<i>Syötösäiliön tilavuus [l]:</i>	42 + 8 = 50	42 + 8 = 50	28 + 8 = 36	35 + 8 = 43
<i>Beta-arvojen tarkasteluvälin suodattimen paine-eron nousu mittauksen alusta [bar]</i>	0,6 bar Tarkastelu-aika: 300 – 8000 sekuntia	0,7 bar Tarkastelu-aika tilavuusvirtatasojen keskeltä 5 min	0,6 bar Tarkastelu-aika: 300 - 3000 sekuntia	0,6 bar Tarkastelu-aika 300 – 4800 sekuntia

## LIITE 4: PARKER LCM20 KALIBROINNIN TULOKSET

*Taulukko 1. Partikkelilaskureiden LCM20 kalibroinnin tulokset.*

<i>Mittaus-laite:</i>	<i>Partikkelikoot [<math>\mu\text{m}(c)</math>]</i>	<i>Part.määrä kpl/10ml MP-Sensori 1.</i>	<i>Part.määrä kpl/10ml MP-Sensori 2.</i>	<i>Partik.määrä kpl/10ml LCM20 V.1</i>	<i>Partik.määrä kpl/10ml LCM20 V.2</i>
<i>Mittaus 1. Puhdas järjestelmä</i>	$\geq 4$	0	1	2	1
	$\geq 6$	0	0	0	0
	$\geq 14$	0	0	0	0
<i>Alkupuhtaus</i>	$\geq 4$	233461	229236	199115	217960
	$\geq 6$	91333	89297	79919	89630
	$\geq 14$	6142	5949	5337	5727
<i>Mittaus 2. Testipöly lisätty</i>	$\geq 4$	231987	228434	195817	215202
	$\geq 6$	89616	87646	78100	87880
	$\geq 14$	5967	5473	4920	5465
<i>Mittaus 3. 5 minuuttia edellisen mittauksen jälkeen</i>	$\geq 4$	231764	227478	194065	216050
	$\geq 6$	89030	87132	76450	87421
	$\geq 14$	5620	5466	4524	5402
<i>Mittaus 4. 10 minuuttia testipölyn lisäämisestä</i>	$\geq 4$	230875	226212	192694	213388
	$\geq 6$	88015	85990	76092	86268
	$\geq 14$	5536	5289	4503	5243

## LIITE 5: TESTIPÖLYJEN KUMULATIIVISET HIUKKASMÄÄRÄT

*Taulukko 1. Testipölyn ISO CTD partikkelikokojakauma.*

<i>ISO 12103-1, A4 COARSE TEST DUST, Sample number 200, 123</i>	
<b>Partikkelikoko <math>\mu\text{m}</math></b>	<b>Näytteen kumulatiivinen tilavuus %, vähemmänkuin</b>
1	0,6
2	2,4
3	4,5
4	6,7
5	9,0
7	13,2
10	18,9
20	35,8
40	59,4
80	87,5
120	97,1
180	99,9
200	100,0

*Taulukko 2. Testipölyn ISO MTD partikkelikokojakauma.*

<i>ISO 12103-1, A3 MEDIUM TEST DUST, Sample number 200, 123</i>	
<b>Partikkelikoko <math>\mu\text{m}</math></b>	<b>Näytteen kumulatiivinen tilavuus %, vähemmänkuin</b>
1	1,1
2	4,6
3	8,3
4	12,4
5	17,2
7	28,3
10	41,2
20	64,5
40	87,9
80	99,3
120	100,0

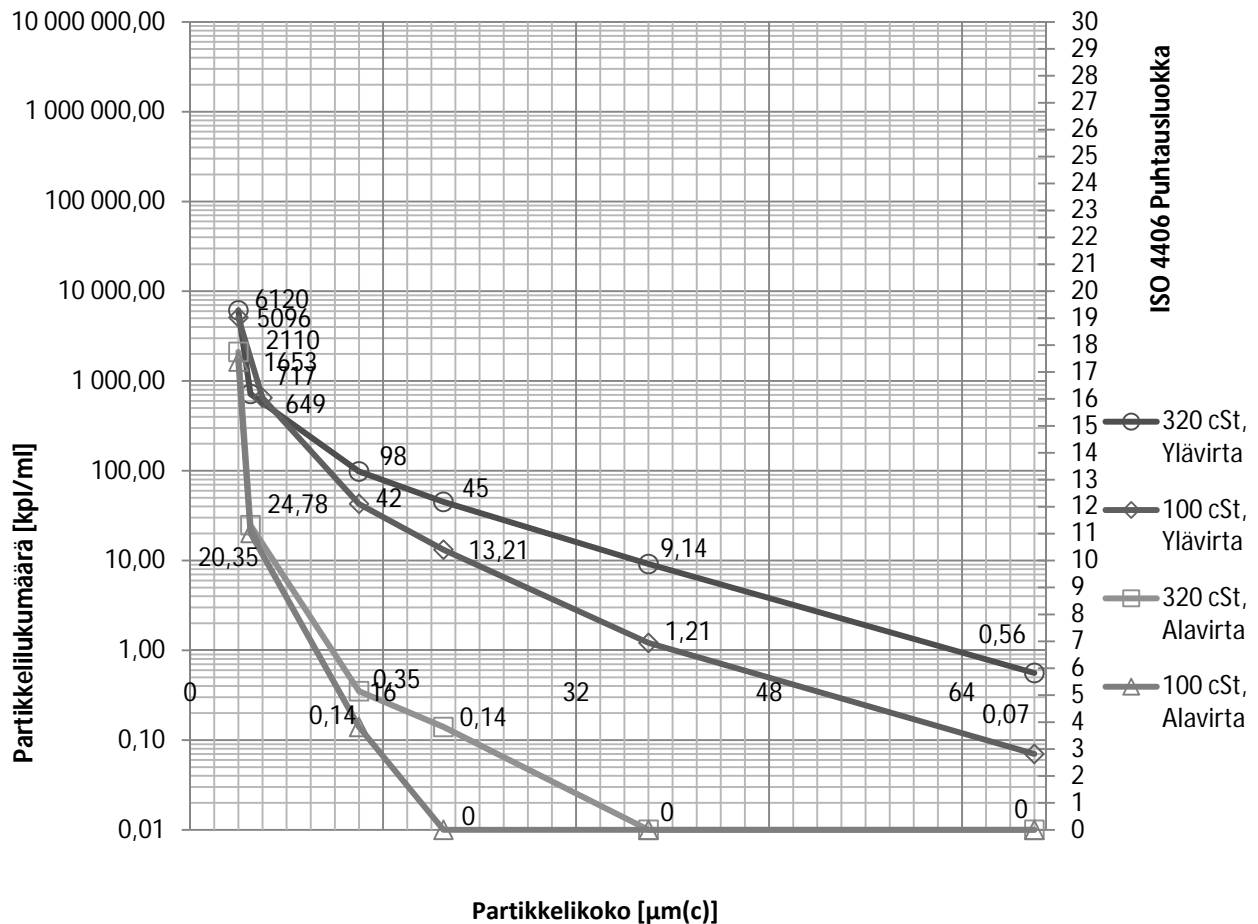
*Taulukko 3. Testipölyn ISO FTD partikkelikokojakauma.*

<i>ISO 12103-1, A2 FINE TEST DUST, Sample number 111</i>	
<b>Partikkelikoko <math>\mu\text{m}</math></b>	<b>Näytteen kumulatiivinen tilavuus %, vähemmänkuin</b>
1	2,9
2	11,1
3	19,9
4	28,2
5	35,3
7	44,4
10	52,4
20	70,4
40	88,7
80	99,8
120	100,0

## LIITE 6: SINGLEPASS- MITTAUKSIEN PUHTAUSLUOKAT JA LIKAKONSENTRAATIOT

*Taulukko 1. Viiden mikronin suodattimen singlepass-mittauksien puhtausluokat.*

Aika [min]	Ylävirran puhtausluokat		Alavirran puhtausluokat	
	150 cSt	220 cSt	150 cSt	220 cSt
0	20/16/13	20/17/14	18/12/7	18/12/7
4	20/16/13	20/17/14	18/12/7	18/12/5
8	20/16/13	20/17/14	18/12/5	18/12/5
12	20/16/13	20/17/14	18/12/4	18/12/2
16	20/16/13	20/17/14	18/12/4	18/12/5
18	20/16/13	20/17/14	18/12/5	18/12/5
20	20/16/13	20/17/14	18/12/2	18/12/5

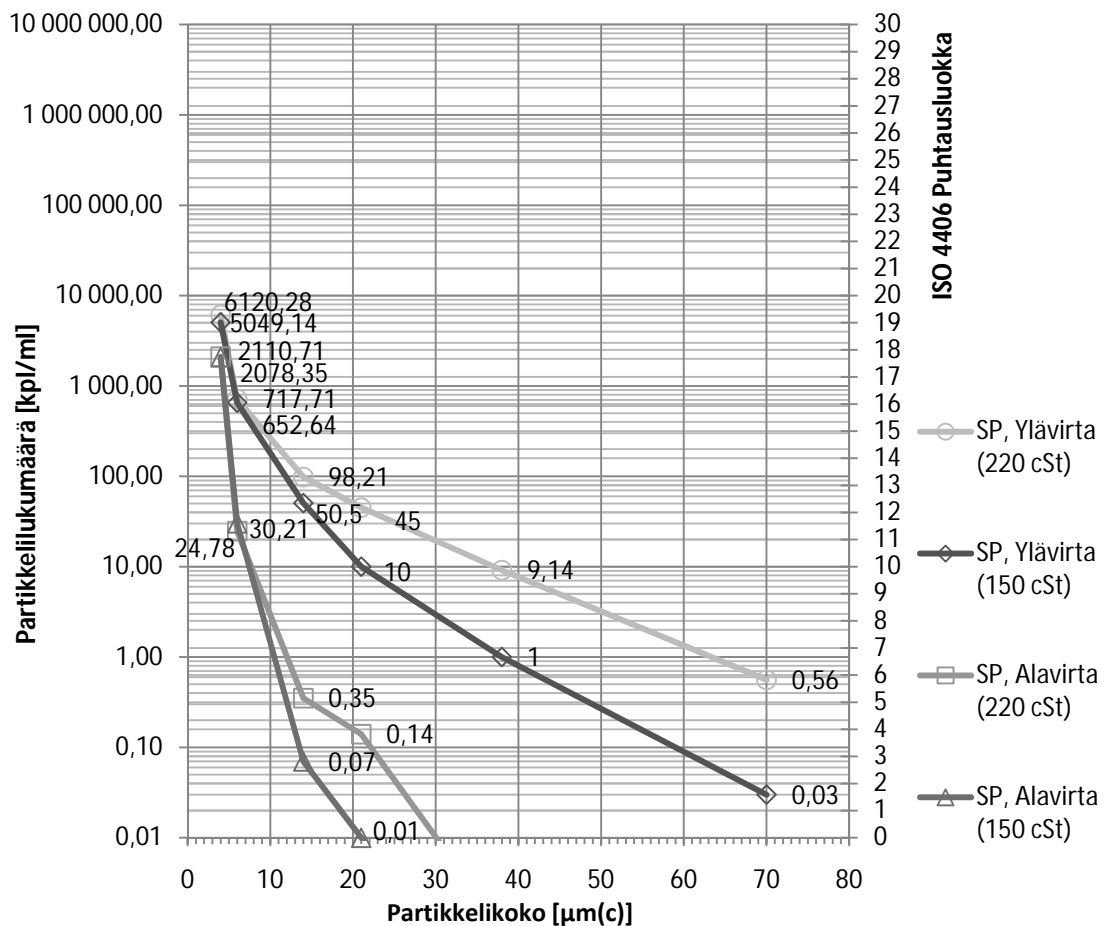


*Kuva 1. Viiden mikronin suodattimen puhtausluokat ja likakonsentraatiot.*

## LIITE 7: SINGLEPASS- MITTAUKSIEN PUHTAUSLUOKAT JA LIKAKONSENTRAATIOT

*Taulukko 1. Puhtausluokat kymmenen mikronin suodattimelle singlepass-mittauksissa.*

Aika [min]	Ylävirran puhtausluokat		Alavirran puhtausluokat	
	100 cSt	320 cSt	100 cSt	320 cSt
0	20/16/13	20/15/11	19/13/5	19/14/4
4	20/16/13	20/15/11	19/13/5	19/14/5
8	20/16/13	20/16/12	18/13/5	19/14/5
12	20/17/13	20/16/12	18/13/3	19/14/5
16	20/16/13	20/16/12	18/13/4	19/14/7
18	20/17/13	20/16/12	18/13/3	19/14/5



*Kuva 1. Kymmenen mikronin suodattimen puhtausluokat ja likakonsentraatiot.*



## LIITE 8: PARKER LCM20 TEKNISET TIEDOT

*Taulukko 1. Partikkelilaskurin LCM20 tekniset tiedot [4]*

Test time	2 minutes
Repeat test time	Every 2 minutes
Principle of operation	Optical scanning analysis and measurement of actual particulates
Particle counts	<b>MTD:</b> 4+, 6+, 14+, 21+, 38+ and 70+ microns <b>ACFTD:</b> 2+, 5+, 15+, 25+, 50+ and 100+ microns
International Codes	ISO 7-22; NAS 0-12; SAE 0-12
Data entry	32 character two line dot matrix LCD. Full alphanumeric entry facility on keypad
Data retrieval	Memory access gives test search facility
Calibration	By recognised on-line methods confirmed by the relevant International Standard Organisation procedures.  <b>MTD</b> – Via a certified primary ISO 11171 automatic particle counter using ISO 11943 principles, with particle distribution reporting to ISO 4406:1999.  <b>ACFTD</b> – Conforming to ISO 4402 principles with particle distribution reported to ISO 4406:1996 with the additional 2 $\mu$ channel included for reference.
Recalibration	Consult Parker
Max. working pressure	420 bar
Max. flow rate	400 l/min when used with System 20 Sensors. Higher with Single Point Sampler (Consult Parker)
Working conditions	The Laser CM20 will operate with the system working normally
Memory store	300 test (scrolling memory) capacity
Computer compatibility	Interface via RS232 connection @ 9600 baud rate
Portability	Weighs only 8kg with its own battery pack
Power requirement	Battery module or via the 12Vdc input
System connection	Via System 20 Inline Sensors or the Single Point Sampler
Printer facility	Integral 16-column printer for hard copy data
Leak-free sampling	System 20 Sensors ensure sealed fluid extraction and no contamination ingress
Certification	This product complies with all relevant EC declarations of conformity.
Rechargeable battery	Standard
Laser CM20 cover	Weatherproof cover (Standard)
Handset cover	Weatherproof cover (Optional extra)

## LIITE 9: VOITELUAINETESTIJÄRJESTELMÄN KOMPONENTTILUETTELO

*Taulukko 1. Voiteluainetestijärjestelmän komponenttiluettelo.*

Nimike	Tyyppi	Valmistaja
1. Testattava suodatin	7005 ja 7006	Parker
2. Puhdistuskiertosuodattimet	FF1302.F005 ja FF7202.F005	Parker
3. Painemittari Paine-eroanturi linjassa Sensoccontrol Paineanturit	PGB.0631.010 692.930007141 SCPT-016-40-07	Parker Huba Control Parker
4. Pääsäiliö 1000 litraa	Kartiopohjainen	Parker
5. Erillinen säiliö 1000 litraa	Kontti	-
6. Prop. määräsäätöventtiili Vastusventtiili Läppäventt. NS100/PN16	TDAE1097E50LAF 9MV400S D10100-33-2AR-4A	Parker Parker Tecalemit
7. Paineenrajoitusventtiili Vastaventtiili Läppäventtiili Lian syötön sulkuhana	DS47A 9C1600S65 J-065AVP-V BVG4-3/8l	Parker Parker Parker Parker
8. Uppokumentaja Lämpömittari Termostaatti Vesijäähdyttävä Termostaattiventtiili	Backer-OM17 A-450-63-81861 TSH01091 DOC77-33 AVTA-20-003N3162	Myer Vastus Wika - Alfa Laval Danforss
9. Pääpumppu (Ruuvi)	SNS940ER42 U12.1-W1	Allweiler
10. Jäähdytyskierron pumppu (Siipi)	PFVH35A35R3FN1	Parker
11. Tilavuusvirtamittaus Vastaventtiili	Anturi P040-750-450-MPC-PAQ-V RDH35LA3C	Helix Parker
12. Partikkelilaskuri Mittausliittimet	LCM20 GMA3/10ZL ja EMA3/1/4/ED	Parker Parker
13. Partikkelilaskuri Mittausliittimet	LCM20 GMA3/10ZL ja EMA3/1/4/ED	Parker Parker

## LIITE 10: LIKAKONSENTRAATION VAIKUTUKSEN MITTAUSTULOKSET

**Taulukko 1.** Likakonsentraation 3g/l vaikutus puhtausluokkiin 10 µm suodattimella.

Aika [min]	Ylävirran puhtausluokat ja partikkelimäärät [kpl/ml]		Alavirran puhtausluokat ja partikkelimäärät [kpl/ml]		Hetkelliset Beta-arvot
0	20/18/14	9054 1375 88	19/14/7	3691 123 0,42	$\beta_4 = 2$ $\beta_6 = 11$ $\beta_{14} = 210$
15	20/16/12	6897 472 25	19/13/0	3378 76 0	$\beta_4 = 2$ $\beta_6 = 6$ $\beta_{14} \geq 1000$
30	20/15/10	6209 20 6,14	19/13/5	3232 61 0,42	$\beta_4 = 2$ $\beta_6 = 3$ $\beta_{14} = 15$
60	20/13/5	5620 66 0,42	19/12/0	3029 39 0	$\beta_4 = 2$ $\beta_6 = 2$ $\beta_{14} \geq 1000$

**Taulukko 2.** Likakonsentraation 6 g/l vaikutus puhtausluokkiin 10 µm suodattimella.

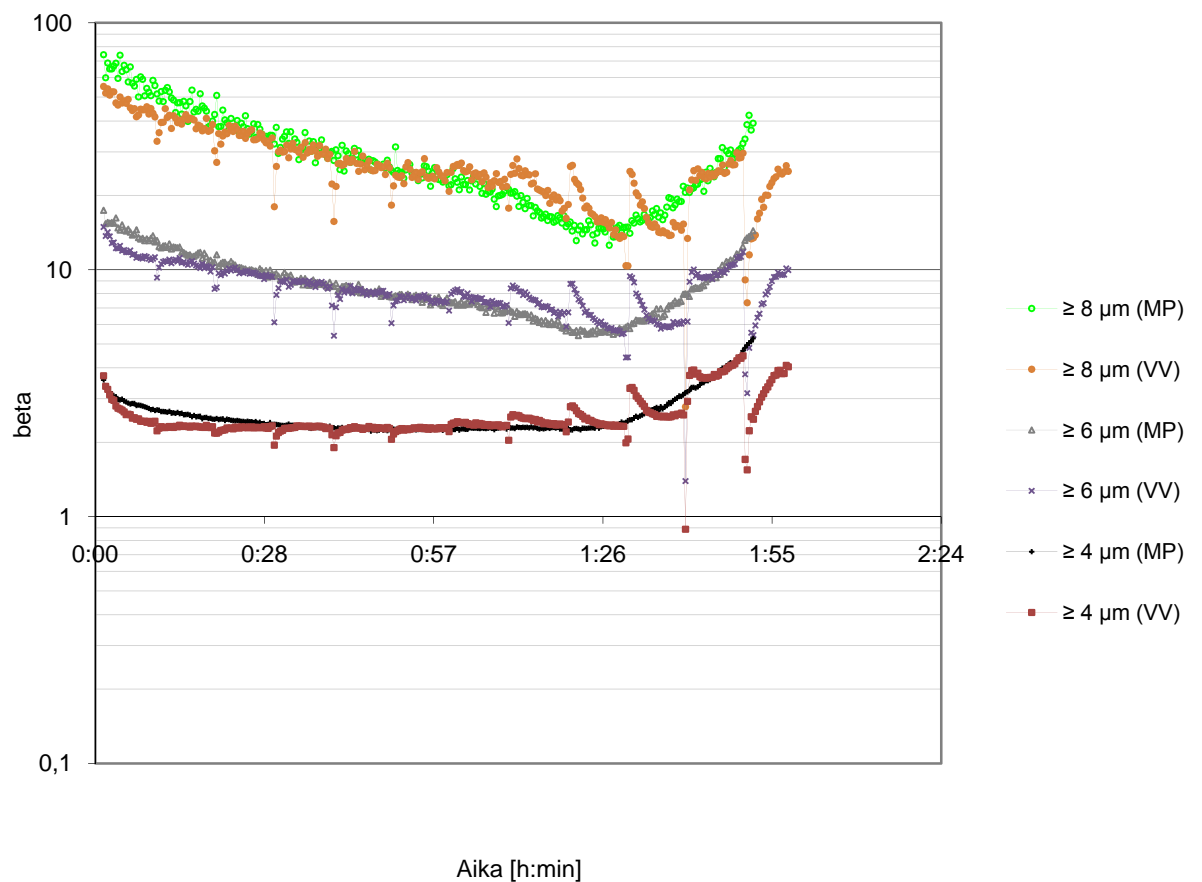
Aika [min]	Ylävirran puhtausluokat ja partikkelimäärät [kpl/ml]		Alavirran puhtausluokat ja partikkelimäärät [kpl/ml]		Hetkelliset Beta-arvot
0	20/19/15	13086 2767 182	19/15/8	4897 233 1,35	$\beta_4 = 3$ $\beta_6 = 12$ $\beta_{14} = 135$
5	20/16/12	7989 518 21	19/14/7	4165 128 0,71	$\beta_4 = 2$ $\beta_6 = 4$ $\beta_{14} = 30$
15	20/14/8	6509 142 1,64	19/13/4	348 63 0,1	$\beta_4 = 2$ $\beta_6 = 3$ $\beta_{14} = 12$
65	20/14/5	6082 85 0,50	19/13/0	3319 50 0	$\beta_4 = 2$ $\beta_6 = 2$ $\beta_{14} \geq 1000$
100	20/13/7	5523 61 0,78	19/12/0	2986 37 0	$\beta_4 = 2$ $\beta_6 = 2$ $\beta_{14} \geq 1000$

**Taulukko 3.** Likakonsentraation 6 g/l vaikutus puhtausluokkiin 5 µm suodattimella.

Aika [min]	Ylävirran puhtausluokat ja partikkelimäärät [kpl/ml]		Alavirran puhtausluokat ja partikkelimäärät [kpl/ml]		Hetkelliset Beta-arvot
0	21/19/15	13744 3903 277	19/14/5	923 96 0,28	$\beta_4 = 5$ $\beta_6 = 170$ $\beta_{14} = 989$
5	21/19/15	11463 2888 205	19/14/5	2769 85 0,28	$\beta_4 = 4$ $\beta_6 = 34$ $\beta_{14} = 732$
10	20/18/14	8493 1658 16	19/13/3	2661 1 0,07	$\beta_4 = 3$ $\beta_6 = 23$ $\beta_{14} = 1657$
30	19/14/10	4079 141 7	18/11/3	1882 16 0,07	$\beta_4 = 2$ $\beta_6 = 9$ $\beta_{14} = 100$
65	19/11/6	3433 19 0,64	18/10/0	167 9,71 0	$\beta_4 = 2$ $\beta_6 = 2$ $\beta_{14} \geq 1000$

## LIITE 11: VAIHTUVAN VIRTAUKSEN JA MULTIPASS- TESTIN BETA-ARVOJEN VERTAILU

*Kuva 1. Kymmenen mikrometrin suodattimen beta-arvojen vertailu*



MP tarkoittaa multipass-testiä

VV tarkoittaa vaihtuvan virtauksen mittausta

## LIITE 12: TESTIPÖLYLIKAKAPASITEETTIIEN VERTAILU

*Kuva 1. Viiden mikrometrin ja kokoluokan A suodattimien paine-eron nousu syötetyn likakonsentraation suhteen.*

