

Taru Saarenmaa

Kuparin vesirakeistus

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri

Materiaali- ja pintakäsittelytekniikka

Opinnäytetyö

18.8.2014

Tekijä(t) Otsikko	Taru Saarenmaa Kuparin vesirakeistus
Sivumäärä Aika	24 sivua + 5 liitettä 18.8.2014
Tutkinto	insinööri (AMK)
Koulutusohjelma	Materiaali- ja pintakäsittelytekniikka
Suuntautumisvaihtoehto	
Ohjaajat	Specialist - Smelting and Modelling Research, Matti Luomala Yliopettaja Kai Laitinen
<p>Opinnäytetyön tarkoituksena oli tutkia rakeistuksen soveltuvuutta kuparin atomisointiin. Työssä perehdyttiin rakeistusta ohjaaviin parametreihin. Parametrien muutosten vaikutusta raekokoon pyrittiin selvittämään.</p> <p>Työssä valmistettiin rakeistukseen sopiva laitteisto. Laitteistoon kuuluva rakeistusallas suunniteltiin ja sen toimivuus testattiin. Työn tavoitteena oli saada rakeistettua kuparia 400 µm, 200 µm ja 100 µm rakeisiin.</p> <p>Teoriaosuudessa kuvataan lyhyesti eri rakeistustekniikoita ja niitä ohjaavia parametreja.</p> <p>Työn kokeellisessa osuudessa selvitetään laboratoriomittakaavan rakeistuksen soveltuvuutta kuparin rakeistukseen. Tampereen Valimoinstituutin Pilot-mittakaavan kokeissa tavoitteena oli jatkaa kokeita isommassa mittakaavassa, sekä tuottaa 400 µm, 200 µm ja 100 µm kupariraetta liuotusta varten.</p> <p>Tehdyissä kokeissa saatiin aikaan haluttuja raekokoja. Pilot-mittakaavan kokeissa laitteiston toimivuus todettiin hyväksi. Ohjausparametreina olivat muun muassa sulan lämpötila ja veden paine. Rakeistuksen ohjausparametreja muuttamalla etsittiin sopivia arvoja halutunkokoisen rakeen saamiseksi. Kokeiden toistojen puutteesta johtuen tulokset ovat suuntaa antavia.</p>	
Avainsanat	Kupari, rakeistus

Author(s) Title	Taru Saarenmaa Water granulation of copper
Number of Pages Date	24 pages + 5 appendices 18 September 2014
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Materials Technology and Surface Engineering
Specialisation option	
Instructor(s)	Matti Luomala, Specialist - Smelting and Modelling Research Kai Laitinen, Principal Lecturer
<p>The purpose of this thesis was to investigate the suitability of granulation for the atomization of copper. The thesis focused on parameters which control granulation. The effect of parameter changes on the grain size was investigated.</p> <p>Instrumentation for granulation was built for the thesis. A granulation pool was designed as part of the instrumentation, and its applicability was tested. The objective was to obtain granulated copper in 400, 200 and 100 μm grains.</p> <p>The theory part briefly describes different granulation techniques and related controlling parameters.</p> <p>In the experimental part, the applicability of granulation with copper was first tested on a laboratory scale. The objective of the testing at the Tampere Foundry Institute was to scale up from laboratory scale to pilot scale and produce 400, 200 and 100 μm copper grains for leaching.</p> <p>The desired grain sizes were produced in the experiments. On the pilot scale, the functionality of the instrumentation was found to be good. Controlling parameters included, for example the temperature of the liquid copper and water pressure. Suitable values of the controlling parameters for the desired grain sizes were explored. The results are tentative due to the lack of repetitions in tests.</p>	
Keywords	Copper, granulation

Sisällys

1	Johdanto	1
2	Rakeistus	2
2.1	Vesirakeistus	2
2.1.1	Vesirakeistuksen parametrit	3
2.1.2	Partikkelikokoon vaikuttavat tekijät vesirakeistuksessa	4
2.2	Kaasurakeistus	5
2.3	Keskipakoisrakeistus	6
3	Vesirakeistuskokeet	7
3.1	Tutkittava materiaali	7
3.2	Rakeistus laboratoriossa	7
3.3	Laboratoriorakeistuksen tulokset	10
3.4	Rakeistus Valimoinstituutissa	10
3.4.1	Rakeistusaltaan suunnittelu ja valmistus	11
3.4.2	Ongelmat ja ratkaisut	17
3.5	Näytekäsitely Valimoinstituutissa	17
3.6	Tutkimustulokset Valimoinstituutin kokeista	18
3.6.1	Veden paineen vaikutus raekokoon	19
3.6.2	Sulan lämpötilan vaikutus raekokoon	21
3.6.3	Muiden koeparametrien vaikutus raekokoon	22
4	Johtopäätökset rakeistustutkimuksesta	23
	Lähteet	24
	Liitteet	
	Liite 1. Laboratoriomittakaavaisen rakeistuksen seula-analyysit	
	Liite 2. Suuttimien tekniset tiedot	
	Liite 3. Seularaportit Valimoinstituutin kokeista	
	Liite 4. Koeparametrien vaikutus kuparirakeiden seulonnan D_{80} -arvoon	
	Liite 5. Koeparametrien vaikutus kuparirakeiden seulonnan D_{50} -arvoon	

1 Johdanto

Insinööriyön ensisijaisena tavoitteena on oppia tuntemaan rakeistuksen mekaniikkaa ja tuottaa jatkotutkimuksia varten rakeista materiaalia, joka sopii liuotukseen. Liuotukseen halutaan mahdollisimman pienikokoista rautaa nopean liukenemisen saamiseksi. Liuotuksen tavoitteena on erottaa kupari sen epäpuhtauksista. Rakeistusprosessin suunnittelu ja toteutus on osa suurempaa projektia. Tutkimuksesta saatuja tietoja voidaan käyttää mahdollisesti pohjana tulevissa kokeissa.

Tutkimuksessa käytettävä materiaali on kuparista valettua harkkoa. Kupariharkosta on tavoite valmistaa kuparirautaa, jonka raekoot ovat noin 100 μm , 200 μm ja 400 μm . Rakeistusta varten valmistetaan vesisuihkuilla varustettu teräsallas. Työn toissijainen tavoite on valmistaa laitteisto ja prosessi Pilot-mittakaavaisen rakeistuksen suorittamiseen. Rakeistusta pyritään ohjaamaan muuttamalla vedenpainetta ja sulan lämpötilaa. Vedenpaineen ja sulan lämpötilan vaikutusta raekokoon pyritään selvittämään.

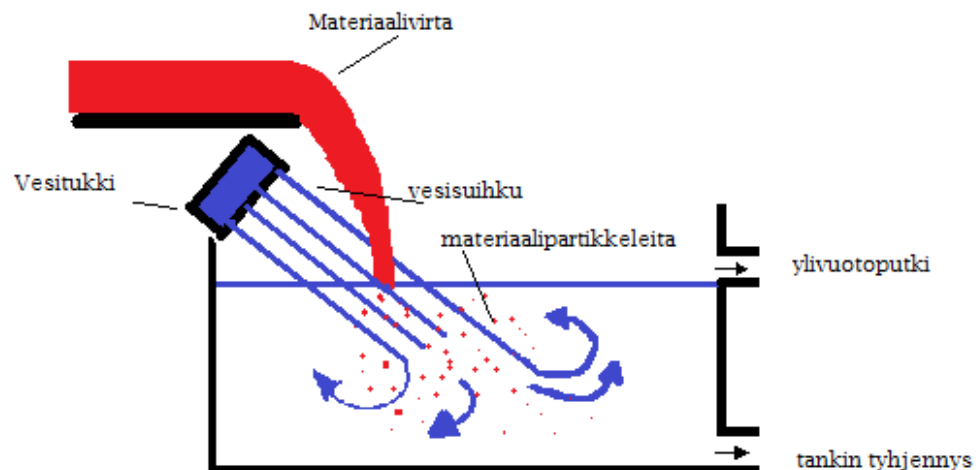
2 Rakeistus

Metalliteollisuudessa rakeistulaitteistot ovat yleisiä. Erilaisten rakeistusprosessien patentointi alkoi vuonna 1970, mutta itse prosessi on jo yli sata vuotta vanha. Erilaisia granulointi- eli rakeistustekniikoita on monia, muun muassa kaasurakeistus, keskipakorakeistus ja vesirakeistus.(1)

2.1 Vesirakeistus

Vesirakeistuksessa rakeistettava metalli sulatetaan induktiouunissa, josta se kaadetaan laskukourua pitkin rakeistusaltaaseen. Sula materiaali jäädytetään käyttämällä korkeapaineista vesisuihkua. Veden suihku murtaa sulan materiaalivirran pieniksi pisaroiksi. Sulan materiaalin ja veden törmäys pyritään saamaan aikaan hieman altaan vesirajan yläpuolella. Skemaattinen esitys vesirakeistusprosessista on kuvassa 1.

Rakeistuksessa materiaalin viskositeetti ja kourun kulma vaikuttavat sulan virtausnopeuteen kourussa. Viskositeettiin voidaan vaikuttaa muun muassa sulan lämpötilaa säätämällä. Sulan virtausnopeus vaikuttaa veden ja sulan törmäyspisteeseen.(1)



Kuva 1.

Skemaattinen esitys vesirakeistusprosessista.

Vesisuihkuun vaikuttavat suuttimet. Suutintyytit voidaan ryhmitellä esimerkiksi materiaalin, käyttösovellusten, nesteen pisaroitumistavan tai muun sellaisen mukaisesti. Yleisin jakoperuste on kuitenkin suihkun muoto, jonka perusteella voidaan jakaa:

- Täyskartiosuuttimet
- Onttokartiosuuttimet
- Pistesuihkusuuttimet
- Viuhkasuuttimet
- Sumutussuuttimet
- Hajotusilmasuuttimet.

Rakeistusaltaissa käytetään yleisesti viuhkasuuttimia, kun halutaan saada aikaan viuhkamainen nestesuihku. Viuhkamuoto saadaan aikaan elliptisellä suuaukolla tai ohjaimella suihku suutinaukon jäljessä olevaan heijastuslevyyn.

Suihkukulmat voivat vaihdella välillä 5–110°. Määritelty kulma on nimelliskulma, joka pätee vain tietyllä paineella ja on näin ollen suuntaa-antava. Paineen lisäksi suihkukulmaan vaikuttavat käytettävä neste, lämpötila, viskositeetti ja pintajännitys.

Suihkukulman lisäksi oleellinen tieto suuttimissa on sen pisarakoko. Pisarakoko ilmoitetaan yleensä pisaran halkaisijana VDM (Volume Median Diameter) - arvona. VDM - arvo kertoo, että puolet suihkutetuista pisaroista on arvoa suurempia ja puolet pienempiä. Pisarakokoon vaikuttavat kapasiteetti, paine ja suutintyyppi.(2)

2.1.1 Vesirakeistuksen parametrit

Rakeistukseen sisältyy useita muuttujia. Rakeistukseen käytettävälle vedelle muuttujat ovat:

- Suuttimien paine
- Vesisuihkun tilavuusvirtaus
- Vesisuihkun geometrisuus
- Veden lämpötila.

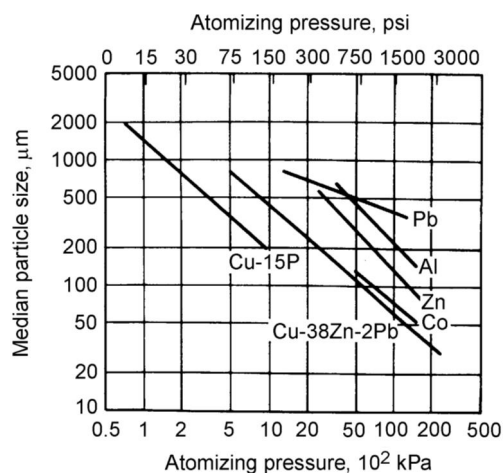
Sulavirtaa säätämällä pystytään vaikuttamaan rakeistuksen onnistumiseen. Säädettäviä muuttujia ovat:

- Viskositeetti
- Pintajännitys
- Lämpötila-alue, jossa materiaali on sulassa olomuodossa
- Sulan materiaalin ominaispaino.

Veden virtauksen tulee olla riittävä, jotta vesi kykenee absorboimaan sulan metallin luovuttaman lämmön, kunnes materiaali on jähmettynyt. Veden voiman ja massan tulee olla riittävä, jotta suihku kykenee hajottamaan metallisulan virtauksen. Veden tilavuuden suhde rakeistettavaan materiaaliin tulisi olla vähintään 10:1, mutta raskailla materiaaleilla voidaan käyttää jopa suhdetta 40:1. (1)

2.1.2 Partikkelikokoon vaikuttavat tekijät vesirakeistuksessa

Rakeistusprosessissa saatujen partikkelien massat ovat suurin piirtein yhtä suuria kuin metallisulan hajottaneiden vesipisaroiden massat. Vedenpaine vaikuttaa vedestä hajautuneiden pisaroiden kokoon ja tämä vaikuttaa sulan jähmettymiseen. Käytännössä partikkelikokoa säädetään suuttimien paineella. Korkeampi paine aiheuttaa suuremman virtauksen ja muuttaa suuttimista tulevien vesipisaroiden hiukkaskokoa. Nämä kontrolloivat kuparin raekokoa. Vedenpaine suhteessa eri metallipulverien raekokoon rakeistuksessa on nähtävissä kuvassa 2.



Kuva 2.

Rakeistettujen metallien raekoko suhteessa veden paineeseen (3)

Veden lämpötila vaikuttaa partikkelikokoon. Kylmällä vedellä rakeistettaessa saadaan pienempiä partikkeleita.(1)

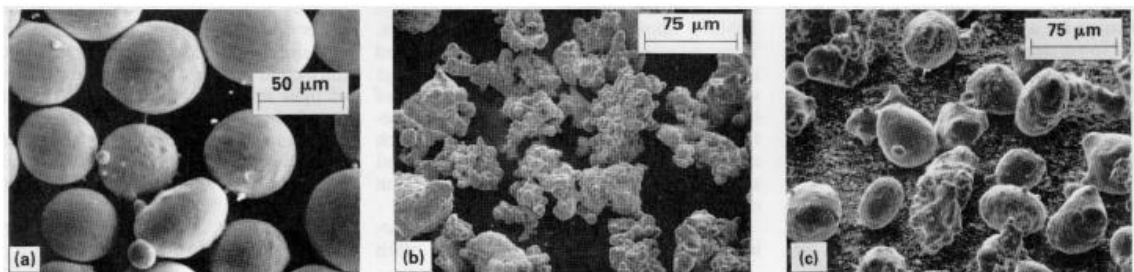
Vesirakeistuksen on havaittu aiheuttavan materiaalin hapettumista.

2.2 Kaasurakeistus

Tyypillinen kaasurakeistussyksikkö on samanlainen kuin vesirakeistussyksikkö. Kaasurakeistus on nestemäisen aineen ja kaasun välinen vuorovaikutusprosessi, jossa nestettä hajotetaan pisaroiksi ohjaamalla nestevirtaan kaasua. Menetelmää on käytetty alkuaan kemian prosessiteollisuudessa muun muassa öljyjen, emulsioiden ja lietteiden rakeistamiseen, myöhemmin esimerkiksi sinkki- ja alumiinisulan pulverointiin. Nykyisin eri modifikaatioita käytetään laajalti teollisuudessa. (4)

Sulatus tapahtuu samalla tavalla sekä kaasu- että vesirakeistuksessa. Sulan virtausnopeuden tulee olla kuitenkin pienempi kuin vesirakeistuksessa. Käytettävät ilmamäärät ovat tyypillisesti 1–14 m³ / min ja ilmanpaineet vaihtelevat välillä 0,2–8,4 MPa. Rakeistuksessa käytettävän kaasun hyötysuhde on heikko, vain 2–4 % käytettävästä kaasusta osuu materiaalivirtaan. Käytössä oleva kaasu kierrätetään tai päästetään ilmakehään. Kaasun kierrätys voi säästää merkittäviä kuluja varsinkin suurissa yksiköissä. Käytettyjä rakeistuskaasuja ovat ilma, typpi, argon ja helium. Argonin ja helium tuottavat tasalaatuisempia rakeita kuin esimerkiksi ilma.

Kaasulla rakeistetut rakeet ovat tyypillisesti pyöreämpiä, sileämpiä ja puhtaampia kuin vesirakeistuksessa rakeistetut rakeet, kuten näkyy kuvasta 3. Sulan metallin parametrit kaasurakeistuksessa ovat samat kuin vesirakeistuksessa. (4,5)



Kuva 3. SEM-kuvia:(a) kaasurakeistettuja kuparirakeita; (b) ja (c) vesirakeistettuja kuparirakeita (3)

2.3 Keskipakoisrakeistus

Keskipakoisrakeistuksessa sulametallivirta hajotetaan keskipakoisvoiman avulla. Muodostuneet rakeet jäädytetään kaasun avulla. Tyypillisimpiä keskipakoisrakeistumenetelmiä ovat puikkorakeistus ja levyrakeistus. Menetelmien tarkkailtavat parametrit ovat samat kuin kaasu- ja vesirakeistuksessa, pois lukien veden ja kaasun puhalluskulmat.

Puikkorakeistuksessa pyörivää vaakatasossa olevaa metallitankoa sulatetaan toisesta päästä. Metallin sulaessa irtoaa keskipakoisvoiman avulla rakeita, jotka jäädytetään kaasulla.

Levyrakeistuksessa sula metalli johdetaan pyörivän levyn pintaan, jolloin metalli rakeistuu mekaanisesti ja lentää keskipakoisvoiman avulla pois. Levyä jäädytetään vedellä ja rakeet jäädytetään esimerkiksi heliumkaasulla.(5)

3 Vesirakeistuskokeet

Kokeita suunniteltaessa selvitettiin mahdollisia paikkoja, joissa koe voitaisiin suorittaa isommassa mittakaavassa. Selvityksen tuloksena päädyttiin suorittamaan kokeet Tampereen Valimoinstituutissa. Rakeistusta päätettiin testata myös laboratoriokokeissa. Rakeistuksen tavoitteena oli saada kupariharkot (kuva 4) rakeistettua, jotta sitä voitaisiin mahdollisimman helposti liuottaa.

3.1 Tutkittava materiaali

Tutkittava materiaali oli laboratoriokokeissa ja Valimoinstituutilla samaa. Kupari oli valettu noin 3–4 kg painaviksi kupariharkoiksi.

Lähtömateriaalin pinnalla oli jonkin verran kuonaa, kuten voi havaita kuvasta 4. Kuonaa kertyi sulatuksen aikana sulan päälle, josta se poistettiin ennen rakeistuksen aloittamista.



Kuva 4. Rakeistettavia kupariharkkoja

3.2 Rakeistus laboratoriossa

Rakeistukset suoritettiin kaatamalla induktiouunissa upokkaassa sulatettu näyte vesiasiaan vesisuihkun päälle. Vesisuihku saatiin aikaan teräsputkenpäähän kiinnitetyllä

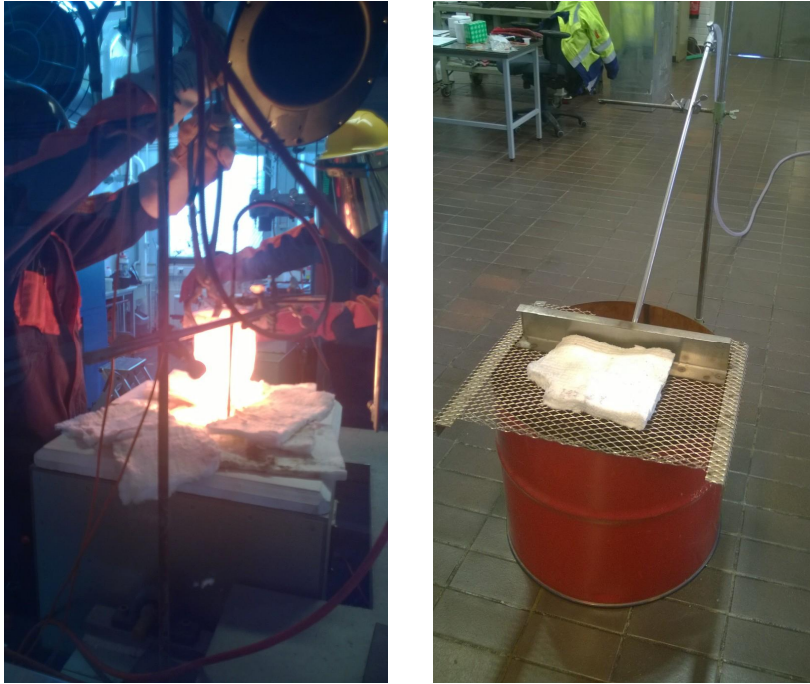
suuttimella (kuva 5). Vesiastia peitettiin teräsverkkolevyllä ja tulen kestäväällä villalla, jotta vältyttiin sularoiskeilta.

Työ aloitettiin keräämällä materiaalin sulatukseen ja rakeistukseen tarvittavat tarvikkeet:

- Peltitynnyri
- Vesiletku
- Putki
- Suutin
- Upokas
- Villaa.

Koelaitteisto koottiin ja päätettiin käyttää suutintyyppiä H1/4U6520 (Suuttimien valinnasta ja teknisistä tiedoista enemmän kohdassa 2.1 ja suuttimen tiedot liitteessä 2, kuvassa 4), jonka avulla vettä suihkusi noin kymmenen litraa minuutissa, kun vesilinjaston paine oli painemittarilla mitattuna 5–6 bar. Suuttimia oli tässä kokeessa käytössä vain yksi.

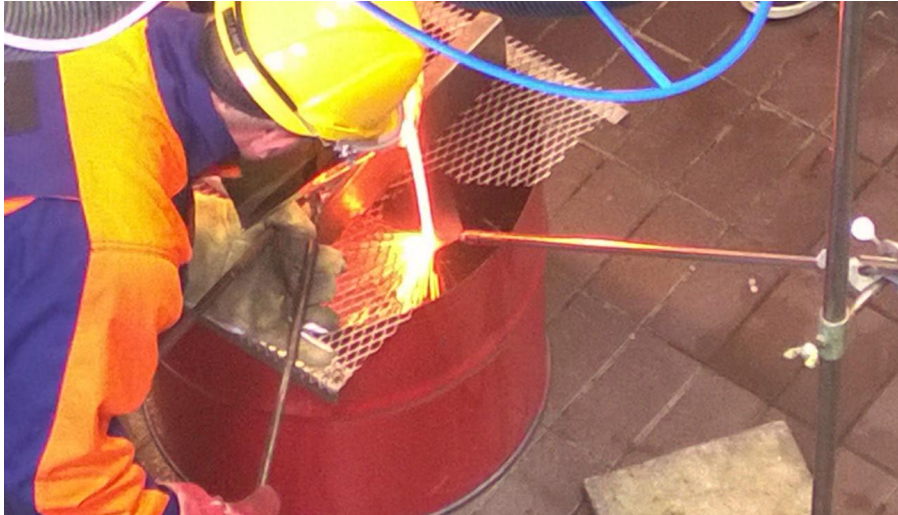
Kupariharkko sulatettiin pienessä laboratoriomittakaavaan sopivassa induktiouunissa alumiinioksidiupokkaassa, jonka nosto uunista on esitetty kuvissa 5 ja 6. Uunin lämpötila ennen ensimmäistä kaatoa oli noin 1250 °C. Asiantuntijan mukaan viskositeetti oli sopiva tässä lämpötilassa (6).



Kuva 5. Upokkaan nosto uunista ja rakeistusallas koelaitteistoiheen

Vesiastiassa, jota käytettiin rakeistusaltaana (kuva 5), oli pohjalla noin 5 cm:n kerros vettä, jotta astia ei kuumene liikaa. Koe aloitettiin avaamalla vesiletkun venttiili. Upokas nostettiin uunista ja sulaa materiaalia kaadettiin vesisuihkuun ohuena tasaisena virtana. Upokas laskettiin teräsverkon päälle, joka toimi laskutasona upokkaalle. Teräsverkkoon oli tehty aukko sulaa virtaa ja vesi suihkua varten (kuva 6). Vedessä olevat kupari-rakeet suodatettiin tiheällä suodatinkankaalla ja kuivattiin lämpökaapissa, jonka lämpötilaksi oli asetettu 105 °C. Koe toistettiin kolme kertaa. Kokeista saatu rakeistettu kupari seulottiin. Seulonta tehtiin 2360 µm, 1180 µm, 850 µm, 425 µm, 210 µm, 105 µm, 74 µm, 44 µm ja 20 µm seuloilla.

Neljännessä kokeessa testattiin hieman suurempaa suutinta (H1/4VV6506, liite 2, kuva 3), mutta vesisuihkuun paine ei riittänyt hajottamaan kuparin virtausta. Kupari valui suoraan astian pohjalle ja rakeistusta ei tapahtunut.



Kuva 6. Sulan kaato vesisuihkuun

3.3 Laboratoriorakeistuksen tulokset

Kokeessa saatiin rakeistettua kuparia. Käytetty suutin oli riittävän pieni, jotta saatiin aikaiseksi riittävä paine. Rakeistetun kuparin seula-analyysit ovat liitteessä 1.

Tulosten perusteella koe yksi ja kolme onnistuivat parhaiten ja niistä saatiin noin 50 % alle 400 μm :n kokoista rautaa. Tästä määrästä noin 25 % oli alle 200 μm ja noin 10% alle 100 μm .

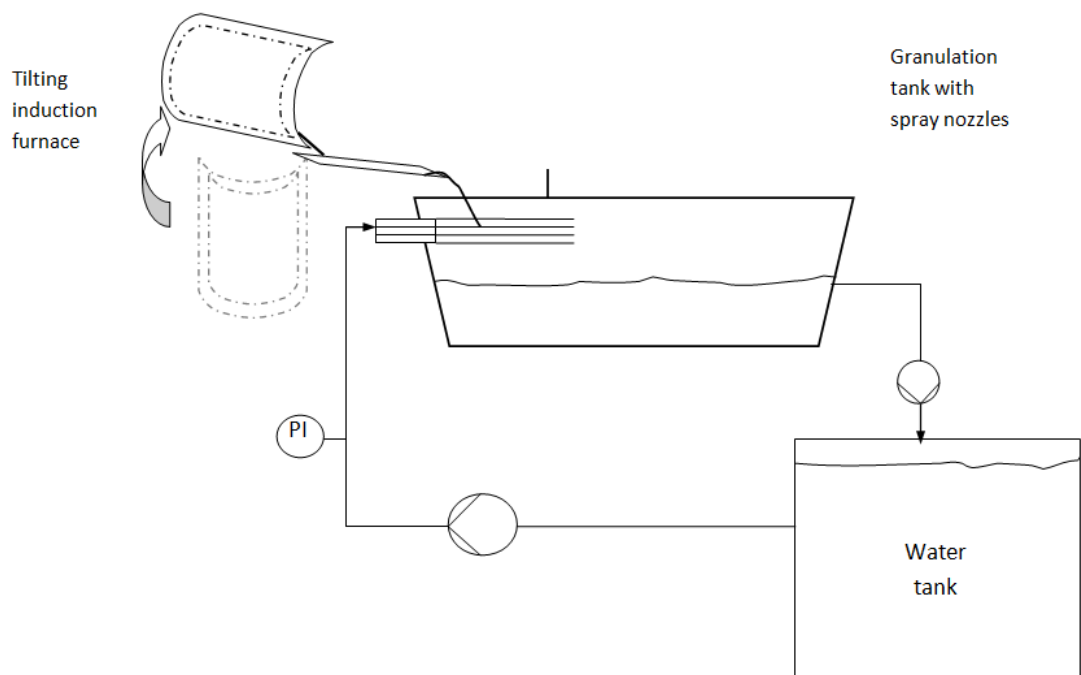
Kokeen suorituksessa oli hyvin ratkaisevaa taito kaataa kupari tasaisena virtana, kuva 6. Tämä aiheutti mahdolliset vaihtelut tuloksissa kokeiden välillä.

3.4 Rakeistus Valimoinstituutissa

Kokeiden toinen osa suoritettiin Tampereen Valimoinstituutissa suuremmissa mittakaavassa. Valimoinstituutti on valimoalan valtakunnallinen koulutus-, tutkimus-, tuotekehitys- ja palveluyksikkö, joka tarjoaa yrityksille ja muille asiakkaille monipuolisia valimotekniikan palveluita. Valimoinstituutilla oli kokeisiin sopiva induktiouuni ja sen käyttöön erikoistunut henkilökunta. Induktiouunia lukuun ottamatta, tarvittava laitteisto piti kuljettaa Tampereelle ennen kokeita. Tarvittavaan laitteistoon kuuluivat muun muassa:

- Rakeistusallas
- Pumppu
- Vesikontti
- Letkut
- Uppopumppu.

Rakeistus suoritettiin kuvassa 7 olevan virtauskaavion mukaisesti.



Kuva 7. Virtauskaavio Valimoinstituutin rakeistuksesta (7)

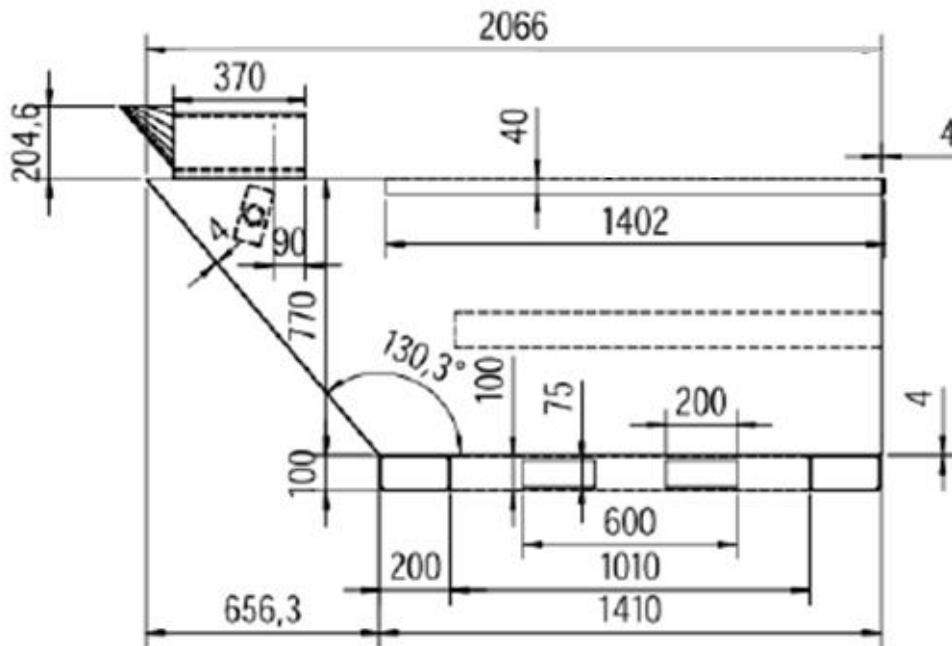
3.4.1 Rakeistusaltaan suunnittelu ja valmistus

Vesirakeistusta varten valmistettiin rakeistusallas. Allas suunniteltiin niin, että sitä voidaan käyttää eri materiaalien rakeistukseen. Altaan tuli olla myös helposti siirrettävä.

Allas valmistettiin ruostumattomasta teräksestä, kuvan 8 mittojen mukaan. Altaaseen asennettiin kansi, joka voidaan poistaa altaan tyhjennyksen ajaksi ja joka estäisi veden roiskumisen. Jalat helpottavat altaan siirtoa trukilla. Altaan alaosaan tuli kaksi noin 100

mm halkaisijaltaan olevaa tyhjennys / täyttöputkea, joiden avulla voidaan tyhjentää, täyttää tai kierrättää tankissa olevaa nestettä.

Tankin yläosaan laitettiin ylivuotoputki, niin että veden pinta ei pääse liian lähelle vesitukin suuttimia.

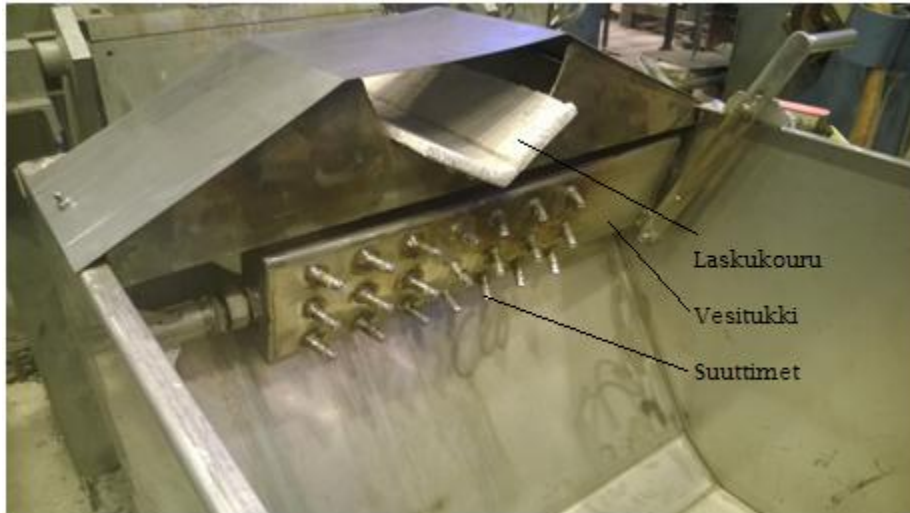


Kuva 8. Rakeistusaltan mitat (8)

Suuttimien valinta

Suuttimia valittaessa otettiin huomioon, että niiden tulee olla vaihdettavia ja niiden määrää pitää pystyä muuttamaan. Puhalluslaatikon kylkeen tehtiin varaus 21 suuttimelle. Tarvittaessa suutinpaikat pystytään sulkemaan ¼" R-ulkokierteellä olevilla umpitulpilla. Vesitukista kuusi suutinpaikkaa suljettiin umpitulpilla, joten käytössä oli 15 suutinta. Altaan suuttimet olivat viuhkasuuttimia.

Suuttimet ovat haponkestävää terästä ja niissä on ¼" R-ulkokierre. Käytössä oli kahdet erilaiset suuttimet. HB1/4U-316SS5015 ja HB1/4VV-316SS5005. Niiden tarkemmat tekniset tiedot löytyvät liitteestä 2. Kuvassa 9 on esitetty valmis vesitukki suuttimien.



Kuva 9. Vesitukki, suuttimet ja laskukouru.

Laskukouru

Laskukourun korkeus oli riippuvainen käytössä olevan uunin kaatokorkeudesta. Tämän vuoksi kaatokourusta tehtiin helposti vaihdettava ja muokattava. Kouru suojattiin alumiinioksidivalulla, joka kestää korkeaa lämpötilaa. Alkuperäisen suunnitelman mukaisia kouruja valmistettiin kaksi kappaletta, joista toista muokattiin Valimo-instituutin induktiounin korkeudelle sopivaksi.

Rakeistuslaitteisto

Rakeistuslaitteisto koostui rakeistusaltaasta, pumpusta, vesikontista ja näiden välillä menevistä letkuista, kuvassa 10 on kuva rakeistuslaitteistosta Valimoinstituutissa. Letkujen kiinnitykset piti olla varmistettuja, koska paine letkuissa kasvoi suureksi, yli 30 bariin. Letkut olivat paineenkestäviä. Vesi saatiin 1000 litran vesikontista.

Laitteisto rakennettiin sulatusuunin eteen niin, että se pystyttiin mahdollisen hätäkaadon aikana siirtämään nopeasti pois tieltä.



Kuva 10. Rakeistuslaitteisto ja uuni Valimoinstituutilla

Käytössä oli induktiouuni, jonka sisällä oli grafiittiupokas. Uunia oli kallistettava, jotta kupari saatiin valumaan kourulle. Kourua lämmitettiin kokeiden välissä kaasupolttimella.

Kokeiden suoritus Valimoinstituutissa

Alkuperäisen koesuunnitelman mukaan tarkoituksena oli tutkia erilaisia kaatonopeuksia, vedenpainetta ja sulan lämpötilaa. Panoksen koko oli 60–90 kg. Kokeiden alkaessa selvisi, että kaatonopeuksiin oli lähes mahdoton vaikuttaa, koska kaato tapahtui hydrauliiikan avulla ilman säätömahdollisuutta, ja siksi kaatoaika pyrittiin pitämään vakiona. Kaatoaika oli noin 100 sekuntia. Veden paineen vaikutusta tutkittiin viidellä eri paineella suuttimilla HB1/4U-316SS5015. Suuttimilla HB1/4VV-316SS5005 tehtiin kaksi koetta, jotta painetta saatiin kasvatettua suuremmaksi. Kuparin loppuessa vesisuihkut katkaistiin.

Ennen jokaista koetta mitattiin lämpötila vesikontissa olevasta vedestä. Rakeistuksen jälkeen lämpötila mitattiin rakeistusaltaassa olevasta vedestä. Veden lämpötilan noustessa yli 50 °C:een lisättiin rakeistusaltaaseen vettä lisäjähdytyksen saamiseksi. Vesi vaihdettiin vesikontissa kokonaan, jos sen lämpötila nousi yli 40 °C.

Rakeistetun kuparin poistaminen altaasta oli haastavaa ja siinä on vielä kehitettävää. Näissä kokeissa altaasta pyrittiin poistamaan ensin vesi. Vesi poistettiin upottamalla tiheällä suodatinkankaalla varustettu uppopumppu altaaseen. Vesi johdettiin takaisin vesikonttiin, josta sitä käytettiin taas seuraavaan kokeeseen. Veden määrä rakeistusaltaassa pyrittiin saamaan mahdollisimman pieneksi, koska loppu vesi poistettiin kupari-rakeen seassa ämpäreihin. Käytössä oli lattian pesuun tarkoitettu lasta, sekä kaksi lumilapiota ja harja. Rakeistettu kupari lastattiin ämpäreihin, joissa se kuljetettiin jatkokäsittelyyn.

Laskukourun tuli olla sulatusuunin kaatonokan alapuolella, jotta kaato olisi mahdollista. Laskukouru oli noin 1100 mm korkeudella, mutta se oli liian korkealla ja sitä laskettiin 50 millimetrillä, ennen kokeiden alkamista. Alkuvalmistelujen jälkeen ensimmäinen panos laitettiin uuniin (kuva 11) ja kokeet oli tarkoitus aloittaa.



Kuva 11. Kuparin sulatus induktiouunissa. Ensimmäinen panostus.

Ensimmäinen koe keskeytettiin nopeasti, sillä sula kupari pääsi tunkeutumaan upokkaan ympärillä olevaan kelaan uunin kauluksen kautta ja uuni sammui automaattisesti. Uunin lämpötila lähti nopeasti laskemaan, joten suoritettiin hätäkaato senkkaan. Uuni meni tämän jälkeen korjattavaksi noin kahdeksi viikoksi.

Korjatulla uunilla saatiin tehtyä päivän aikana kymmenen koetta. Kokeet aloitettiin, kun kupari oli saavuttanut halutun lämpötilan. Tämän jälkeen pumppu käynnistettiin ja ve-

denpaine asetettiin koeohjelmassa määriteltyyn tavoitearvoonsa. Parametrien ollessa kohdallaan, aloitettiin kuparin kaato, joka on kuvattu kuvassa 12.



Kuva 12. Sulan kuparin kaato vesisuihkuun

Toteutuneiden kokeiden parametrit ovat taulukossa 1.

Taulukko 1. Toteutuneet koeparametrit

	Veden paine [bar]	Virtaus- nopeus [l/min]*	Sulan lämpötila [°C]**	Veden lämpötila ennen [°C]	Veden lämpötila jälkeen [°C]	Lämpö- tila ero [°C]
koe 1	20	229.5	1218	10	25.2	15.2
koe 2	20	229.5	1250	20.8	41.8	21
koe 3	20	229.5	1137	28.6	43.3	14.7
koe 4	28	267	1200	28.3	48.4	20.1
koe 5	27	262.5	1200	36.3	47.3	11
koe 6	10	159	1200	35	60.8	25.8
koe 7	20	229.5	1250	22.9	50.2	27.3
koe 8	15	198	1197	35.8	56.2	20.4
koe 9	30	112.5	1200	41.2	71	29.8
koe 10	35	121.5	1200	47.1	64.6	17.5
kokeissa 9 ja 10 käytössä eri suuttimet						
* laskettu arvo						
** mitattu electro nite´s type S- mittarilla						

3.4.2 Ongelmat ja ratkaisut

Kokeet onnistuivat hyvin, muutamaa ongelmaa lukuun ottamatta. Suurimmat ongelmat ja niiden ratkaisut olivat:

- Ensimmäisen kokeen aikana huomattiin kourun olevan noin 10 cm liian lyhyt. Sula kupari valui liian läheltä suuttimia eikä näin osunut kunnolla vesisuihkuun → Kouruun lisättiin ”jatkopala”.
- Toisen kokeen alkaessa kourusta irtosi edellisen ongelman vuoksi asennettu ”jatkopala”. Pala irtosi vain osittain ja ohjasi sulan suuttimien päälle. → Suuttimet vaihdettiin uusiin ja kupari poistettiin. Jatkopala kiinnitettiin paremmin paikoilleen.
- Kokeissa sula kupari ohjautui kourun epätasaisuuden vuoksi oikeaan reunaan. Kupari sintraantui ja aiheutti kuparirakeiden kasautumia altaan oikealle puolelle. → Kasaumat poistettiin rakeistetusta tuotteesta.
- Vesi roiskui suurempia paineita käytettäessä niin että uunilla työskentelevä henkilö kastui → Kaatovipu kauemmas uunista
- Paineensäätö ei ollut automatisoitu → automatisoitava
- Uunin kaatonopeus vaihteli → säätö
- Rakeiden poistaminen haastavaa → parempia menetelmiä kehitettävä

3.5 Näytekäsittely Valimoinstituutissa

Kuparirakeet kuivattiin lämpökaapissa 110 °C:n lämpötilassa ja punnittiin. Kokeissa muodostuneet kasaumat poistettiin kuparin joukosta. Kasaumia oli riippuen kokeesta noin 1–12 % koe-erän painosta.

Sulatuserä jaettiin jakolaitteella kuuteen saman painoiseen erään, kuvassa 13 olevalla jakolaitteella. Näyte-erä syötettiin pyörivään jakolaitteeseen jatkuvana virtana tärylaitteen avulla. Pienemmällä jakolaitteella jaettiin yksi erä edellisestä jaosta kuuteen eri astiaan. Jakolaitteen astiassa oleva näyte edustaa koko erää. Näyte (noin 1300 g–2300 g) lähetettiin seulottavaksi. Seulonta tehtiin 2360 µm, 1180 µm, 850 µm, 425 µm, 210 µm, 105 µm, 74 µm, 44 µm ja 20 µm seuloilla. Seulontaraportit ovat nähtävissä liitteessä 3. Seularaporteissa oleva D_{50} - luku on materiaalin raekoko, jonka 50 % näytteen rakeista läpäisee. D_{80} - luku vastaavasti kertoo materiaalikoon, jonka 80 % näyt-

teen rakeista läpäisee. D_{50} - ja D_{80} - lukujen arvot on taulukossa 2. Näiden lukujen avulla voi vertailla eri parametreilla tehtyjen kokeiden tuloksia.



Kuva 13. Jako- ja seulontalaitteet

Alle $425\ \mu\text{m}$:n kokoisen rakeet menivät jatkotutkimuksiin. Jatkotutkimuksissa kuparista pyrittiin poistamaan liuottamalla sen epäpuhtaudet.

3.6 Tutkimustulokset Valimoinstituutin kokeista

Alkuperäisen suunnitelman mukaan veden paineen ja sulan lämpötilan vaikutusta pyrittiin selvittämään. Kokeiden aikana tarkasteltiin myös veden virtausnopeuden ja rakeistusveden lämpötilan vaikutuksia raekokokoön. Mitatut arvot ovat taulukossa 2.

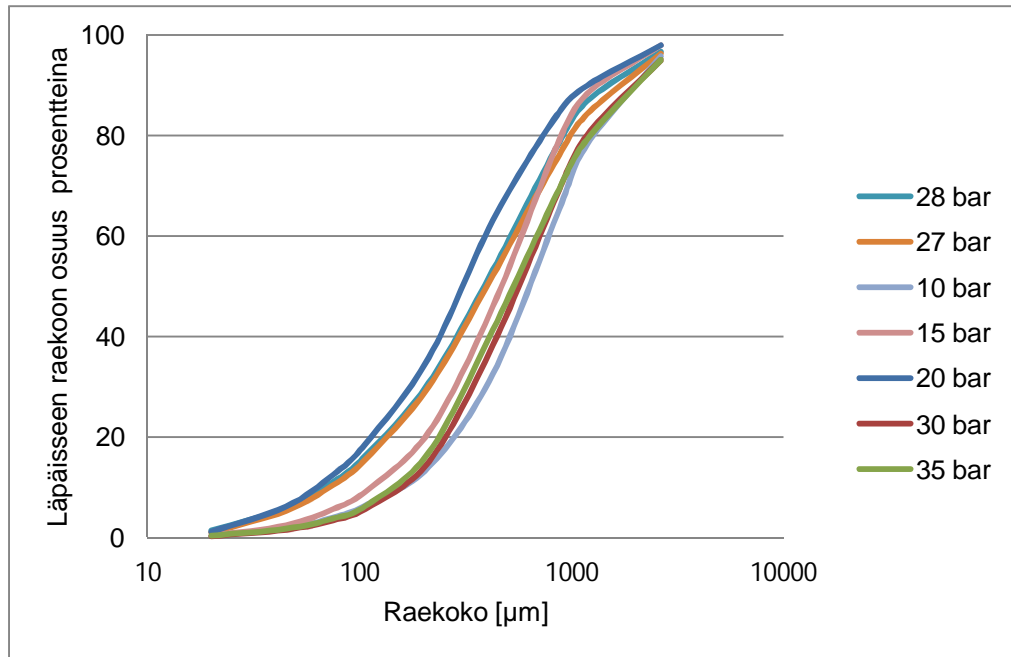
Tavoitteena oli saada aikaiseksi noin $100\ \mu\text{m}$:n, $200\ \mu\text{m}$:n ja $400\ \mu\text{m}$:n kokoista rautaa. Tuloksia tarkastellessa voidaan todeta tavoitteen toteutuneen. Noin 45–50 % rakeesta oli pienempää kuin $400\ \mu\text{m}$, josta noin 20–25 % oli pienempää kuin $200\ \mu\text{m}$ ja noin 10 % pienempää kuin $100\ \mu\text{m}$.

Taulukko 2. Seulonnan tulokset D₅₀- ja D₈₀- lukuina

	Seula D ₅₀ -luku [µm]	Seula D ₈₀ -luku [µm]
koe 1	319	754
koe 2	411	883
koe 3	419	1047
koe 4	392	923
koe 5	402	1114
koe 6	659	1275
koe 7	402	844
koe 8	474	908
koe 9	585	1175
koe 10	550	1218

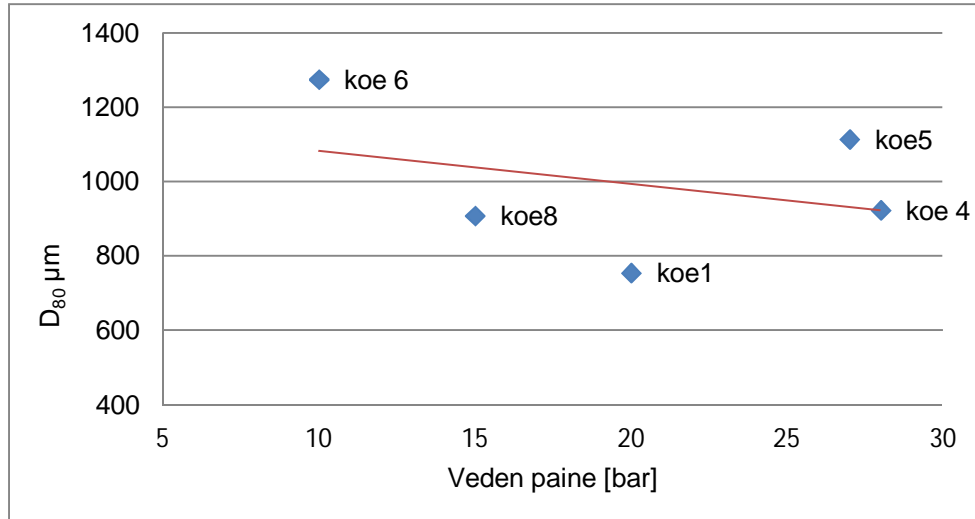
3.6.1 Veden paineen vaikutus raekokoon

Kokeiden mukaan, suuttimella HB1/4U-316SS5015 ja 20 baarin paineella, rakeistus oli parhaimmillaan tavoiteltaessa pientä raekokoa. Paineen vaikutusta rakeiden kokoon voi tarkastella kuvasta 12. Kymmenen baarin paine näyttää näiden kokeiden perusteella tuottavan suurinta raeita. Kuvaa 12 tulkittaessa on otettava huomioon, että muut muuttujat eivät pysyneet täysin samoina. 20 barin kokeista kuvaajaan valittiin pienintä raekokoa tuottanut koe. Paineen nostolla pienemmillä suuttimilla (HB1/4VV-316SS5005), 30 ja 35 bariin, ei saatu merkittäviä muutoksia raekokoihin, kuten ilmenee kuvasta 14.



Kuva 14. Veden paineen vaikutus muodostuneeseen raekokoon

Veden paineen vaikutusta voidaan tarkastella myös D_{80} -luvun avulla kuvasta 15. Kuvan kokeissa sulan lämpötila on noin 1200 °C.

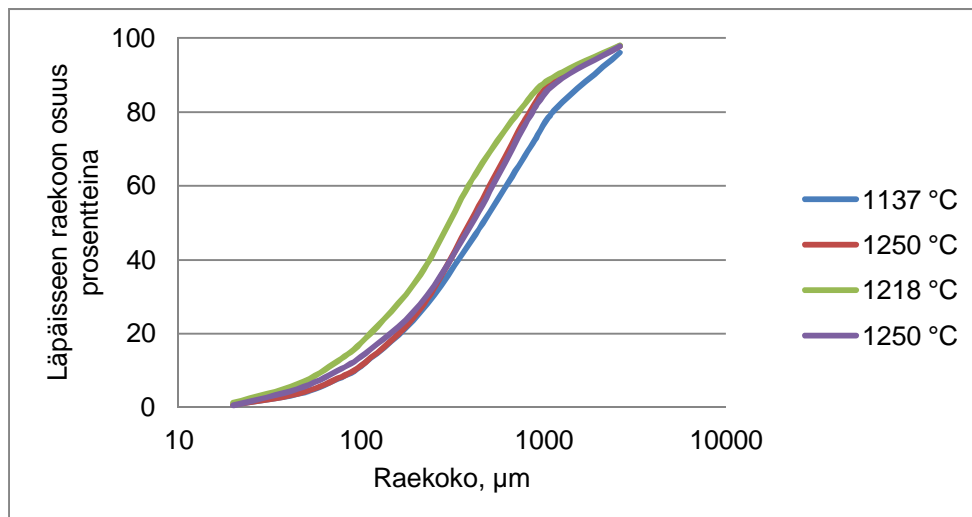


Kuva 15. Veden paineen vaikutus kuparirakeiden seulonnan D_{80} -arvoon

Kokeiden tulokset jäävät suuntaa antaviksi, koska toistoja kokeisiin ei tehty ja kokeisiin liittyi monia epävarmuustekijöitä, kuten kaatonopeuden vakiointi, ajan mittaaminen sekuntikellolla ja paineen säätö manuaalisesti.

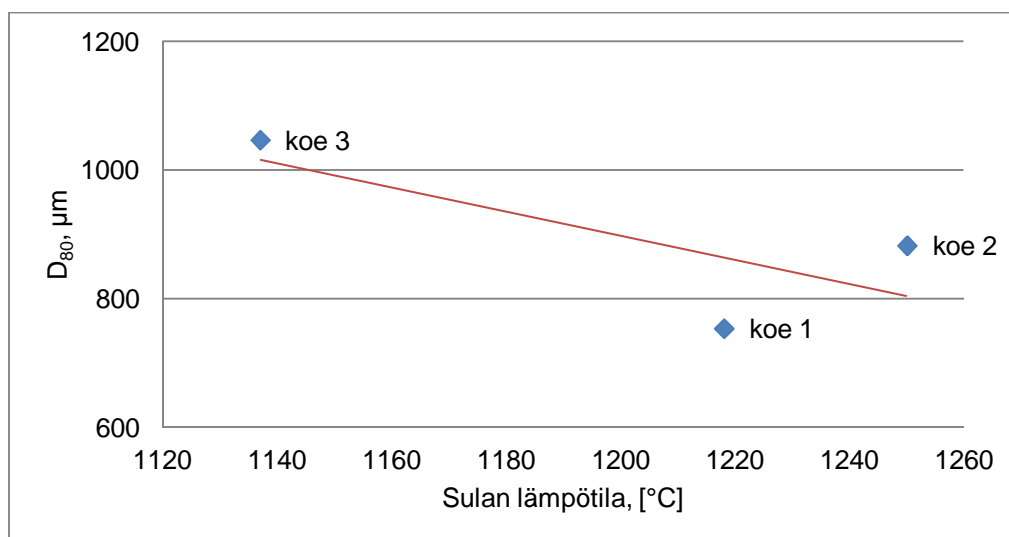
3.6.2 Sulan lämpötilan vaikutus raekokoon

Sulan lämpötilan vaikutusta raekokoon tutkittiin kolmella eri lämpötilalla (1137 °C, 1218 °C, 1250 °C), kuten kuvassa 16 on nähtävissä.



Kuva 16. Sulan lämpötilan vaikutus raekokoon.

Lämpötilaa 1250 °C toistettiin kaksi kertaa. Tulosten perusteella alhaisimmalla lämpötilalla (1137 °C) saatiin suurinta rietta. Lämpötilalla 1218 °C raekoko oli pienintä. Lämpötilan nostolla 1250 °C:n ei saatu pienempää raekokoa näissä kokeissa. Saman asian voi todeta D_{50} - ja D_{80} - jakauman perusteella kuvasta 17 ja liitteestä 5.



Kuva 17. Sulan lämpötilan vaikutus seulonnan D_{80} -arvoon

3.6.3 Muiden koeparametrien vaikutus raekokoon

Sulan lämpötilan ja veden paineen vaikutusta tarkasteltiin luvuissa 3.6.1 ja 3.6.2. Sulan viskositeetin ja pintajännityksen vaikutusta kokeisiin ei tutkittu. Kokeissa käytettiin samaa lähtömateriaalia, joten ominaispainon vaikutusta ei tutkittu. Rakeistusveden lämpötilalla oli liitteen 4 ja 5 kuvaajien mukaan on vaikutusta haluttuun raekokoon. Kylmemmällä vedellä saatiin aikaisiksi pienempää raekokoa. Virtausnopeuden vaikutus on verrattavissa vedenpaineen vaikutukseen. Liitteessä 4 voi tarkastella tämän vaikutusta D_{80} -lukuun ja liitteessä 5 D_{50} -lukuun.

4 Johtopäätökset rakeistustutkimuksesta

Laboratoriomittakaavassa tehtyjen alkukokeiden tulokset antoivat hyvät edellytykset odottaa isomman mittakaavan kokeiden onnistuvan. Ongelmien kautta saimme valimoinstituutin kokeet onnistumaan ja käytössä ollut rakeistusallas osoittautui kokeissa toimivaksi. Altaassa kehitettävää lienee erityisesti rakeiden poistossa ja veden räiskyttämisessä altaasta ulos.

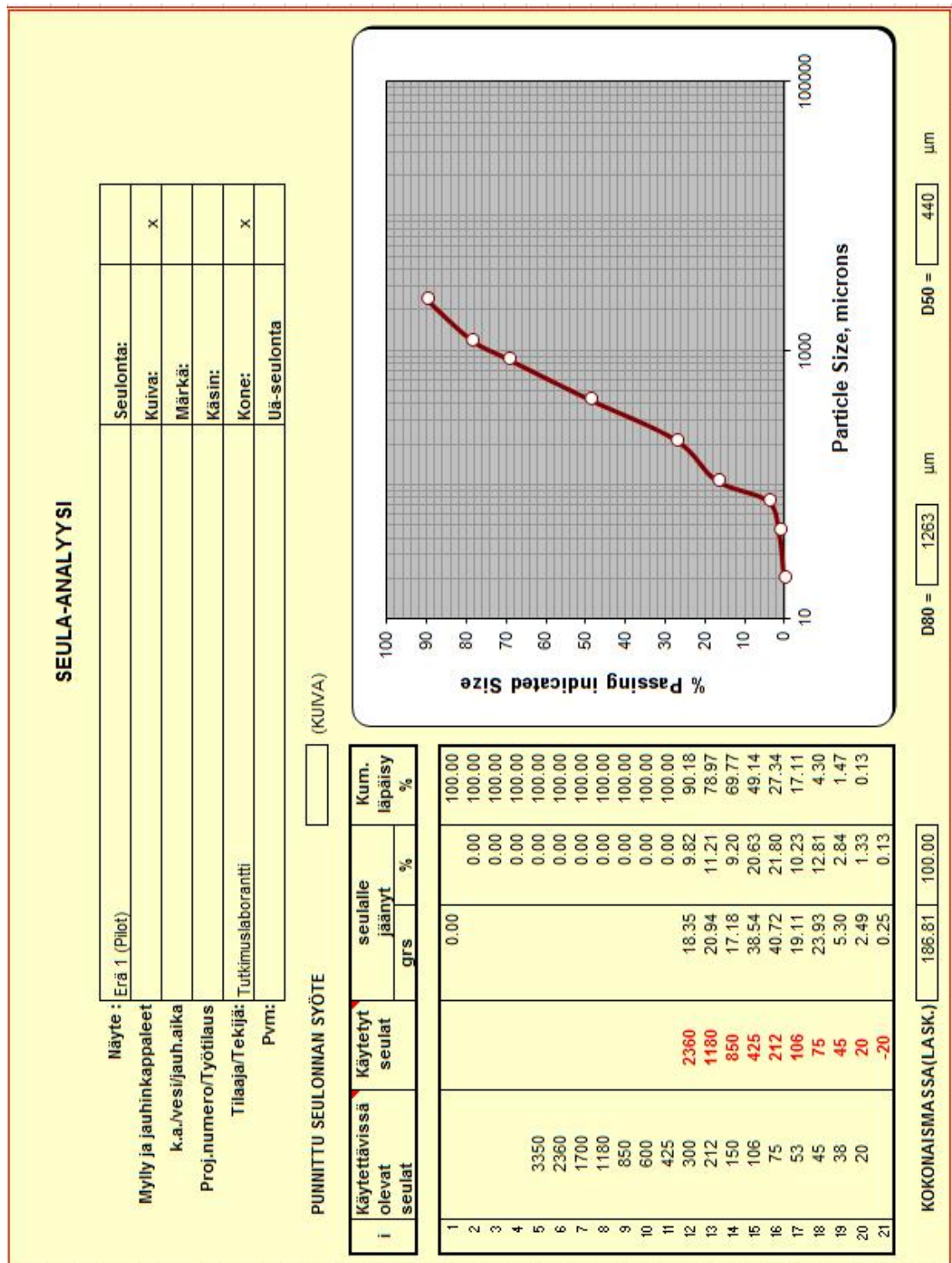
Koesuunnitelma olisi voinut sisältää enemmän toistoja. Tehtyjen tutkimusten perusteella ei voi vielä antaa tarkkoja tuloksia tai päätelmiä, sillä häiriötekijöitä oli kokeissa melko paljon.

Kokeen tarkoitus oli saada aikaan alle 400 µm:n raitta liuostutkimuksiin ja tämä saavutettiin. Lisäksi saatiin informaatiota siitä mitä tulevaisuuden vastaavissa kokeissa kannattaa kokeilla ja millä arvoilla. Seuraavat kokeet on hyvä aloittaa 20 barin paineella ja toistaa kokeita tulosten varmistamiseksi. Koe antoi hyvän pohjan jatkaa tutkimusta rakeistuksen osalta.

Lähteet

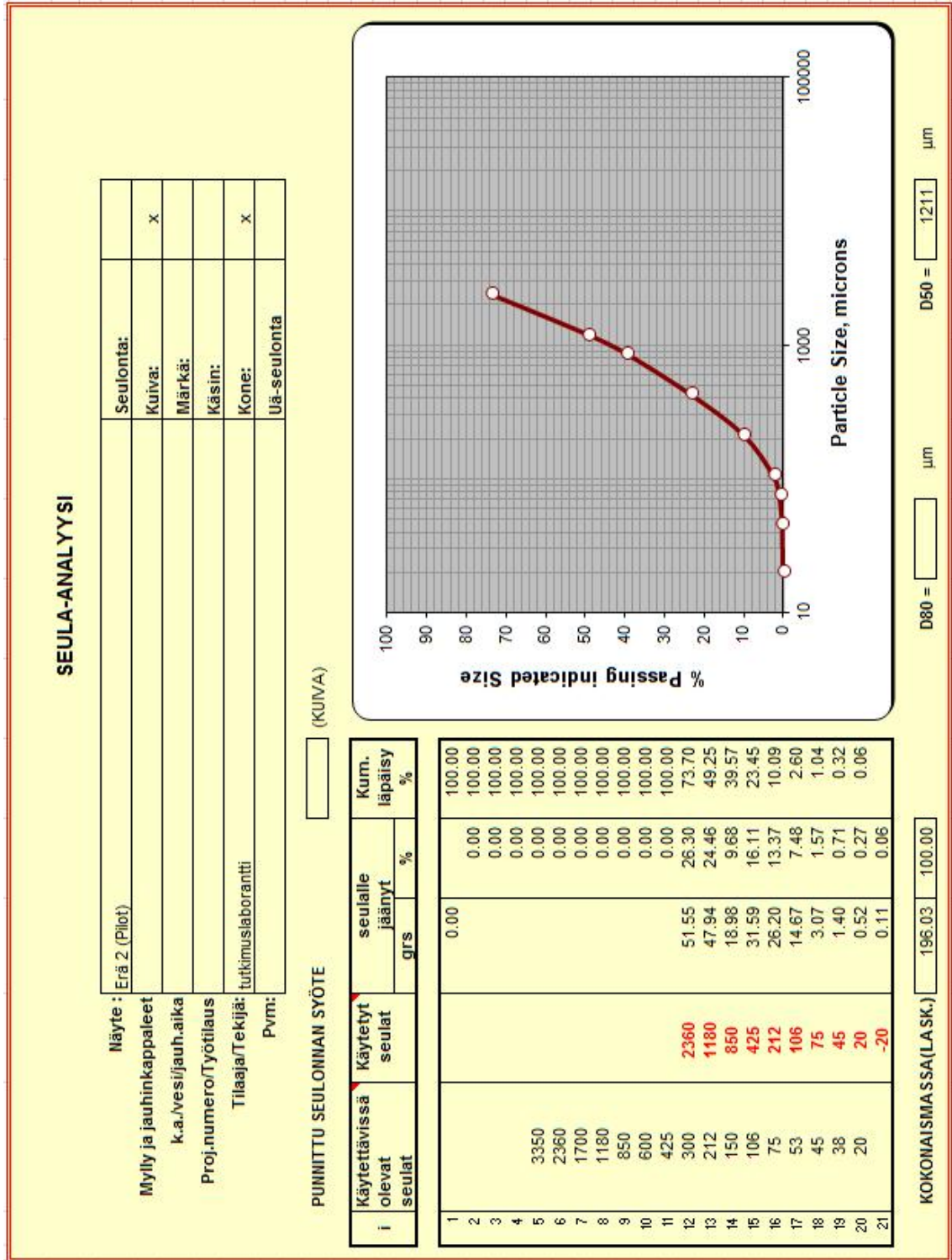
- 1 Outokumpu Research Oy, Raportti 06138-ORC-T, Granulointiteknologia, Luottamuksellinen
- 2 SGN- tekniikka, Suutin - tärkeä osa prosessia, opas. Internet-sivut.
http://www.sgntekniikka.fi/files/sgnieminen/suuttimet/Suutin_tarkea_osa_prosesia.pdf Luettu 16.8.2014
- 3 ASM Handbook, Volume 7, Powder Metallurgy
- 4 Opinnäytetyö, Tuikka Petja, Rakeistuksen raekoon hallinta: Boliden Kokkola Oy, 2013
- 5 Opinnäytetyö, Jorma Harju, Rakeistuksen optimointi, 2000
- 6 Asiantuntijalausunto, Specialist - Smelting and Modelling Research, Matti Luomala.
- 7 Outotec tutkimuskeskus, Raportti 14080-ORC-T, Luottamuksellinen
- 8 Outotec tutkimuskeskus, Raportti 13081-ORC-T, Granule analysis, Luottamuksellinen
- 9 SGN –tekniikka, Spraying Systems Co - suuttimet, esite. Internet-sivut.
<http://www.spray.com/cat70m/index.aspx> Luettu 15.8.2014

Laboratoriomittakaavaisen rakeistuksen seula-analyysit



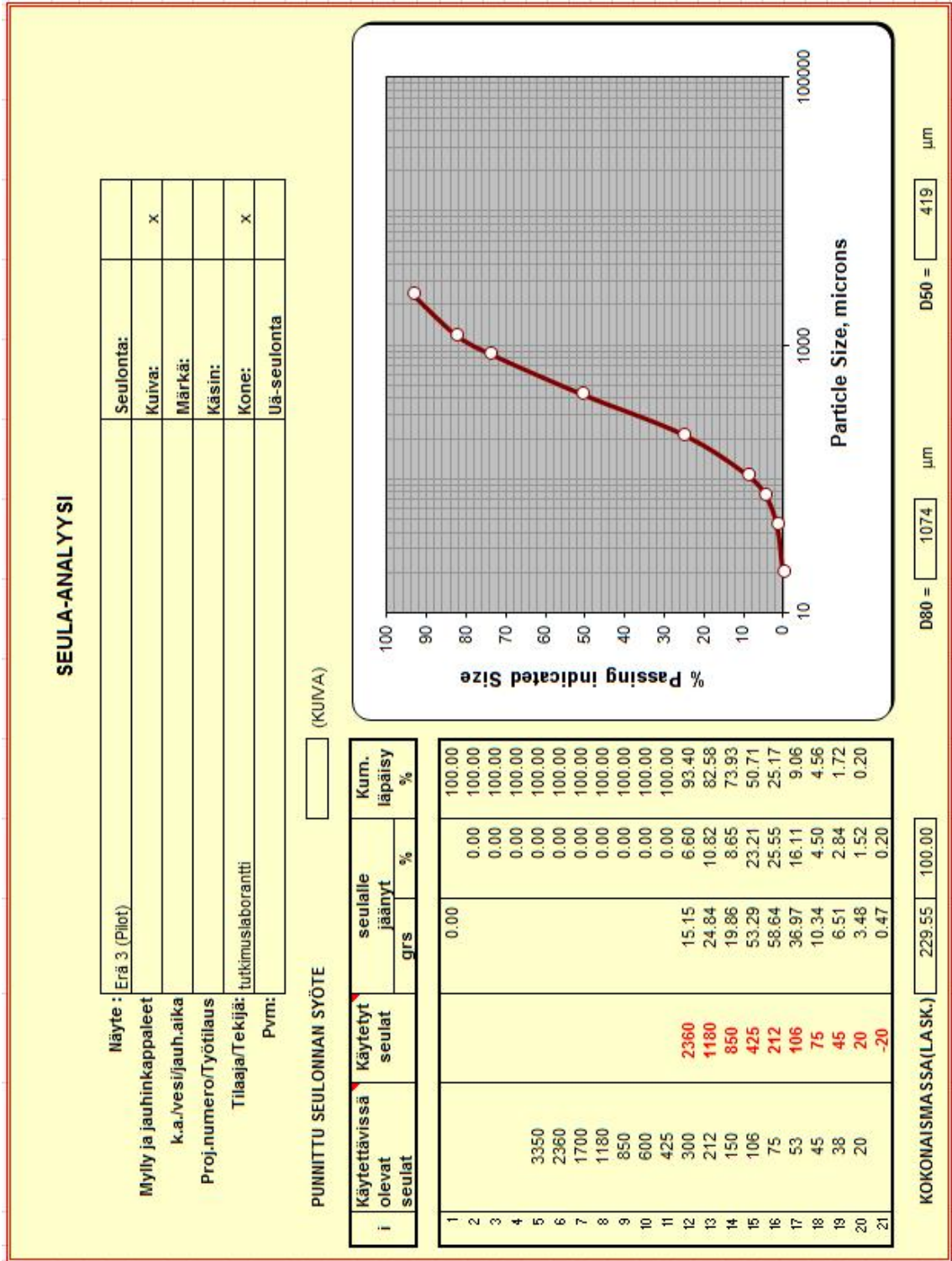
Kuva 1.

Seula-analyysi, Erä 1



Kuva 2.

Seula-analyysi, Erä 2



Kuva 3.

Seula-analyysi, Erä 3

Suuttimien tekniset tiedot (9)

FLAT SPRAY NOZZLES

PERFORMANCE DATA

*At the stated pressure in bar.

Spray Angle at 3 bar	Nozzle Type/ Inlet Conn. (in.)								Capacity Size	Equiv. Orifice Dia. (mm)	Capacity (liters per minute)*															Spray Angle (°)*			
	H-U				H-DU		U				0.4	0.7	1.5	2	3	4	6	7	15	20	35	1.5	3	6	15				
	1/8	1/4	3/8	1/2	3/4	1/8	1/4	1			1-1/4	2																	
65°				●	●					200	8.7	29	38	56	64	79	91	112	121	177	204	270	60	65	67	69			
					●					250	9.5	36	48	70	81	99	114	140	151	221	255	337	60	65	67	69			
					●					300	10.4	43	57	84	97	118	137	168	181	265	306	405	60	65	67	69			
					●					400	12.0	58	76	112	129	158	182	223	241	353	408	539	60	65	67	69			
								●	●		500	13.4	72	95	140	161	197	228	279	302	441	510	674	60	65	66	68		
								●			580	14.5	84	111	162	187	229	264	324	350	512	591	782	61	65	66	68		
50°					●					02	.89	.29	.38	.56	.64	.79	.91	1.1	1.2	1.8	2.0	2.7	3.9	5.0	5.7	6.3			
					●					03	1.1	.43	.57	.84	.97	1.2	1.4	1.7	1.8	2.6	3.1	4.0	4.0	5.0	5.6	6.2			
					●					04	1.3	.58	.76	1.1	1.3	1.6	1.8	2.2	2.4	3.5	4.1	5.4	4.2	5.0	5.6	6.1			
					●					05	1.4	.72	.95	1.4	1.6	2.0	2.3	2.8	3.0	4.4	5.1	6.7	4.4	5.0	5.6	6.1			
					●					055	1.5	.79	1.0	1.5	1.8	2.2	2.5	3.1	3.3	4.9	5.6	7.4	4.4	5.0	5.6	6.1			
					●					06	1.5	.86	1.1	1.7	1.9	2.4	2.7	3.4	3.6	5.3	6.1	8.1	4.5	5.0	5.6	6.0			
					●					07	1.7	1.0	1.3	2.0	2.3	2.8	3.2	3.9	4.2	6.2	7.1	9.4	4.5	5.0	5.6	6.0			
					●					08	1.8	1.2	1.5	2.2	2.6	3.2	3.6	4.5	4.8	7.1	8.2	10.8	4.5	5.0	5.5	6.0			
		●	●	●		●	●			10	2.0	1.4	1.9	2.8	3.2	3.9	4.6	5.6	6.0	8.8	10.2	13.5	4.5	5.0	5.5	5.9			
		●	●	●		●	●			15	2.4	2.2	2.9	4.2	4.8	5.9	6.8	8.4	9.0	13.2	15.3	20	4.5	5.0	5.5	5.9			
		●	●	●	●		●			20	2.8	2.9	3.8	5.6	6.4	7.9	9.1	11.2	12.1	17.7	20	27	4.5	5.0	5.5	5.9			
		●	●	●	●		●			30	3.4	4.3	5.7	8.4	9.7	11.8	13.7	16.8	18.1	26	31	40	4.5	5.0	5.5	5.9			
		●	●	●		●	●			40	3.9	5.8	7.6	11.2	12.9	15.8	18.2	22	24	35	41	54	4.6	5.0	5.4	5.9			
		●	●	●		●				50	4.4	7.2	9.5	14.0	16.1	19.7	23	28	30	44	51	67	4.6	5.0	5.4	5.9			
		●	●	●		●				60	4.8	8.6	11.4	16.8	19.3	24	27	34	36	53	61	81	4.6	5.0	5.4	5.9			
		●	●	●		●				70	5.1	10.1	13.3	19.5	23	28	32	39	42	62	71	94	4.6	5.0	5.4	5.9			
		●	●							80	5.5	11.5	15.3	22	26	32	36	45	48	71	82	108	4.5	5.0	5.3	5.8			
		●								85	5.7	12.3	16.2	24	27	34	39	47	51	75	87	115	4.5	5.0	5.3	5.7			
		●								90	5.8	13.0	17.2	25	29	36	41	50	54	79	92	121	4.5	5.0	5.3	5.6			
		●	●							100	6.2	14.4	19.1	28	32	39	46	56	60	88	102	135	4.4	5.0	5.2	5.4			
		●								110	6.5	15.9	21	31	35	43	50	61	66	97	112	148	4.5	5.0	5.3	5.4			
		●								120	6.7	17.3	23	34	39	47	55	67	72	106	122	162	4.4	5.0	5.3	5.5			
		●								135	7.2	19.5	26	38	44	53	62	75	81	119	138	182	4.5	5.0	5.2	5.5			
	●	●							150	7.5	22	29	42	48	59	68	84	90	132	153	202	4.5	5.0	5.2	5.5				
	●								200	8.7	29	38	56	64	79	91	112	121	177	204	270	4.6	5.0	5.2	5.5				
	●								250	9.7	36	48	70	81	99	114	140	151	221	255	337	4.6	5.0	5.2	5.5				
			●						400	12.0	58	76	112	129	158	182	223	241	353	408	539	4.6	5.0	5.2	5.5				
							●	●		500	13.4	72	95	140	161	197	228	279	302	441	510	674	4.9	5.0	5.1	5.4			
							●			580	14.5	84	111	162	187	229	264	324	350	512	591	782	4.9	5.0	5.1	5.3			
								●		750	16.4	108	143	209	242	296	342	419	452	662	765	1011	4.9	5.0	5.1	5.3			
								●		1000	19.0	144	191	279	322	395	456	558	603	883	1019	1349	4.9	5.0	5.1	5.3			
								●		1500	23.2	216	286	419	484	592	684	838	905	1324	1529	2023	4.9	5.0	5.1	5.2			
								●		2000	26.8	288	381	558	645	790	912	1117	1206	1766	2039	2697	4.9	5.0	5.1	5.2			

Kuva 1.

Suutin HB1/4U-316SS5015

PERFORMANCE DATA

*At the stated pressure in bar.

Spray Angle at 3 bar	Nozzle Type/ Inlet Conn. (in.)						Capacity Size	Equiv. Orifice Dia. (mm)	Capacity (liters per minute)*															Spray Angle (°)*			
	H-W		H-VVL		H-DT				0.4	0.7	1.5	2	3	4	6	7	15	20	35	1.5	3	6	15				
	1/8	1/4	1/8	1/4	1/8	1/4																					
65°	●		●				0017	.28	-	-	.047	.055	.067	.078	.095	.10	.15	.17	.23	44	65	77	86				
	●		●				0033	.38	-	-	.092	.11	.13	.15	.18	.20	.29	.34	.45	47	65	76	83				
	●	●	●	●	●		0067	.53	-	.13	.19	.22	.26	.31	.37	.40	.59	.68	.90	50	65	75	81				
	●	●	●	●	●	●	01	.66	-	.19	.28	.32	.39	.46	.56	.60	.88	1.0	1.3	51	65	74	80				
	●	●	●	●	●		015	.81	-	.29	.42	.48	.59	.68	.84	.90	1.3	1.5	2.0	51	65	74	80				
	●	●	●	●	●	●	02	.89	.29	.38	.56	.64	.79	.91	1.1	1.2	1.8	2.0	2.7	52	65	73	79				
	●		●				025	.99	.36	.48	.70	.81	.99	1.1	1.4	1.5	2.2	2.5	3.4	52	65	73	79				
	●	●	●	●	●	●	03	1.1	.43	.57	.84	.97	1.2	1.4	1.7	1.8	2.6	3.1	4.0	53	65	72	78				
	●	●	●	●	●	●	04	1.3	.58	.76	1.1	1.3	1.6	1.8	2.2	2.4	3.5	4.1	5.4	53	65	72	76				
	●	●	●	●	●	●	05	1.4	.72	.95	1.4	1.6	2.0	2.3	2.8	3.0	4.4	5.1	6.7	53	65	72	76				
	●	●	●	●	●	●	06	1.5	.79	1.0	1.5	1.8	2.2	2.5	3.1	3.3	4.9	5.6	7.4	53	65	72	76				
	●	●	●	●	●	●	07	1.5	.86	1.1	1.7	1.9	2.4	2.7	3.4	3.6	5.3	6.1	8.1	54	65	72	75				
	●	●	●	●	●	●	08	1.7	1.0	1.3	2.0	2.3	2.8	3.2	3.9	4.2	6.2	7.1	9.4	54	65	71	75				
●	●	●	●	●	●	09	1.8	1.2	1.5	2.2	2.6	3.2	3.6	4.5	4.8	7.1	8.2	10.8	55	65	71	74					
●	●	●	●	●	●	09	1.9	1.3	1.7	2.5	2.9	3.6	4.1	5.0	5.4	7.9	9.2	12.1	55	65	71	74					
50°	●	●	●	●	●		01	.66	-	.19	.28	.32	.39	.46	.56	.60	.88	1.0	1.3	37	50	59	65				
	●	●	●	●	●		02	.89	-	.38	.56	.64	.79	.91	1.1	1.2	1.8	2.0	2.7	39	50	57	63				
	●	●	●	●	●	●	03	1.1	.43	.57	.84	.97	1.2	1.4	1.7	1.8	2.6	3.1	4.0	40	50	56	62				
	●	●	●	●	●	●	04	1.3	.58	.76	1.1	1.3	1.6	1.8	2.2	2.4	3.5	4.1	5.4	42	50	56	61				
	●	●	●	●	●	●	05	1.4	.72	.95	1.4	1.6	2.0	2.3	2.8	3.0	4.4	5.1	6.7	44	50	56	61				
	●	●	●	●	●	●	055	1.5	.79	1.0	1.5	1.8	2.2	2.5	3.1	3.3	4.9	5.6	7.4	44	50	56	61				
	●	●	●	●	●	●	06	1.5	.86	1.1	1.7	1.9	2.4	2.7	3.4	3.6	5.3	6.1	8.1	45	50	56	60				
	●	●	●	●	●	●	07	1.7	1.0	1.3	2.0	2.3	2.8	3.2	3.9	4.2	6.2	7.1	9.4	45	50	56	60				
	●	●	●	●	●	●	08	1.8	1.2	1.5	2.2	2.6	3.2	3.6	4.5	4.8	7.1	8.2	10.8	45	50	55	60				
●	●	●	●	●	●	09	1.9	1.3	1.7	2.5	2.9	3.6	4.1	5.0	5.4	7.9	9.2	12.1	45	50	55	59					
40°	●	●	●	●	●		01	.66	-	-	.28	.32	.39	.46	.56	.60	.88	1.0	1.3	26	40	52	59				
	●	●	●	●	●		015	.81	-	-	.42	.48	.59	.68	.84	.90	1.3	1.5	2.0	27	40	52	59				
	●	●	●	●	●	●	02	.89	-	.38	.56	.64	.79	.91	1.1	1.2	1.8	2.0	2.7	29	40	51	58				
	●	●	●	●	●	●	03	1.1	-	.57	.84	.97	1.2	1.4	1.7	1.8	2.6	3.1	4.0	30	40	50	57				
	●	●	●	●	●	●	04	1.3	-	.76	1.1	1.3	1.6	1.8	2.2	2.4	3.5	4.1	5.4	30	40	50	56				
	●	●	●	●	●	●	05	1.4	-	.95	1.4	1.6	2.0	2.3	2.8	3.0	4.4	5.1	6.7	31	40	49	55				
	●	●	●	●	●	●	055	1.5	-	1.0	1.5	1.8	2.2	2.5	3.1	3.3	4.9	5.6	7.4	31	40	49	55				
	●	●	●	●	●	●	06	1.5	-	1.1	1.7	1.9	2.4	2.7	3.4	3.6	5.3	6.1	8.1	31	40	49	55				
	●	●	●	●	●	●	065	1.6	-	1.2	1.8	2.1	2.6	3.0	3.6	3.9	5.7	6.6	8.8	31	40	48	54				
	●	●	●	●	●	●	07	1.7	-	1.3	2.0	2.3	2.8	3.2	3.9	4.2	6.2	7.1	9.4	31	40	48	54				
●	●	●	●	●	●	08	1.8	1.2	1.5	2.2	2.6	3.2	3.6	4.5	4.8	7.1	8.2	10.8	31	40	47	53					
●	●	●	●	●	●	085	1.8	1.2	1.6	2.4	2.7	3.4	3.9	4.7	5.1	7.5	8.7	11.5	32	40	46	50					
●	●	●	●	●	●	09	1.9	1.3	1.7	2.5	2.9	3.6	4.1	5.0	5.4	7.9	9.2	12.1	32	40	46	50					

Kuva 2.

Suutin HB1/4VV-316SS5005

PERFORMANCE DATA

* At the stated pressure in bar.

Spray Angle at 3 bar	Nozzle Type/ Inlet Conn. (in.)						Capacity Size	Equiv. Orifice Dia. (mm)	Capacity (liters per minute)*																Spray Angle (°)*			
	H-VV		H-WL		H-DT				0.4	0.7	1.5	2	3	4	6	7	15	20	35	1.5	3	6	15					
	1/8	1/4	1/8	1/4	1/8	1/4																						
65°	●		●				0017	.28	-	-	.047	.055	.067	.078	.095	.10	.15	.17	.23	44	65	77	86					
	●		●				0033	.38	-	-	.092	.11	.13	.15	.18	.20	.29	.34	.45	47	65	76	83					
	●	●	●	●	●		0067	.53	-	.13	.19	.22	.26	.31	.37	.40	.59	.68	.90	50	65	75	81					
	●	●	●	●	●	●	01	.66	-	.19	.28	.32	.39	.46	.56	.60	.88	1.0	1.3	51	65	74	80					
	●	●	●	●			015	.81	-	.29	.42	.48	.59	.68	.84	.90	1.3	1.5	2.0	51	65	74	80					
	●	●	●	●	●	●	02	.99	.29	.38	.56	.64	.79	.91	1.1	1.2	1.8	2.0	2.7	52	65	73	79					
	●		●				025	.99	.36	.48	.70	.81	.99	1.1	1.4	1.5	2.2	2.5	3.4	52	65	73	79					
	●	●	●	●	●	●	03	1.1	.43	.57	.84	.97	1.2	1.4	1.7	1.8	2.6	3.1	4.0	53	65	72	78					
	●	●	●	●	●	●	04	1.3	.58	.76	1.1	1.3	1.6	1.8	2.2	2.4	3.5	4.1	5.4	53	65	72	76					
	●	●	●	●	●	●	05	1.4	.72	.95	1.4	1.6	2.0	2.3	2.8	3.0	4.4	5.1	6.7	53	65	72	76					
	●				●	●	055	1.5	.79	1.0	1.5	1.8	2.2	2.5	3.1	3.3	4.9	5.6	7.4	53	65	72	76					
	●	●		●	●	●	06	1.5	.86	1.1	1.7	1.9	2.4	2.7	3.4	3.6	5.3	6.1	8.1	54	65	72	75					
●				●	●	07	1.7	1.0	1.3	2.0	2.3	2.8	3.2	3.9	4.2	6.2	7.1	9.4	54	65	71	75						
●	●	●	●	●	●	08	1.8	1.2	1.5	2.2	2.6	3.2	3.6	4.5	4.8	7.1	8.2	10.8	55	65	71	74						
●				●	●	09	1.9	1.3	1.7	2.5	2.9	3.6	4.1	5.0	5.4	7.9	9.2	12.1	55	65	71	74						
50°	●	●	●	●		01	.66	-	.19	.28	.32	.39	.46	.56	.60	.88	1.0	1.3	37	50	59	65						
	●	●	●	●		02	.89	-	.38	.56	.64	.79	.91	1.1	1.2	1.8	2.0	2.7	39	50	57	63						
	●	●	●	●	●	03	1.1	.43	.57	.84	.97	1.2	1.4	1.7	1.8	2.6	3.1	4.0	40	50	56	62						
	●	●	●	●	●	04	1.3	.58	.76	1.1	1.3	1.6	1.8	2.2	2.4	3.5	4.1	5.4	42	50	56	61						
	●	●	●	●	●	05	1.4	.72	.95	1.4	1.6	2.0	2.3	2.8	3.0	4.4	5.1	6.7	44	50	56	61						
	●				●	055	1.5	.79	1.0	1.5	1.8	2.2	2.5	3.1	3.3	4.9	5.6	7.4	44	50	56	61						
	●	●	●	●		06	1.5	.86	1.1	1.7	1.9	2.4	2.7	3.4	3.6	5.3	6.1	8.1	45	50	56	60						
	●	●			●	07	1.7	1.0	1.3	2.0	2.3	2.8	3.2	3.9	4.2	6.2	7.1	9.4	45	50	56	60						
	●	●	●	●		08	1.8	1.2	1.5	2.2	2.6	3.2	3.6	4.5	4.8	7.1	8.2	10.8	45	50	55	60						
●				●	●	09	1.9	1.3	1.7	2.5	2.9	3.6	4.1	5.0	5.4	7.9	9.2	12.1	45	50	55	59						
40°	●	●	●	●	●	01	.66	-	-	.28	.32	.39	.46	.56	.60	.88	1.0	1.3	26	40	52	59						
	●	●	●	●	●	015	.81	-	-	.42	.48	.59	.68	.84	.90	1.3	1.5	2.0	27	40	52	59						
	●	●	●	●	●	02	.89	-	.38	.56	.64	.79	.91	1.1	1.2	1.8	2.0	2.7	29	40	51	58						
	●	●	●	●	●	03	1.1	-	.57	.84	.97	1.2	1.4	1.7	1.8	2.6	3.1	4.0	30	40	50	57						
	●	●	●	●	●	04	1.3	-	.76	1.1	1.3	1.6	1.8	2.2	2.4	3.5	4.1	5.4	30	40	50	56						
	●	●	●	●	●	05	1.4	-	.95	1.4	1.6	2.0	2.3	2.8	3.0	4.4	5.1	6.7	31	40	49	55						
	●	●			●	●	055	1.5	-	1.0	1.5	1.8	2.2	2.5	3.1	3.3	4.9	5.6	7.4	31	40	49	55					
	●	●	●	●	●	06	1.5	-	1.1	1.7	1.9	2.4	2.7	3.4	3.6	5.3	6.1	8.1	31	40	49	55						
	●	●			●	●	065	1.6	-	1.2	1.8	2.1	2.6	3.0	3.6	3.9	5.7	6.6	8.8	31	40	48	54					
	●	●			●	●	07	1.7	-	1.3	2.0	2.3	2.8	3.2	3.9	4.2	6.2	7.1	9.4	31	40	48	54					
	●	●	●	●	●	08	1.8	1.2	1.5	2.2	2.6	3.2	3.6	4.5	4.8	7.1	8.2	10.8	31	40	47	53						
●				●	●	085	1.8	1.2	1.6	2.4	2.7	3.4	3.9	4.7	5.1	7.5	8.7	11.5	32	40	46	50						
●	●			●	●	09	1.9	1.3	1.7	2.5	2.9	3.6	4.1	5.0	5.4	7.9	9.2	12.1	32	40	46	50						

Kuva 3.

Suutin H1/4VV6506

PERFORMANCE DATA

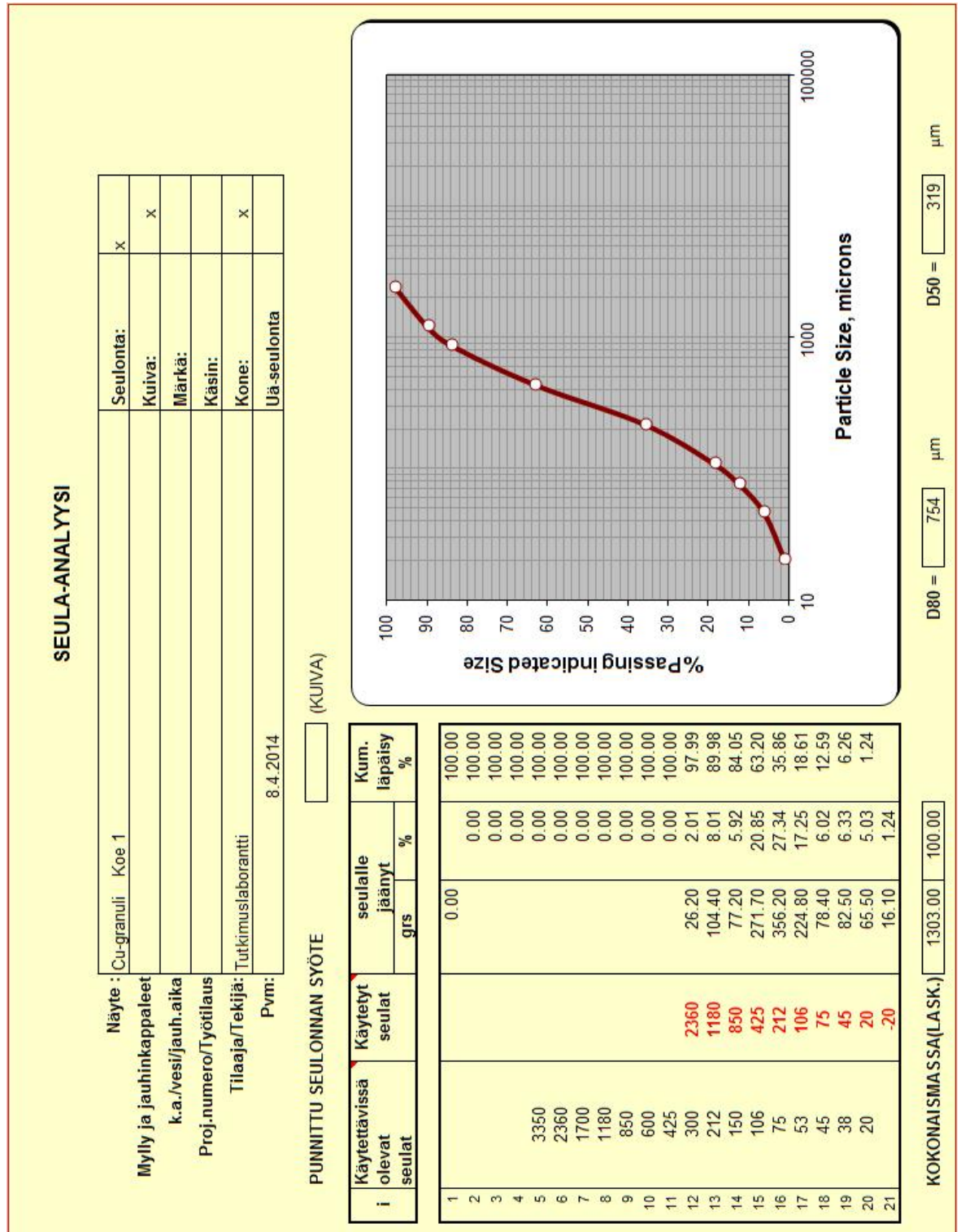
*At the stated pressure in bar.

Spray Angle at 3 bar	Nozzle Type/ Inlet Conn. (in.)										Capacity Size	Equiv. Orifice Dia. (mm)	Capacity (liters per minute)*															Spray Angle (°)*			
	H-U					H-DU		U					Capacity (liters per minute)*															Spray Angle (°)*			
	1/8	1/4	3/8	1/2	3/4	1/8	1/4	1"	1-1/4	2"			0.4	0.7	1.5	2	3	4	6	7	15	20	35	1.5	3	6	15				
110°	•										20	2.8	2.9	3.8	5.6	6.4	7.9	9.1	11.2	12.1	17.7	20	27	105	110	117	118				
95°	•	•				•	•				10	2.0	1.4	1.9	2.8	3.2	3.9	4.6	5.6	6.0	8.8	10.2	13.5	89	95	100	105				
	•	•				•	•				15	2.4	2.2	2.9	4.2	4.8	5.9	6.8	8.4	9.0	13.2	15.3	20	90	95	100	105				
	•	•	•				•				20	2.8	2.9	3.8	5.6	6.4	7.9	9.1	11.2	12.1	17.7	20	27	90	95	100	105				
	•	•				•	•				30	3.4	4.3	5.7	8.4	9.7	11.8	13.7	16.8	18.1	26	31	40	91	95	101	105				
	•	•	•				•				40	3.9	5.8	7.6	11.2	12.9	15.8	18.2	22	24	35	41	54	92	95	100	105				
	•	•				•					50	4.4	7.2	9.5	14.0	16.1	19.7	23	28	30	44	51	67	93	95	99	103				
	•	•	•				•				60	4.8	8.6	11.4	16.8	19.3	24	27	34	36	53	61	81	93	95	99	103				
	•	•	•				•				70	5.2	10.1	13.3	19.5	23	28	32	39	42	62	71	94	93	95	99	103				
	•	•									80	5.5	11.5	15.3	22	26	32	36	45	48	71	82	108	93	95	99	102				
	•	•									100	6.2	14.4	19.1	28	32	39	46	56	60	88	102	135	93	95	99	102				
•	•									150	7.5	22	29	42	48	59	68	84	90	132	153	202	93	95	99	102					
•	•									400	12.0	58	76	112	129	158	182	223	241	353	408	539	93	95	99	102					
80°	•	•	•	•		•	•				10	2.0	1.4	1.9	2.8	3.2	3.9	4.6	5.6	6.0	8.8	10.2	13.5	73	80	84	87				
	•	•				•	•				15	2.4	2.2	2.9	4.2	4.8	5.9	6.8	8.4	9.0	13.2	15.3	20	74	80	83	86				
	•	•	•	•		•	•				20	2.8	2.9	3.8	5.6	6.4	7.9	9.1	11.2	12.1	17.7	20	27	74	80	83	86				
	•	•	•	•		•	•				30	3.4	4.3	5.7	8.4	9.7	11.8	13.7	16.8	18.1	26	31	40	74	80	83	86				
	•	•	•	•		•	•				40	3.9	5.8	7.6	11.2	12.9	15.8	18.2	22	24	35	41	54	74	80	83	86				
	•	•	•			•					50	4.4	7.2	9.5	14.0	16.1	19.7	23	28	30	44	51	67	74	80	83	85				
	•	•	•			•					60	4.8	8.6	11.4	16.8	19.3	24	27	34	36	53	61	81	75	80	83	85				
	•	•	•			•					70	5.2	10.1	13.3	19.5	23	28	32	39	42	62	71	94	75	80	83	86				
	•	•									100	6.2	14.4	19.1	28	32	39	46	56	60	88	102	135	75	80	83	86				
	•	•									150	7.5	22	29	42	48	59	68	84	90	132	153	202	73	80	84	86				
•	•									200	8.7	29	38	56	64	79	91	112	121	177	204	270	74	80	82	85					
•	•									400	12.0	58	76	112	129	158	182	223	241	353	408	539	78	80	81	83					
•	•									500	13.4	72	95	140	161	197	228	279	302	441	510	674	78	80	81	83					
•	•									580	14.5	84	111	162	187	229	264	324	350	512	591	782	78	80	81	83					
65°	•	•	•			•	•				10	2.0	1.4	1.9	2.8	3.2	3.9	4.6	5.6	6.0	8.8	10.2	13.5	56	65	71	74				
	•	•									12	2.1	1.7	2.3	3.4	3.9	4.7	5.5	6.7	7.2	10.6	12.2	16.2	56	65	71	73				
	•	•	•	•		•	•				15	2.4	2.2	2.9	4.2	4.8	5.9	6.8	8.4	9.0	13.2	15.3	20	56	65	70	73				
	•	•				•	•				20	2.8	2.9	3.8	5.6	6.4	7.9	9.1	11.2	12.1	17.7	20	27	57	65	70	73				
	•										25	3.1	3.6	4.8	7.0	8.1	9.9	11.4	14.0	15.1	22	25	34	57	65	69	73				
	•	•	•			•	•				30	3.4	4.3	5.7	8.4	9.7	11.8	13.7	16.8	18.1	26	31	40	58	65	69	72				
	•	•	•			•	•				40	3.9	5.8	7.6	11.2	12.9	15.8	18.2	22	24	35	41	54	59	65	68	72				
	•	•	•	•			•				50	4.4	7.2	9.5	14.0	16.1	19.7	23	28	30	44	51	67	60	65	68	71				
	•	•	•	•			•				60	4.8	8.6	11.4	16.8	19.3	24	27	34	36	53	61	81	60	65	68	71				
	•	•	•	•			•				70	5.2	10.1	13.3	19.5	23	28	32	39	42	62	71	94	60	65	68	71				
•	•									100	6.2	14.4	19.1	28	32	39	46	56	60	88	102	135	58	65	69	70					
•	•									150	7.5	22	29	42	48	59	68	84	90	132	153	202	59	65	68	70					

Kuva 4.

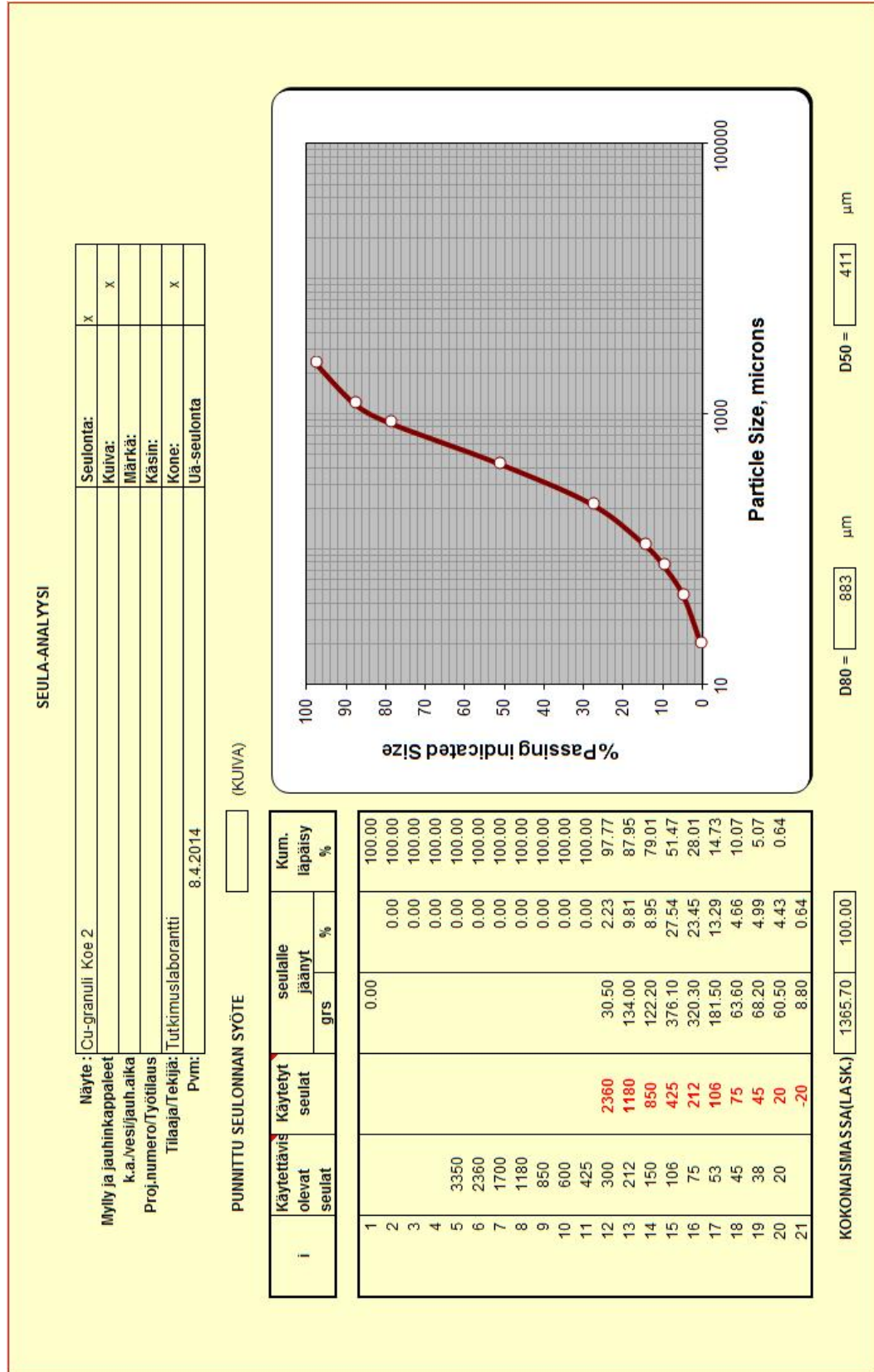
Suutin H1/4U6520

Seularaportit Valimoinstituutin kokeista



Kuva 1.

Koe 1, seularaportti



Kuva 2.

Koe 2, seularaportti

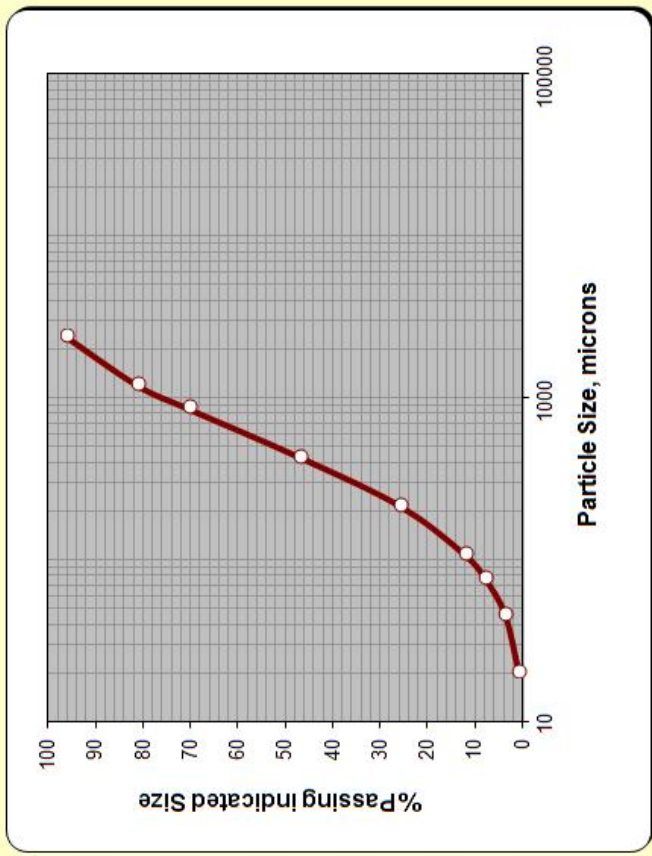
SEULA-ANALYYSI

Näyte : Cu-granuli Koe 3 Mylly ja jauhinkappaleet k.a./vesi/jauh.aika Proj.numero/Työtilaus Tilaaja/Tekijä: Tutkimuslaborantti Pvm: 9.4.2014	Seulonta: x Kuiva: x Märkä: Käsin: Kone: x Ula-seulonta
---	--

PUNNITTU SEULONNAN SYÖTE (KUIVA)

i	Käytettäv olevat seulat	Käytetyt seulat	seulalle jäänyt		Kum. läpäisy %
			grs	%	
1			0.00		100.00
2				0.00	100.00
3				0.00	100.00
4				0.00	100.00
5	3350			0.00	100.00
6	2360			0.00	100.00
7	1700			0.00	100.00
8	1180			0.00	100.00
9	850			0.00	100.00
10	600			0.00	100.00
11	425			0.00	100.00
12	300	2360	56.30	3.97	96.03
13	212	1180	212.90	15.00	81.03
14	150	850	150.60	10.61	70.42
15	106	425	333.50	23.50	46.92
16	75	212	300.70	21.19	25.74
17	53	106	192.60	13.57	12.17
18	45	75	62.00	4.37	7.80
19	38	45	58.60	4.13	3.67
20	20	20	40.40	2.85	0.82
21		-20	11.70	0.82	

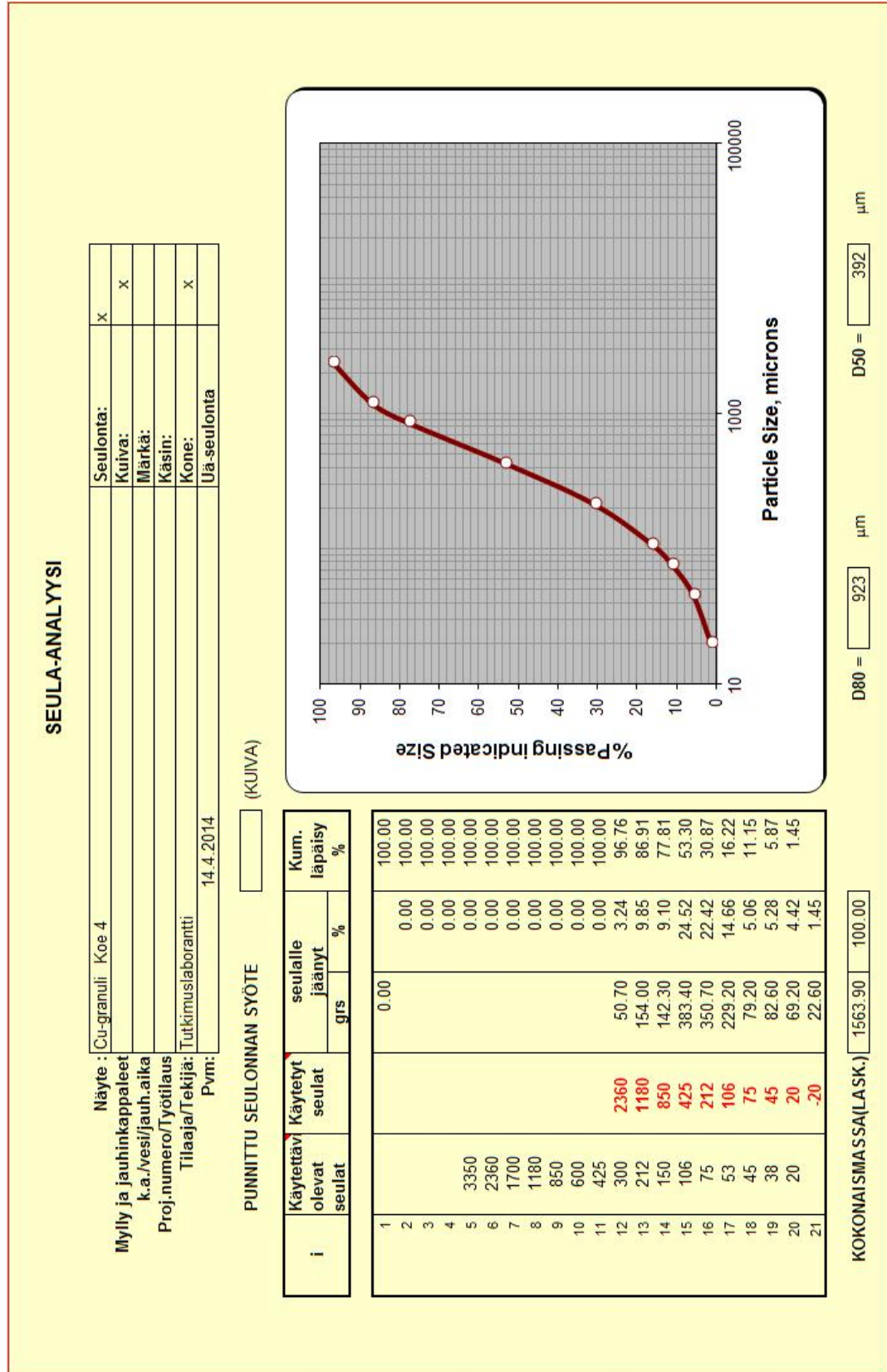
KOKONAISMASSA(LASK.) 1419.30 100.00



D80 = 419 μm D50 = 1047 μm

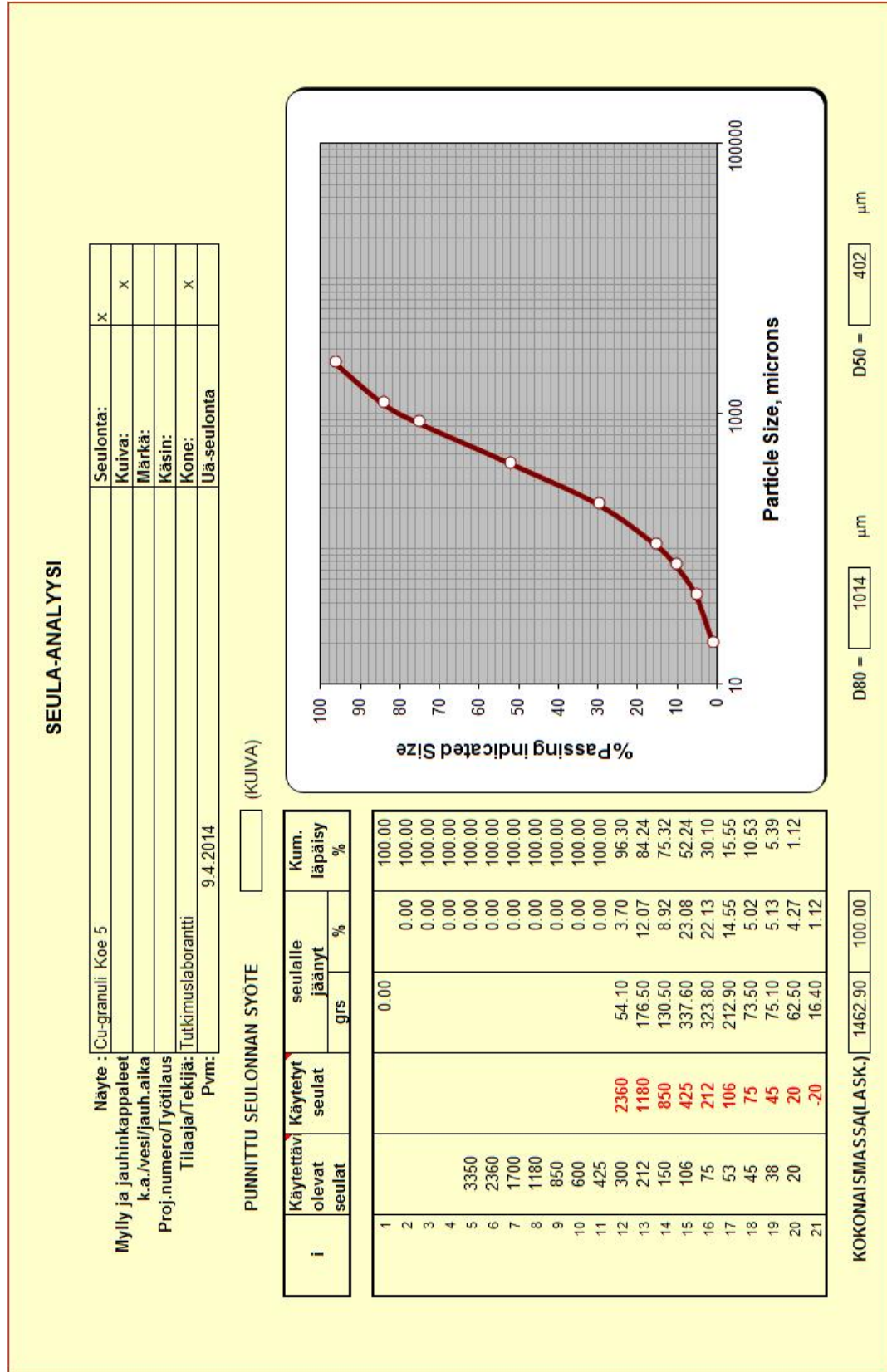
Kuva 3.

Koe 3, seularaportti



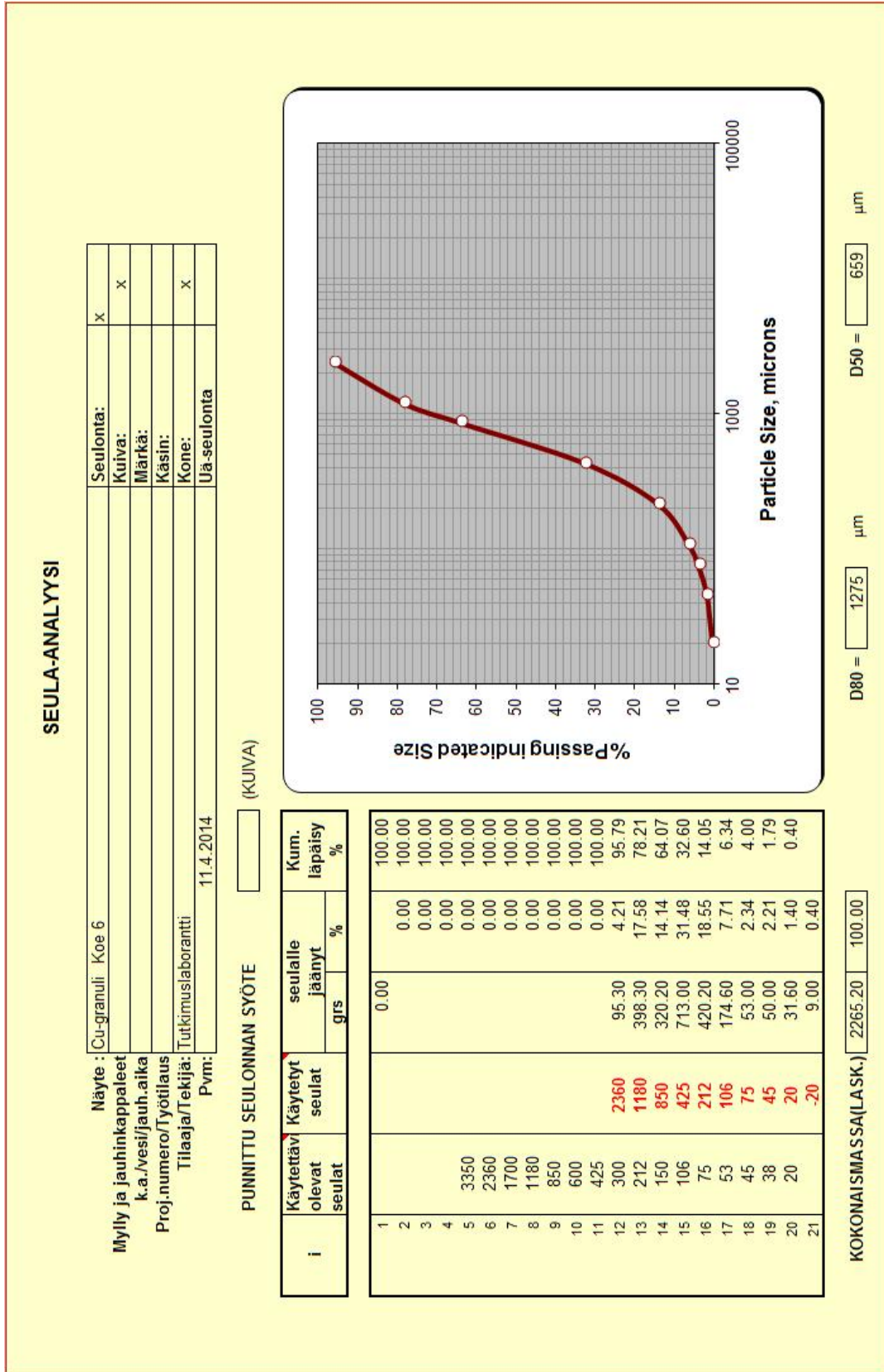
Kuva 4.

Koe 4, seularaportti



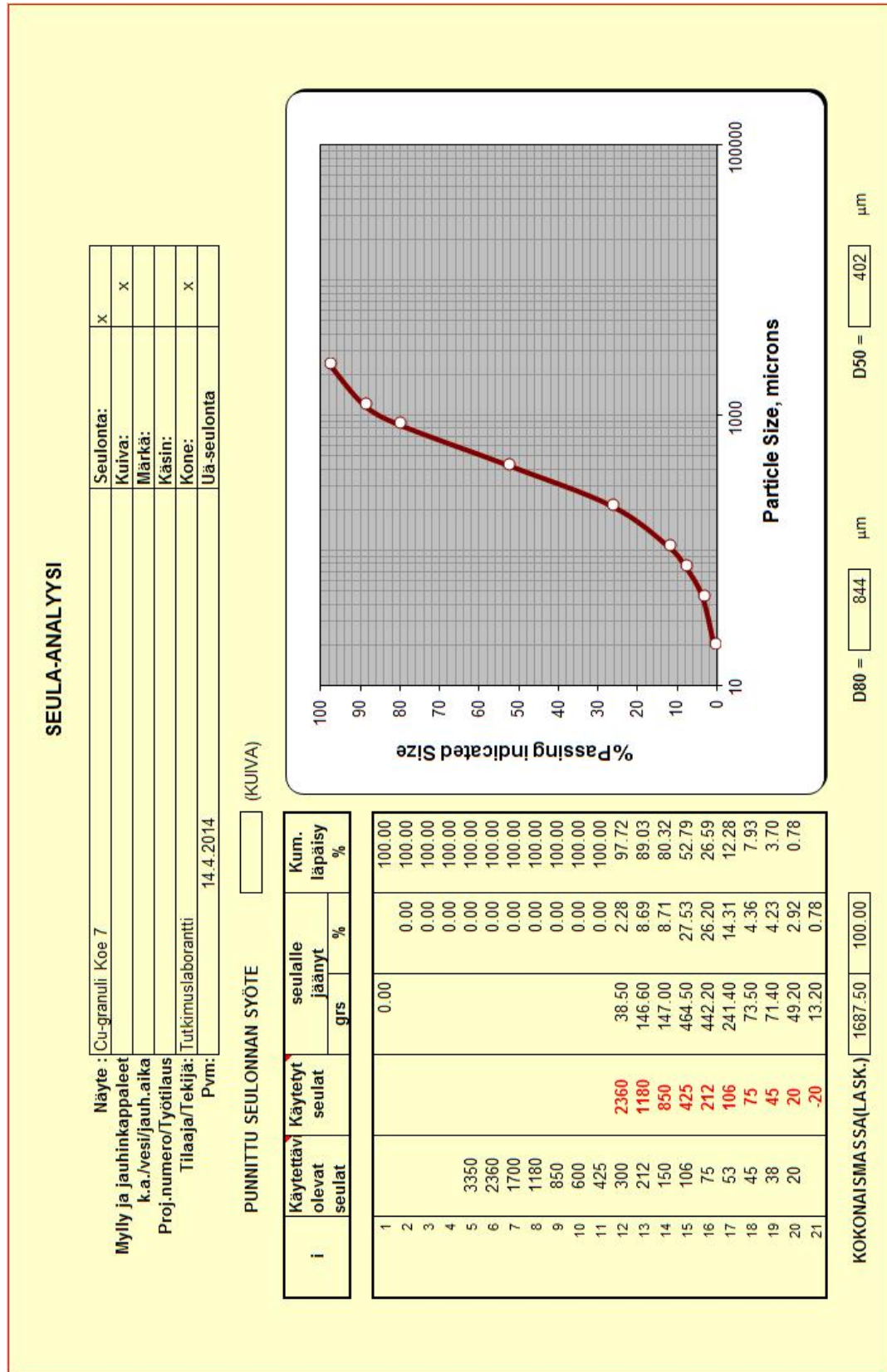
Kuva 5.

Koe 5, seularaportti



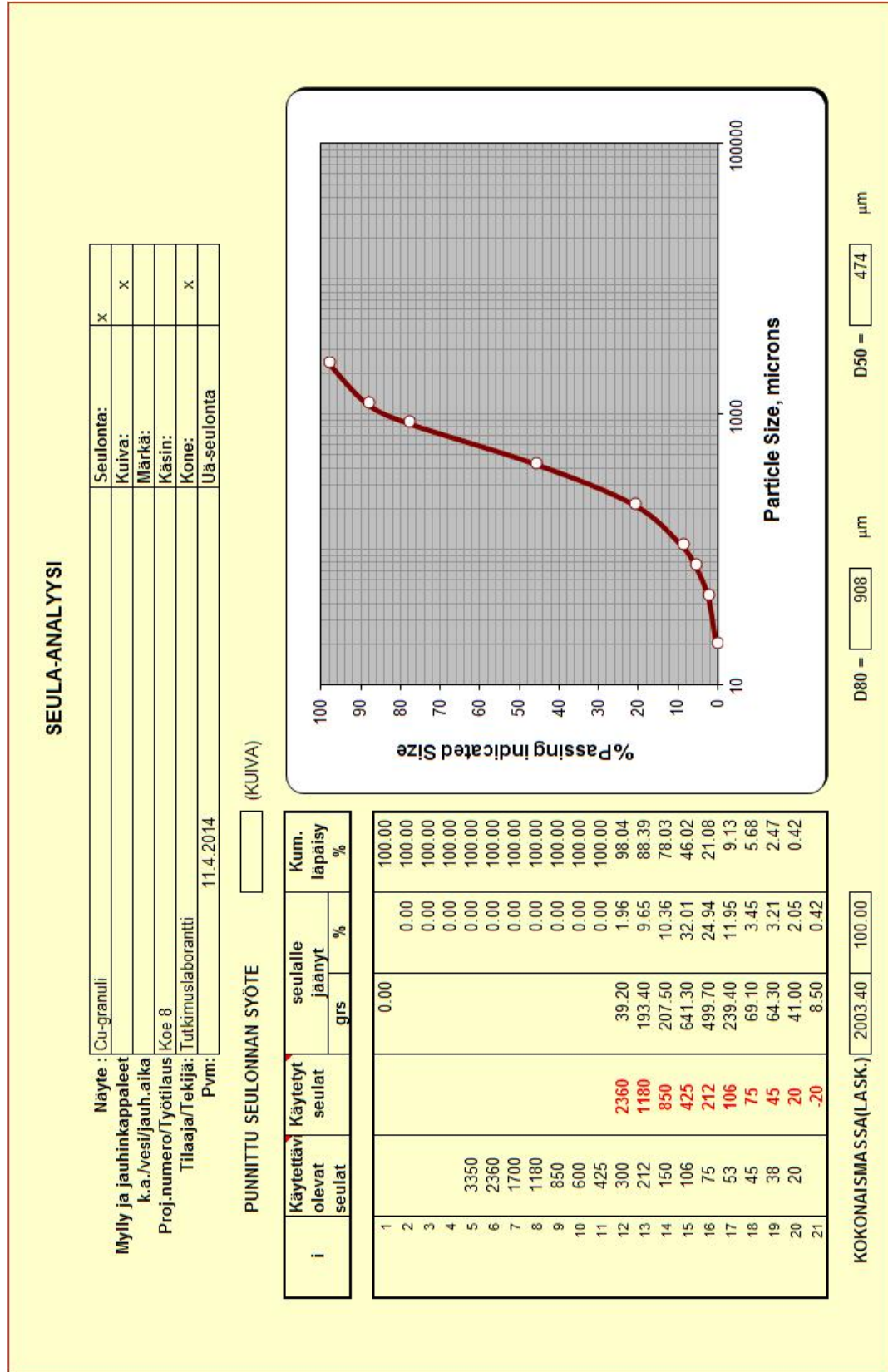
Kuva 6.

Koe 6, seularaportti



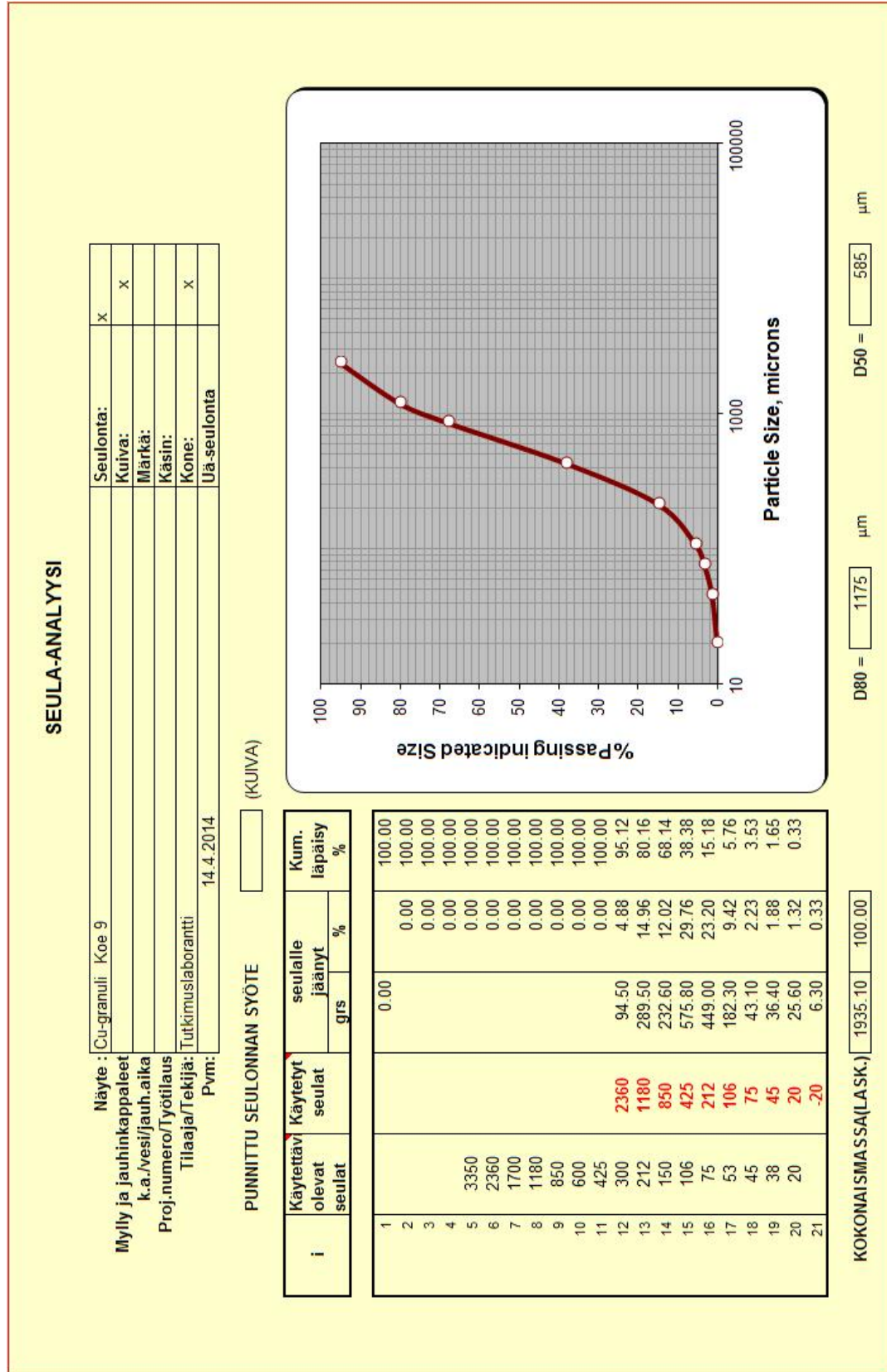
Kuva 7.

Koe 7, seularaportti



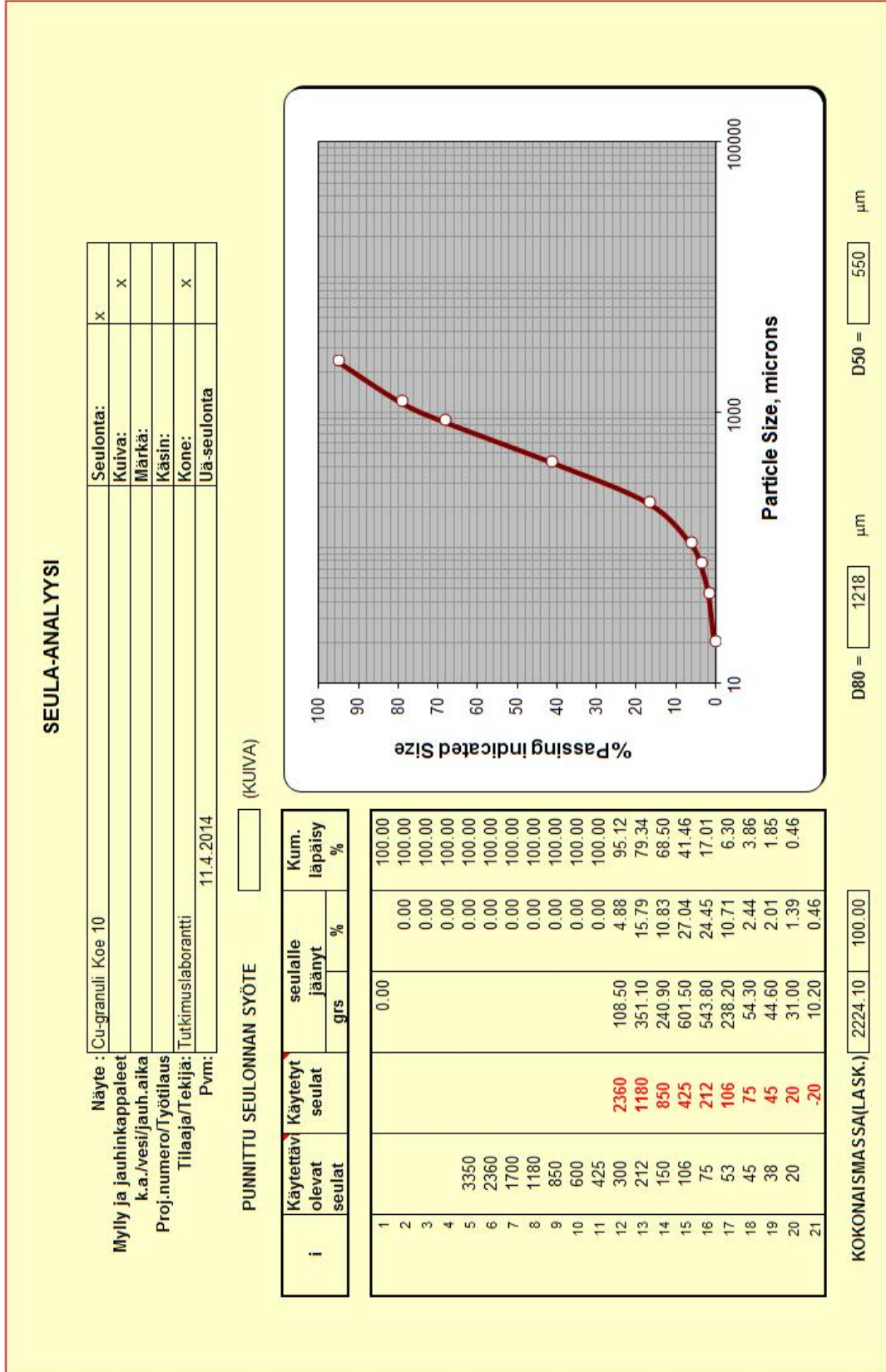
Kuva 8.

Koe 8, seularap



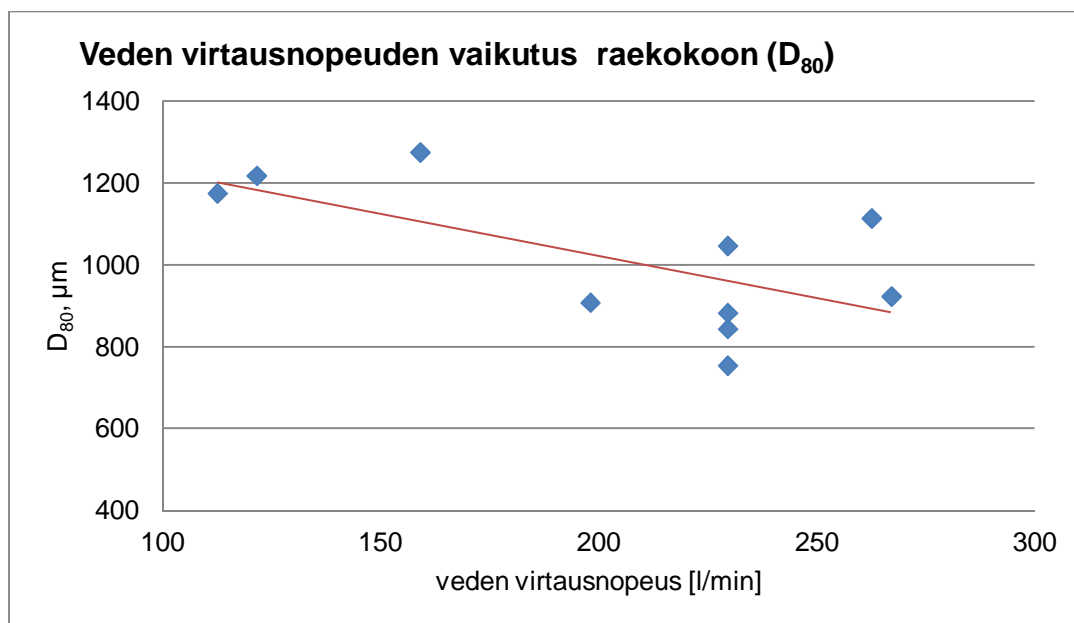
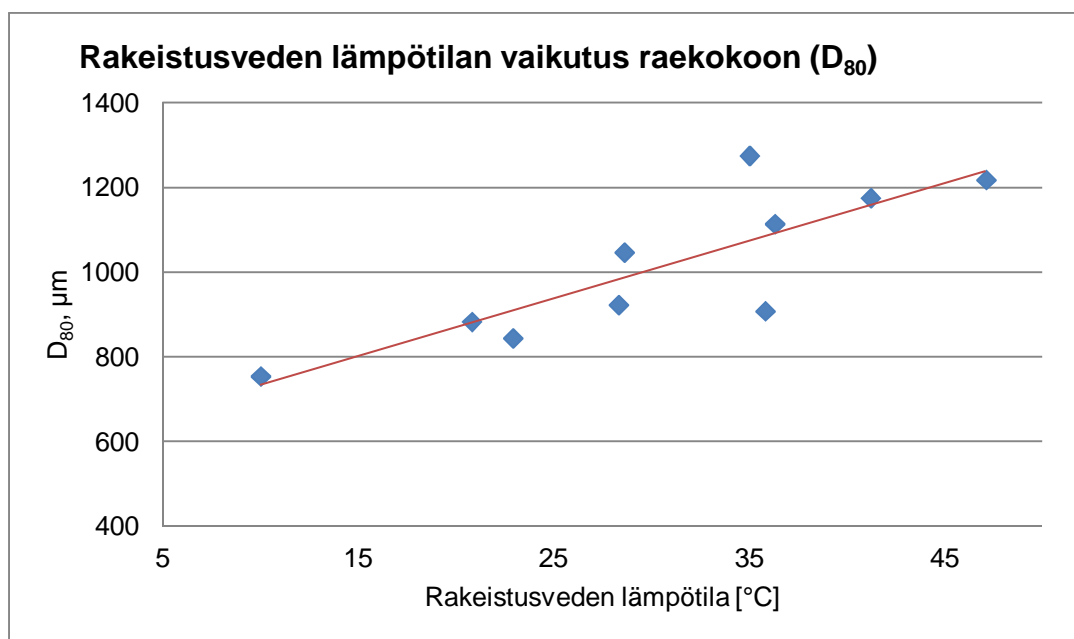
Kuva 9.

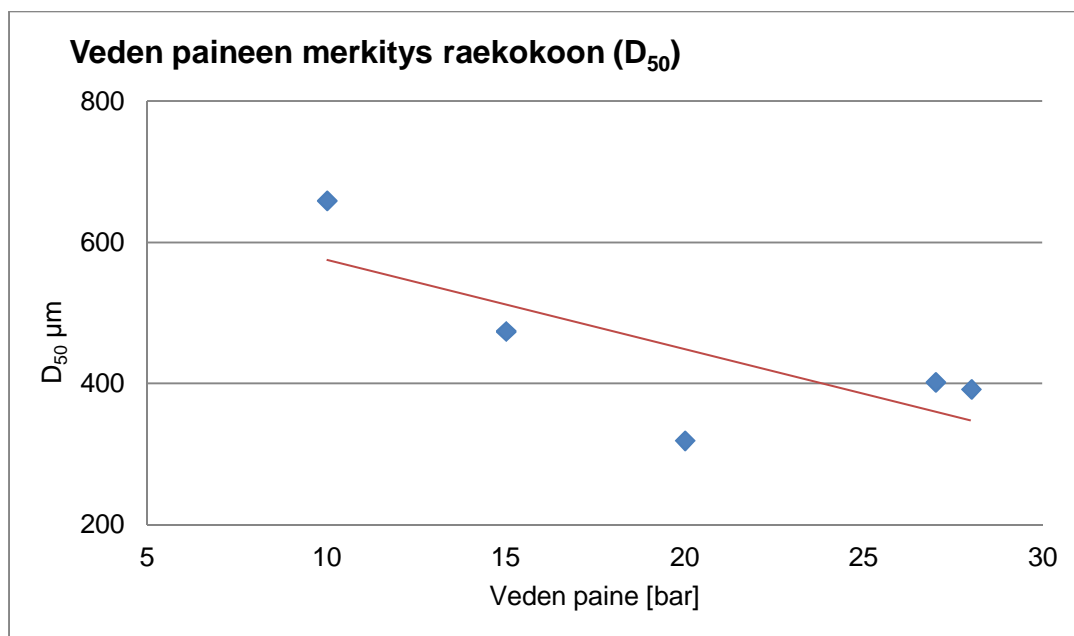
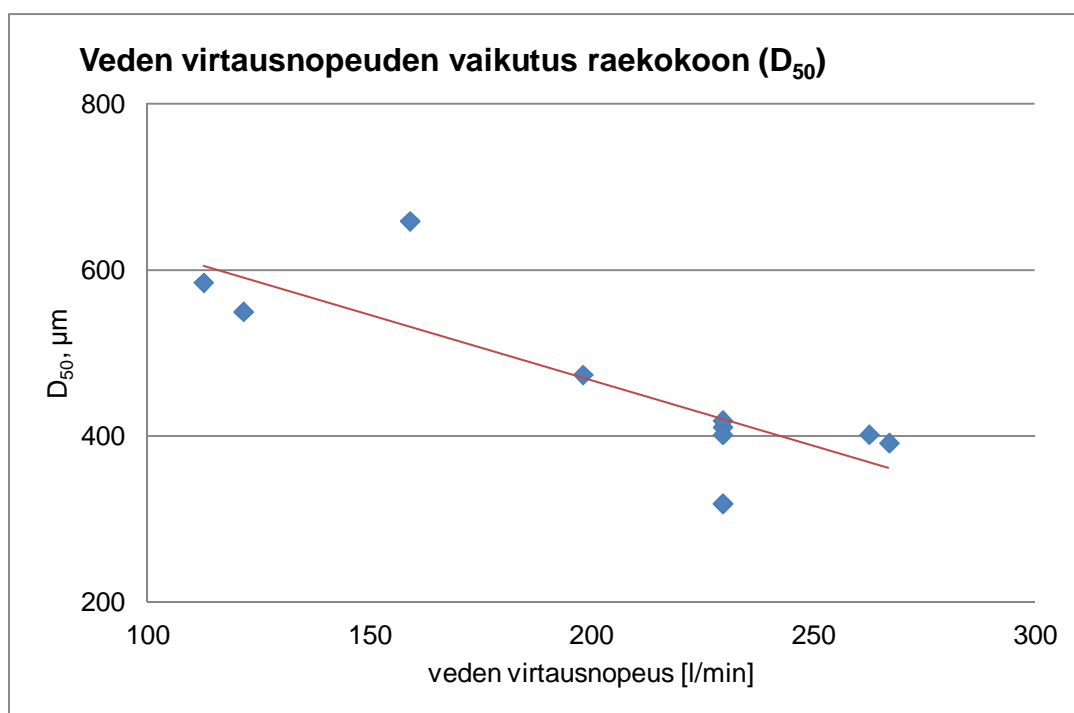
Koe 9, seularaportti

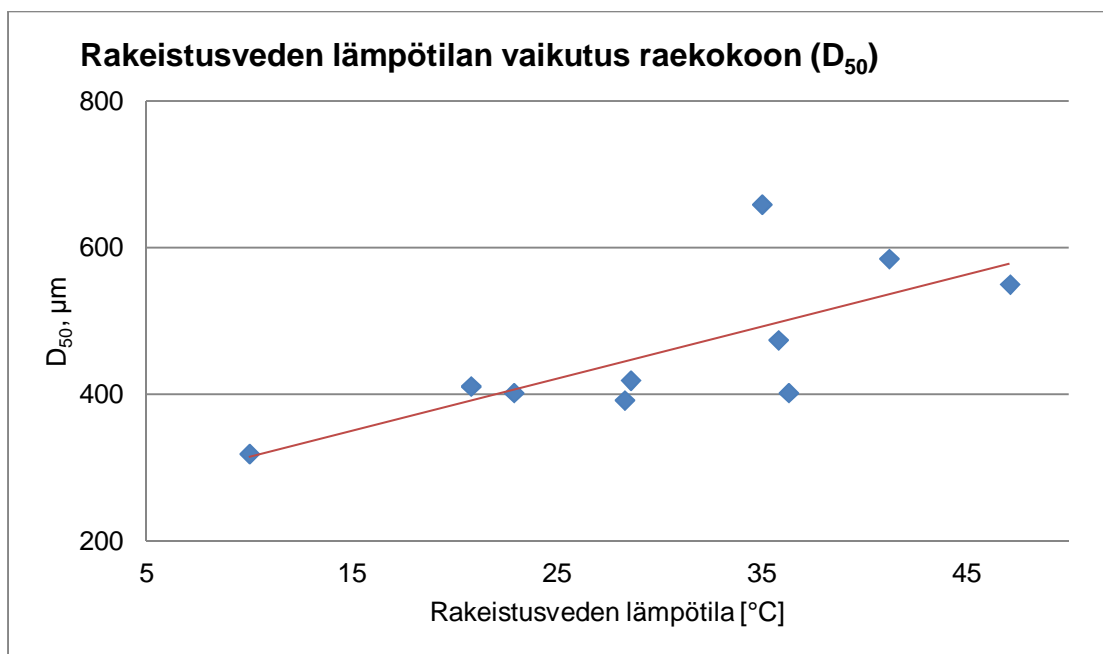


Kuva 10.

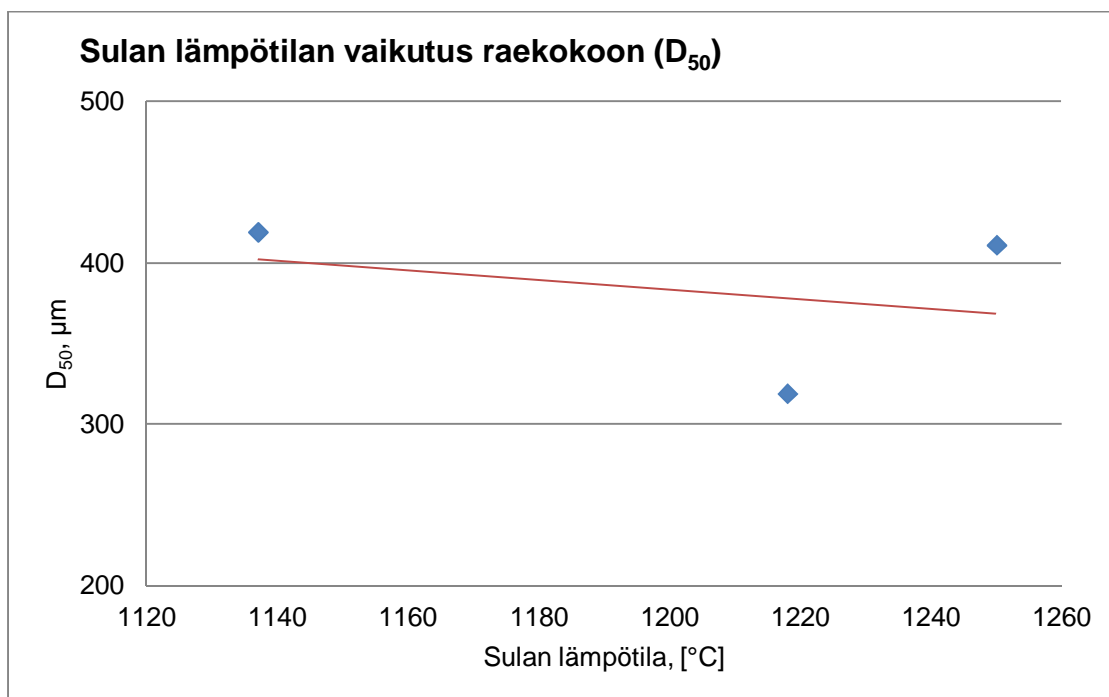
Koe 10, seularaportti

Koeparametrien vaikutus kuparirakeiden seulonnan D_{80} -arvoonKuva 1. Veden virtausnopeuden vaikutus kuparirakeiden D_{80} -arvoonKuva 2. Rakeistusveden lämpötilan vaikutus kuparirakeiden D_{80} -arvoon

Koeparametrien vaikutus raekokoon (D_{50})Kuva 1. Veden paineen vaikutus kuparirakeiden D_{50} -arvoonKuva 2. Veden virtausnopeuden vaikutus kuparirakeiden D_{50} -arvoon



Kuva 3. Rakeistusveden lämpötilan vaikutus kuparirakeiden D_{50} -arvoon



Kuva 4. Sulan lämpötilan vaikutus kuparirakeiden D_{50} -arvoon