

---

# Keskipakopumppujen toimintapisteet ja pumppu vertailu

---

Juho Airaksinen

Opinnäytetyö

Ammattikorkeakoulututkinto





Koulutusala Tekniikan ja liikenteen ala	
Koulutusohjelma Kone- ja tuotantotekniikan koulutusohjelma	
Työn tekijä(t) Juho Airaksinen	
Työn nimi Keskipakopumppujen toimintapisteet ja pumppu vertailu	
Päiväys	24.4.2011
Sivumäärä/Liitteet	29
Ohjaaja(t) Koulutus- ja kehityspäällikkö Anssi Suhonen	
Toimeksiantaja/Yhteistyökumppani(t) Yara Suomi Oy	
<p>Tiivistelmä</p> <p>Tämän työn tarkoituksena oli määrittää rikastelietettä pumppaavien keskipakopumppujen toimintapisteet uudelleen. Työ tehtiin Yara Suomi Oy:lle, Siilinjärven kaivokselle. Työssä tarkasteltiin lähemmin rikastamon noin 30:a pumppua. Nousseiden tuotantotavoitteiden vuoksi pieniksi käyneille pumppuille tuli määrittää uudet toimintapisteet sekä pyrkiä selvittämään muita pumppauksessa ilmenneitä ongelmia. Lisäksi uusista pumppuista pyydettiin tarjoukset pumppuvalmistajilta. Tarjousten perusteella pumppuja vertailtiin hankintakustannusten, kunnossapitokustannusten ja käytettävyyden kannalta. Lopuksi tuli antaa suositus pumppujen hankinnasta.</p> <p>Tietopohjana työssä käytettiin Yaran sisäistä verkkoa sekä kokemuseräistä tietoa. Lisäksi pumppuista ja putkistoista jouduttiin mittamaan puuttuvia tietoja. Työssä hyödynnettiin myös vanhojen pumppujen varaosa- ja huoltokirjoja.</p> <p>Tuloksena saatiin määritettyä pumppujen toimintapisteet ja niiden laskukaavat sähköiseen taulukkolaskentamuotoon. Pieneksi käyneistä pumppuista saatiin tarjoukset kolmelta potentiaalisimmalta pumppuvalmistajalta. Tarjousten perusteella tehtiin Yaralle suositus uusien pumppujen hankinnasta.</p>	
Avainsanat pumppu, putkisto, toimintapiste	
Julkinen	

Field of Study Technology, Communication and Transport			
Degree Programme Degree Programme in Mechanical Engineering			
Author(s) Juho Airaksinen			
Title of Thesis Operation Points of Centrifugal Pumps and Comparing Pumps			
Date	April 28, 2011	Pages/Appendices	29
Supervisor(s) Mr. Anssi Suhonen			
Project/Partners Yara Suomi Oy			
<p>Abstract</p> <p>The aim of this thesis was to redetermine the operation points of centrifugal pumps, which pump apatite slurry. The work was commissioned by Yara Suomi, Siilinjärvi mine.</p> <p>There were about 30 pumps to be studied. New operation points had to be determined for some pumps that were not effective enough due to the increased production. The manufacturers were asked to make offers for new pumps. Then the offers were compared paying attention to investment costs, maintenance costs and utilization rate. Based on the offers a recommendation purchasing a new pump was made.</p> <p>Information was found in the network and experience of Yara. Dimensioning pumps and pipelines was also required to acquire missing information. Spare part list and maintenance books of old pipes were also studied.</p> <p>As a result of this project the operation points were determined and calculation formulas for them were made in electric form. Offers for new pumps were provided by three potential manufacturers. Based on these offers a recommendation for the purchase of new pumps was made.</p>			
Keywords operation point, pump, piping			
public			

## ALKUSANAT

Haluan kiittää kaikkia heitä, jotka ovat olleet apuna tämän työn teossa. Yaralta kiitokset ansaitsevat kunnossapitopäällikkö Antti Savolainen, kehityspäällikkö Jarmo Aaltonen ja muu apua antanut henkilökunta. Koulun puolelta kiitokset ansaitsee ohjaava opettaja, koulutus- ja kehityspäällikkö Anssi Suhonen.

24.4.2011

Juho Airaksinen

# SISÄLTÖ

## SYMBOLILUETTELO

1	JOHDANTO .....	8
2	YARA .....	9
2.1	Yara Suomi.....	9
2.2	Yara Siilinjärvi.....	9
2.3	Työn taustaa.....	10
3	KESKIPAKOPUMPUT .....	12
3.1	Toiminta .....	12
3.2	Ongelmat.....	13
4	TYÖN VAIHEISTUS .....	15
5	TOIMINTAPISTEIDEN MÄÄRITTÄMINEN .....	16
5.1	Tausta teoriaa .....	16
5.2	Putkiston koon määrittäminen.....	16
5.2.1	Virtausnopeus .....	16
5.2.2	Reynoldsin luku.....	17
5.2.3	Putken painehäviö.....	18
5.3	Virtausvastusten laskenta.....	19
5.4	Pumpulta vaadittava tuottoalue.....	20
5.5	Pumpun käytettävissä oleva imukorkeus .....	22
6	PUMPPUTRENDIEN TUTKINTA.....	24
7	PUMPPUJEN VERTAILU .....	25
7.1	Hankintakustannukset .....	25
7.2	Kunnossapitokustannukset.....	25
7.3	Käytettävyys .....	25
7.4	Vertailun yhteenveto.....	26
8	YHTEENVETO .....	27

## LÄHTEET

## SYMBOLILUETTELO

$A$	virtauksen poikkipinta-ala
$d$	putken sisähalkaisija
$g$	putoamiskiihtyvyyys
$H$	tarvittava nostokorkeus
$H_{\text{dyn}}$	dynaaminen nostokorkeus
$H_{\text{st}}$	staattinen nostokorkeus
$H_1$	pinnankorkeus imusäiliössä
$H_2$	pinnankorkeus painesäiliössä
$L$	putken pituus
$\text{NPSH}_a$	käytettävissä oleva pumpun imukorkeus
$\text{NPSH}_r$	vaadittu pumpun imukorkeus
$p_H$	nesteen höyrynpaine
$p_1$	paine imusäiliössä
$p_2$	paine painesäiliössä
$Q$	tilavuusvirta
$Re$	Reynoldsin luku
$w$	virtausnopeus
$\Delta p$	painehäviö
$\Delta p_v$	putkiston + rakenneosien virtausvastus
$\Delta p_{\text{imu}}$	imuputken virtausvastus
$\eta$	dynaaminen viskositeetti
$\rho$	virtausaineen tiheys
$\lambda$	putkivastuskerroin
$\zeta$	paikallisvastuskerroin

## 1 JOHDANTO

Kaivosteollisuudessa käytetään monenlaisia prosesseja, jotta louhitusta malmista saadaan rikastettua tarvittavat mineraalit erilleen. Louhinnan jälkeen malmi kuljetaan kaivoksilta murskattavaksi ja jauhattavaksi. Usein malmien rikastamiseen raaka-aineesta tarvitaan erilaisia kemikaaleja sekä suodatus- ja erotteluprosesseja. Kun jauhettu malmirikaste lietetään veteen, pumppausta käytetään merkittävältä osin materiaalien liikuttamiseen.

Tässä opinnäytetyössä pyritään selvittämään Yara Suomi Oy:n Siilinjärven rikastamon pumppujen toimintaa ja soveltuvuutta käyttökohteeseensa. Tuotantotavoitteiden kasvaessa tuotantoyksiköitä ja tuotantojärjestelmää joudutaan kehittämään. Tarkoitus on laskea työhön rajattujen pumppujen toimintapisteet uudelleen vastaamaan tavoitteellisia tuottoarvoja. Samalla pyritään löytämään ratkaisuja pumppausongelmia ilmenneisiin kohteisiin, kuten kavitaatioon. Työssä joudutaan laskemaan myös putkistojen sopivuudet.

Pumpputarpeiden selvittämisen jälkeen pyydetään tarjoukset potentiaalisilta pumppujen toimittajilta. Tarjouksia ja pumppuja vertailemalla pyritään valitsemaan parhaat pumput tehokkuuden, edullisuuden ja käyttövarmuuden perusteella. Lopuksi annetaan suositus kyseisten pumppujen hankinnasta.



## 2 YARA

### 2.1 Yara Suomi

Yara Suomen historia alkaa 1920-luvulta, kun Suomen valtion omistava Valtion Rikkihappo- ja Superfosfaattitehtaat perustettiin. Alussa tuotanto koostui lannoitteista ja rikkihapon tuotannosta. Lannoiteliiketoiminta kansainvälistyi 60-luvulla lannoitteiden pienimuotoisella viennillä. Nimi vaihtui Kemira Oy:ksi vuonna 1972. Vuonna 1977 Kemira jakoi kemianteollisuuden ja lannoiteteollisuuden omiksi toimijoikseen, jotta niihin voitaisiin keskittyä itsenäisemmin. 80-luvulla liiketoiminnan laajentaminen koko maailmaan alkoi yritysostoilla, myyntikonttoreiden perustamisilla ja viennin lisäämisellä. Lannoiteliiketoiminnan nimeksi muuttui Kemira Agro vuonna 1994 ja samalla yhtiö kirjautui Helsingin pörssiin. 90-luvun loppuun Kemira Agro oli kaksinkertaistanut liiketoimintansa ja se teki investointeja yhteisyrityksiin Lähi-itään ja Aasiaan. Kemira Agro Oy irtautui Kemira Oyj:sta vuonna 2004 ja muutti nimensä Kemira Growhow'ksi. Vuonna 2007 Suomen valtion myytyä osuutensa Growhow'sta norjalaiselle Yara International ASA:lle siitä tuli osa maailman suurinta kivennäislannoitteiden tarjoajaa. (Yara A.)

Suomessa Yaralla on tuotantolaitoksia Uudessakaupungissa, Harjavallassa, Kokkolassa ja Siilinjärvellä. Siilinjärvellä toimii Länsi-Euroopan ainoa fosfaattikaivos. Yara työllistää Suomessa lähes 900 henkilöä valmistuksessa, tuotekehityksessä, markkinoinnissa ja myynnissä. Koko Yaran liikevaihto vuonna 2009 oli 7,7 miljardia euroa. (Yara A.)

### 2.2 Yara Siilinjärvi

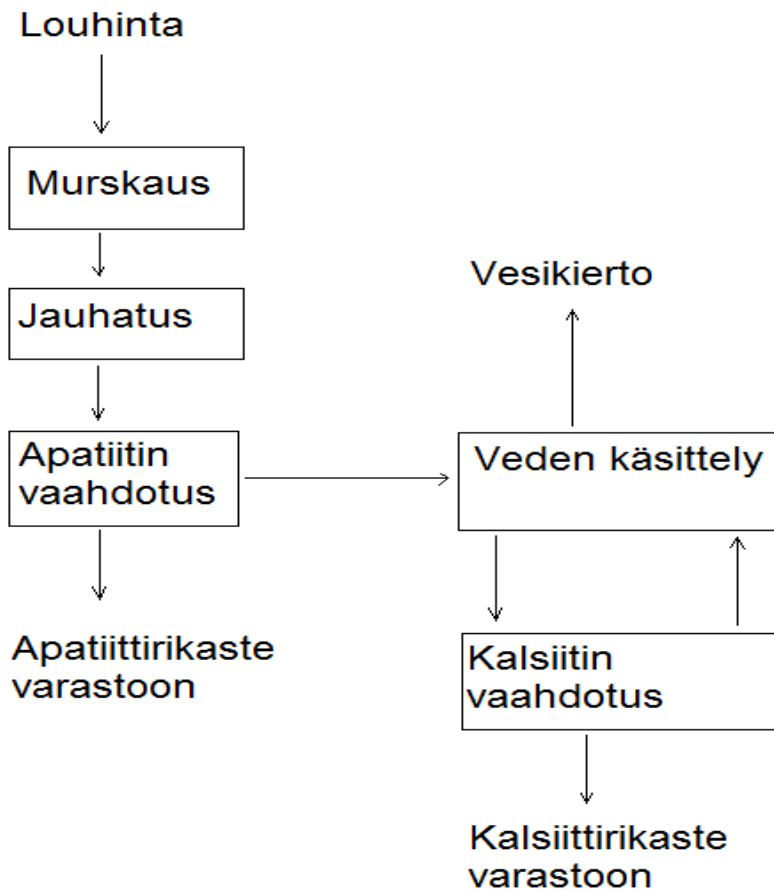
Siilinjärven tehtaat valmistuivat vuonna 1969. Aluksi tuotantolaitoksiin kuuluivat pasutto-rikkihappotehdas, fosforihappotehdas, ammoniumfosfaattitehdas ja voimalaitos. Vuosina 1972–1973 valmistui lannoitetehdas, typpihappotehdas ja pakkaamo. Kiilletehdas ja kalsiumsulfaattitehdas ovat toimineet vuodesta 1985. (Yara B)

Yaran Siilinjärven tehdas tuottaa fosforilannoitetta. Kaivoksella louhitaan apatiittia, jota käytetään pääsääntöisesti fosforin tuotannon raaka-aineena. Siilinjärven malmesiintymä sisältää noin 10 % apatiittia, 16 % kalsiittia, 3 % dolomiittia, 65 % flogopiittia sekä muita silikaatteja 5 %. Malmia louhitaan 11 miljoonaa tonnia vuodessa. Tästä määrästä apatiittirikastetta tuotetaan 900 000 tonnia vuodessa ja apatiitin saantipro-

senti on noin 75. Apatiittia käytetään fosforin valmistukseen, kalsiittia käytetään maanparannuskalkkina ja kiillettä hyödynnetään rakennusteollisuudessa äänieristeenä. (Sulzer pumps, Application Survey.)

### 2.3 Työn taustaa

Apatiittia valmistetaan monivaiheisen murskaus- ja jauhatusprosessin avulla. Murskauksessa malmia liikutellaan kuljettimilla, mutta jauhatuksessa malmi lietetään veteen, joten sitä liikutellaan pumpuilla. Jauhatuksessa lietettä pumpataan myllyihin, joissa eri mineraalit jauhetaan irti toisistaan. Jauhatuksen jälkeen liete vaahdotetaan, jolloin jätemineraalit erottuvat rikasteesta. Jäteliete pumpataan allasalueelle ja apatiitirikaste pumpataan eteenpäin prosessissa. (Sulzer pumps, Application Survey.)



KUVA 1. Apatiitin valmistusprosessi. (Kuva Juho Airaksinen)

Vanhimmat prosessissa käytettävät pumput ovat peräisin 70-luvulta. Pumput ovat tyypiltään keskipakopumppuja, ja ne on suunniteltu vaikeasti pumpattaville lietteille. Silti vaativa pumppausprosessi kuluttaa pumppujen määrään osia ja kasvattaa näin kunnossapitokuluja merkittävästi. Prosessin vaativuuden ja kriittisyyden takia varsinaisen pumpun rinnalla joudutaan pitämään varalla toista samanlaista pumppua,

joka otetaan käyttöön, kun toinen pumppu joudutaan pysäyttämään kunnossapitotöiden vuoksi.

Pumppujen moottorit on varustettu taajuusmuuttajilla, joilla pumppujen kierrosnopeutta säädellään. Kierrosnopeuden säätömahdollisuudella pyritään vaikuttamaan suoraan haluttuun virtaukseen. Virtausten säätely on tärkeää prosessin liikkuvuuden kannalta. Virtaavan lietteen määrä riippuu paljolti prosessin toiminnasta sen alkupäässä, kuinka malmia saadaan louhittua, murskattua ja jauhettua rikastettavaksi. Mahdolliset seisakit ja hidasteet saattavat moninkertaistaa prosessin alkupäästä pumppausvaiheeseen.

Norjalainen Yara jakaa investointirahaa tuotantolaitoksilleen ympäri maailmaa. Siilinjärvellä toimii Länsi-Euroopan ainoa fosfaattikaivos ja Siilinjärvelle investointeihin on myönnetty kohtuullisesti rahaa. Siilinjärven tuotantolaitos on suunnitellut uusien pumppujen hankintaa vuodelle 2011.

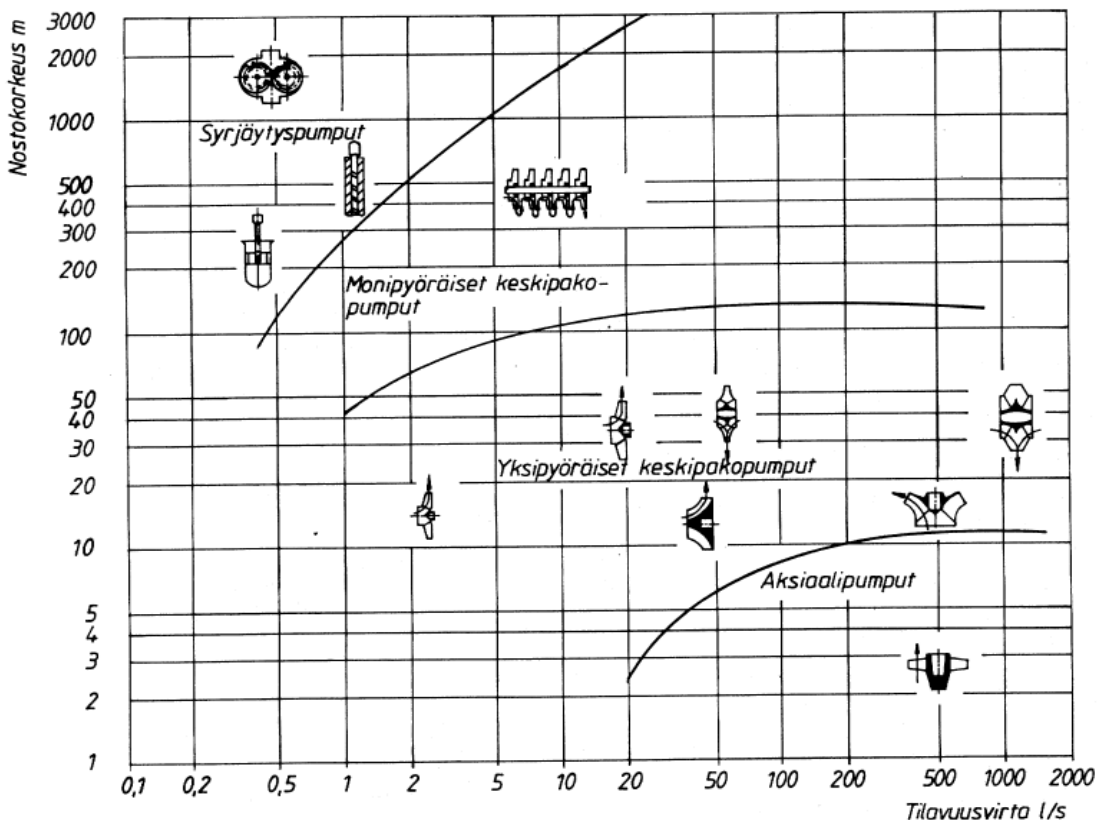
Uusia pumppuja hankittaessa pyritään päivittämään pumput vastaamaan pumppausprosessin vaatimustasoja. Uudet pumput mitoitetaan ja valitaan tutkimalla pumppujen tehoa ja tuottoa pidemmällä aikavälillä. Myös mahdolliset epäkohdat pumppujen toiminnassa pyritään työn myötä ratkaisemaan.

### 3 KESKIPAKOPUMPUT

#### 3.1 Toiminta

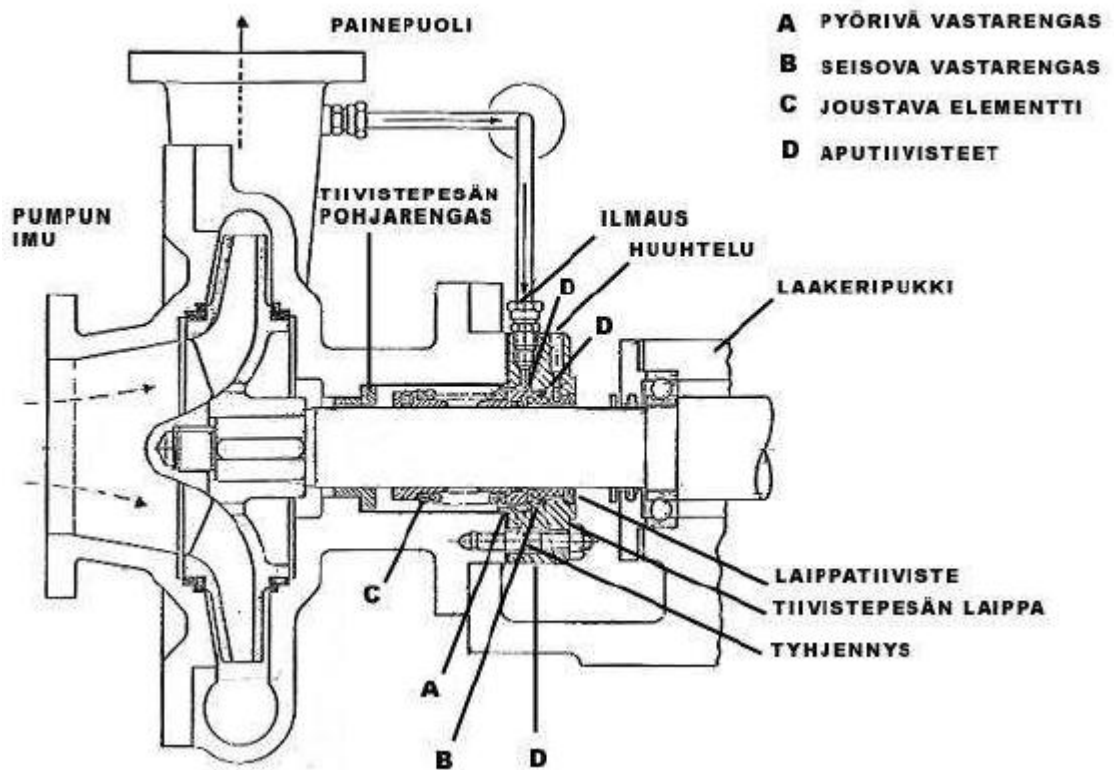
Melkeinpä kaikkialla teollisuudessa joudutaan käyttämään erilaisia pumppuja nesteiden tai kaasujen siirtämiseen paikasta toiseen. Pumpuilla mekaaninen usein pyörivä liike muutetaan kuljetettavan aineen liike- tai paine-energiaksi. Nesteiden liikuttamiseen yleisin käytetty pumppu on keskipakopumppu. Sen etuja ovat yksinkertaisuus, laaja tuottoalue, säädettävyys ja kohtalainen hyötysuhde. Keskipakopumpun pääosat ovat spiraalimainen pesä, juoksupyörä sekä juoksupyörää pyörittävä akseli tiivisteineen ja laakerointineen.

Erilaisia pesä- ja juoksupyörämalleja on useita, mutta eniten tuottoon vaikuttava seikka on juoksupyörä. Ulkoinen voimanlähde, usein sähkömoottori, pyörittää akselin välityksellä juoksupyörää. Juoksupyörän siivet on muotoiltu siten että keskelle pyörää syntyy imuvirtaus ja keskipakoisvoiman ansiosta siivillä ohjataan imetty neste siipien ulkoreunalle, josta neste siirtyy tangentin suuntaisesti pesän paineaukkoon. Tasaisella pyörivällä liikkeellä saadaan aikaan jatkuva virtaus, mutta myös nesteen tulee olla mahdollisimman homogeenista ja vaahtoamatonta. Kuvassa 1 on esitelty eri pumppumallien pääasialliset toiminta-alueet.



KUVA 2. Eri pumppumallien toiminta-alueet. (Edupoli 2009)

Yaran rikastamolla käytettävät pumput ovat pääosin Mäntän Konepajan 70-luvulla valmistamia Serlachius-keskipakopumppuja. Nykyisin kyseisten pumppujen valmistus on siirtynyt Sulzer Oy:lle. Tarpeiden muuttuessa pumppuja on vuosien varrella jo uusittu ja muutamien vanhojen pumppujen tilalle on hankittu Weir Minerals Oy:n valmistamia Warman-pumppuja. Pumput toimivat pääosin hyvin, mutta erityisesti vaahtoavien nesteiden pumppaukseen ei ole löydetty vielä järkevää ratkaisua. Yara koettaa kehittää koko ajan prosessiaan ja löytää parempia pumppumalleja.



KUVA 3. Keskipakopumpun rakenne. (Eduoli 2009)

### 3.2 Ongelmat

Kavitaatio on keskipakopumppujen yksi yleisin ongelma. Kavitaatio tarkoittaa nesteen höyrystymistä ja kaasukuplien räjähtämistä juoksupyörän imusiivekkeissä. Kaasukuplien räjähtäminen siivekkeiden imureunassa on yksi juoksupyörää suuresti kuluttava tekijä. Väärin sijoitettu tai mitoitettu pumppu, putkiston alimitoitus tai vaahtoavan aineen pumppaus aiheuttavat yleisimmin kavitaatiota. Pumpun kavitoidessa alipaine imuputkessa kasvaa niin suureksi, että pumpattava neste alkaa höyrystyä. Höyrökuplien kulkeutuessa pumpun siivekkeille paine kasvaa ja kuplat puhkeavat räjähdysmäisesti.

*Paineaallon (vrt. luku 11) yhteydessä johdetun lausekkeen mukaan höyrykuplan ly-  
sähtämisen aiheuttaman paineiskun voimakkuuden on arvioitu olevan 7...8 MPa.  
Mikään metalli ei kestä ajan oloon kavitaation jatkuvaa vaikutusta. Niinpä erääseen  
valurautaiseen 25 mm:n putkenkäyrään muodostui 1 viikon käyttöaikana reikiä, joiden  
läpi saattoi työntää nyrkin. [Bergius ym. 1975, 21]*

Kavitaatio aiheuttaa siis juoksupyörän ennen aikaista kulumista myös värähtelyä ja värähtelystä johtuvaa häiritsevää ääntä. Pahimmassa tapauksessa pumpun tuotto romahtaa kokonaan ja pumpun käyttö on mahdotonta. [Bergius ym. 1975, 21.]

Paras keino kavitaation estämiseksi on imuputken koon kasvattaminen. Perussääntö on, että imuputken on oltava vähintään yhtä iso kuin paineputken, mielellään isompi. Pumpun imukorkeutta laskemalla ja nesteen vaahtoisuutta vähentämällä estetään myös kavitaation syntymistä. (Metso Minerals AB, 2009, 72.)

#### 4 TYÖN VAIHEISTUS

Työ aloitettiin tutustumalla kohteeseen Siilinjärven rikastamolla. Jo alkuvaiheessa työ rajattiin vajaaseen 30 kriittisimpään ja ongelmallisimpaan pumppuun.

Itse työ alkoi putkistokokojen taulukoimisella. Putkistokoot löytyivät Yaran sisäisestä verkosta, jonne oli koottu Yaran tuotantotilojen layout-kuvat, pi-kaaviot ja sähkökaaviot. Pi-kaaviosta selvisivät putkien nimellishalkaisijat, melkein kaikki putkiston rakeneosat ja prosessitunnukset. Putkistojen pituudet arvioitiin myös verkosta löytyvien layout-kuvien perusteella. Puuttuvat putkikoot ja pituudet tarkastettiin mittaamalla. Myös staattiset nostokorkeudet määritettiin layout-kuvien perusteella.

Työ sisälsi myös käytössä olevan prosessin ohjausjärjestelmän opetteluun. Käytettävänä oli Metso Oyj:n kehittämä MetaFrame DNA trend. Ohjelman avulla pystyi seuraamaan pumppujen virtauksia, ohjausta, tehoja ja pumpattavien aineiden tiheyksiä. Ohjelmasta kerättiin kyseisten pumppujen virtausarvot toimintapisteiden laskemista varten. Tavoitteelliset arvot selvitettiin ohjaamon valvojalta.

Kyseiset arvot, putkikoot, nostokorkeudet ja virtaukset taulukoitiin Excel-taulukkolaskentaohjelmaan. Taulukkolaskennassa pumppujen toimintapisteet laskettiin luvussa 6 esitetyllä tavalla. Lisäksi ohjaus- ja tehotietoja analysoimalla pyrittiin selvittämään pumppuja pyörittävien moottorien riittävyttä. Laskettuja toimintapisteitä verrattiin käytössä olevien pumppujen pumppukäyriin ja niiden aikaisemmin määritettyihin toimintapisteisiin. Sovittamalla uudet toimintapisteet vanhojen pumppujen käyriin voitiin todeta uusittavat pumput. DNA trend -ohjelman keräämän ohjaustiedon perusteella pyrittiin selvittämään aikaisempien ongelmatapauksien yhtäläisyyksiä ja syitä, joihin puuttumalla pystyttäisiin esimerkiksi kavitaatiota ehkäisemään.

Laskettujen toimintapisteiden ja määritettyjen tarpeiden perusteella laadittiin tarjouspyynnöt uusista pumpuista kolmelle potentiaalisimmalle pumppuvalmistajalle, Metso Minerals Finland Oy:lle, Weir Minerals Oy:lle ja Giw Industries Oy:lle. Tarjotuista pumpuista vertailtiin erityisesti käytettävyyttä, investointikustannuksia ja kunnossapitokustannuksia. Vertailun perusteella laadittiin Yaralle suositus pumppujen valinnasta.

## 5 TOIMINTAPISTEIDEN MÄÄRITTÄMINEN

### 5.1 Tausta teoriaa

Pumppujen valinta pääpiirteittäin suoritetaan arvioimalla tarvittava virtaus ja laske-  
malla käytettävä nostokorkeus. Pumpulta vaadittavaan nostokorkeuteen vaikuttavat  
staattinen nostokorkeus  $H_{\text{stat}}$  sekä dynaaminen nostokorkeus  $H_{\text{dyn}}$ . Virtaukset ja staat-  
tinen nostokorkeus voidaan useasti määrittää tarkastikin, mutta dynaamisen nosto-  
korkeuden määrittävien putkihäviöiden laskenta voi olla epätarkkaa. Epätarkkuus  
johtuu kyseisessä tapauksessa pumpattavan nesteen ominaisuuksista. Pumpatta-  
vassa lietteessä oleva kalsiumkarbonaatti ( $\text{CaCO}_3$ ) pyrkii pumppauksen aikana vaah-  
toamaan runsaasti. Ylimääräinen ilma lietteen seassa muuttaa pumpattavan materi-  
aalin ominaisuuksia siten, ettei niitä pystytä tarkasti määrittämään. Muun muassa  
lietteen viskositeetti ja tiheys voivat vaihdella suurestikin prosessin eri vaiheissa.  
Vaahtoavalle materiaalille ei ole pystytty määrittelemään minkäänlaisia vaahtokerto-  
mia vastusten laskemista varten juuri sen ainutlaatuisuuden ja vaihtelevuuden vuoksi.

### 5.2 Putkiston koon määrittäminen

Pumppujen toimintapisteiden määrittäminen alkaa vaadittavien virtausarvojen selvit-  
tämällä. Nykyisiä tuotantomääriä on tarkoitus nostaa, joten pumppuille on asetettu  
uudet tavoitevirtaukset.

#### 5.2.1 Virtausnopeus

Virtausnopeus,  $w$ , (kaava 1) kertoo virtaavan aineen nopeuden putkessa. Nopeuden  
määrää vaadittavan tilavuusvirran,  $Q$ , ja käytettävän putken virtauspinta-alan suhde,  
 $A$ .

$$w = \frac{Q}{A} = 4 * Q / (\pi * d^2) \quad (1.)$$

jossa

$w$ = virtausnopeus	[m/s]
$Q$ = tilavuusvirta	[m <sup>3</sup> /s]
$A$ = virtauksen poikkipinta-ala	[m <sup>2</sup> ]
$d$ = putken sisähalkaisija	[m]



Kun tiedetään vaadittava tilavuusvirta, putken koolla pyritään säätämään virtausnopeus sopivaksi. Sopivista virtausnopeuksista on taulukoita monille eri aineille, mutta puhtaan veden virtausnopeudeksi suositellaan pumpun imulinjaan 0,5 - 1,5 m/s ja painelinjaan 1,5 - 3 m/s. Liian suuret virtausnopeudet aiheuttavat helposti pumpun kavitointia. Tässä työssä käytettäville lietteille ja vaahdoille ei ole määritelty virallisia virtausnopeuksia mutta veden seassa kulkevien mineraalipartikkelien takia käytettävän virtausnopeuden on oltava suurempi kuin puhtaan veden. Pienillä virtausnopeuksilla partikkelit painuvat putken pohjalle eivätkä liiku putkessa, vaan pakkautuvat pumpun pesään, mikä aiheuttaa osaltaan kavitaatiota. Joten partikkelikoon kasvaessa lietteessä on myös virtausnopeutta syytä kasvattaa. Lietteessä oleva ylimääräinen ilma ja vaahto edesauttavat myös pumpun kavitointia. Ylimääräisen ilman vuoksi toimivan virtausnopeuden löytäminen voi olla hankalaa, koska tilavuusvirtaa täytyy vielä pystyä säätämään tuotannon tarpeen mukaan. Pumpauksen säädön kokemus voi olla hyödyllisempää kuin osoitetut laskentakaavat.

### 5.2.2 Reynoldsin luku

Virtausolosuhteita kuvaa dimensioton Reynoldsin luku (kaava 2).

$$Re = \rho * d * w / \eta \quad (2.)$$

jossa

Re = Reynoldsin luku	[dimensioton]
w = virtausnopeus	[m/s]
d = putken sisähalkaisija	[m]
$\eta$ = dynaaminen viskositeetti	[Ns/m <sup>2</sup> ]
$\rho$ = virtausaineen tiheys	[kg/m <sup>3</sup> ]

Reynoldsin luvun käytännöllinen raja-arvo on 2 100. Alle 2 100:n oleva virtaus on laminaarinen ja yli 2 100:n virtaus on turbulентtinen. Virtausteknisesti putkistot pyritään mitoittamaan niin, että virtaus pysyisi laminaarisena. Harvoin kuitenkin Reynoldsin luku saadaan pidettyä erityisen alhaisena. Laminaarinen virtaus pysyy paremmin yhtenäisenä, ja näin ollen virtausvastukset jäävät oleellisesti pienemmiksi. Yleensä kuitenkin virtaukset jäävät turbulентtisiksi eli virtaus pyörteilee putkessa.

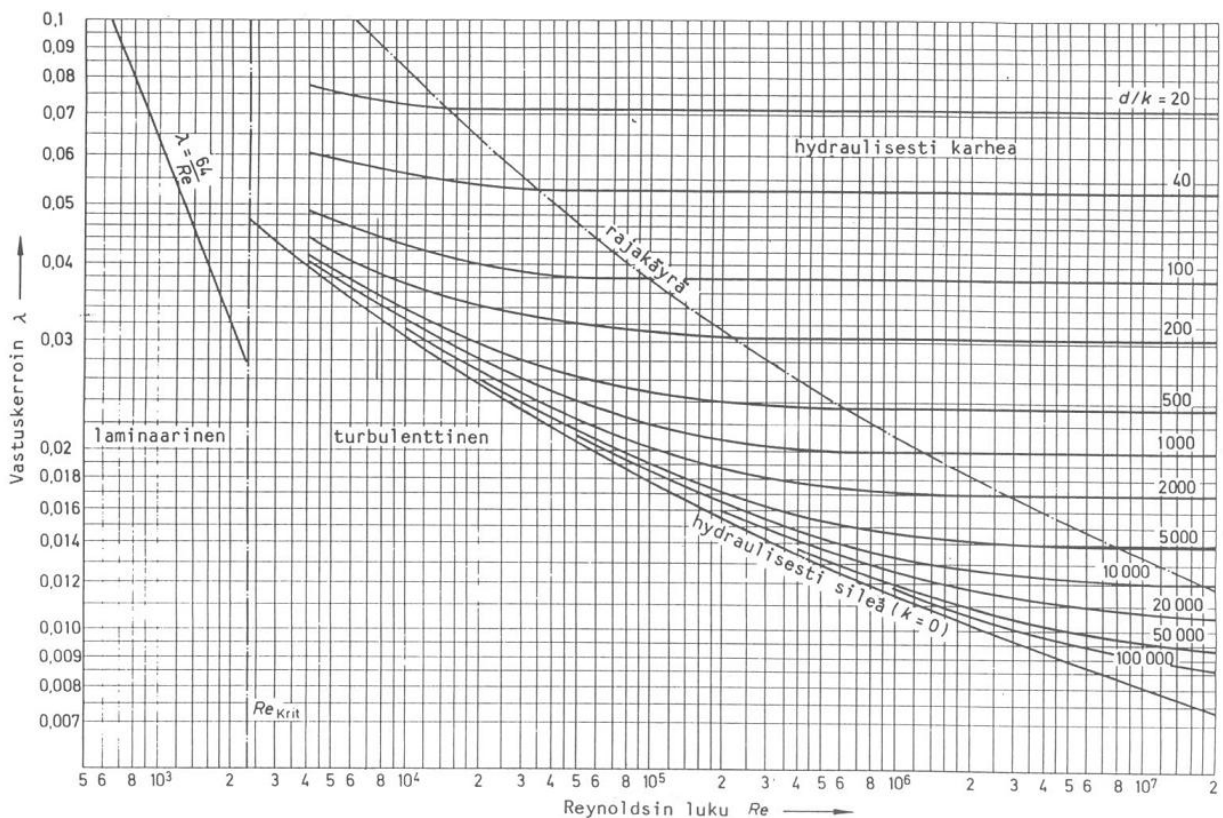
### 5.2.3 Putken painehäviö

Itse putkikin aiheuttaa virtauksessa painehäviöitä. Ennen putken painehäviöiden laskentaa tarvitsee selvittää putkivastuskerroin,  $\lambda$ . Putkivastuskerroin on riippuvainen Reynoldsin luvusta, ja putken karheuden suhteesta putken halkaisijaan. Eri putkimateriaaleille on määritelty karheusarvot,  $k$ , taulukossa 1.

TAULUKKO 1. Putkimateriaalien karheusarvot (Sarlin, pinnankarheuden ( $k$ ) ohjearvoja)

Putkiaine	Uusi putki (mm)	Vanha putki (mm)
Muoviputki	0,01	0,25
Teräsputki	0,1	1,0
Haponkestävä teräsputki	0,1	0,25
Valurautaputki	0,25	1,0
Betoniputki	0,3-2,0	

Putkivastuskerroin  $\lambda$ , luetaan kuviosta 4. (Moodyn käyrästä). Käyrästäön lukemiseen tarvitaan Reynoldsin luku sekä putken karheuden suhde putken halkaisijaan.



KUVIO 4. Moodyn käyrästä (Vuorikari O. 2007. *Käytännön virtaustekniikkaa, Putkiston virtaustekninen mitoitus.*)

Suoran putken painehäviöt voidaan edellisten laskettujen arvojen perusteella laskea kaavalla 3. Kaava ilmoittaa painehäviön Pascaleina, jota tarvitaan myöhemmin dynaamisen nostokorkeuden määrittämiseen.

$$\Delta p = \lambda * \frac{L}{d} * \rho * w^2 / 2 \quad (3.)$$

jossa

$\Delta p$ = painehäviö	[Pa]
$\lambda$ = putkivastuskerroin	[dimensioton]
$L$ = putken pituus	[m]
$w$ = virtausnopeus	[m/s]
$d$ = putken sisähalkaisija	[m]
$\rho$ = virtausaineen tiheys	[kg/m <sup>3</sup> ]

### 5.3 Virtausvastusten laskenta

Putkistot koostuvat suorien putkien lisäksi erilaisista rakenneosista, kuten venttiileistä, käyristä, virtausmittareista, laajennuksista ja supistuksista. Kyseiset rakenneosat häiritsevät virtausta, ja näin ollen aiheuttavat paikallisvastuksia, painehäviötä. Tässäkin tapauksessa paikallisvastukset pyritään pitämään mahdollisimman pieninä. Putkistoja suunniteltaessa kannattaa osien toimittajilta selvittää kyseisten osien paikallisvastuskertoimet. Myös putkien sisään- ja ulostulot vaikuttavat painehäviöihin. Paikallisvastuksia laskiessa kannattaa muistaa laskea imu- ja painelinjat erillisinä, mahdollisten virtausnopeuksien erojen takia. Paikallisvastusten painehäviöt lasketaan kaavalla 4.

$$\Delta p = \zeta * \rho * w^2 / 2 \quad (4.)$$

jossa

$\Delta p$ = painehäviö	[Pa]
$\zeta$ = paikallisvastuskerroin	[dimensioton]
$\rho$ = virtausaineen tiheys	[kg/m <sup>3</sup> ]
$w$ = virtausnopeus	[m/s]

Paikallisvastuskerroin  $\zeta$  on dimensioton arvo, jonka rakenneosien toimittajat määrittelevät. Paikallisvastuskertoimia on myös taulukoitu alan kirjallisuudessa. Eräitä paikallisvastuskertoimia on esitelty taulukossa 2.

TAULUKKO 2. Paikallisvastuskertoimia

Osa	$\zeta$
90° käyrä (R=d)	0,51
90° käyrä (R=1,5d)	0,4
45° käyrä (R=d)	0,35
45° käyrä (R=1,5d)	0,15
Sisääntulo	0,5
Ulostulo	1
Palloventtiili	0,1
Istukkaventtiili	4

#### 5.4 Pumpulta vaadittava tuottoalue

Nostokorkeudella tarkoitetaan korkeutta, jonka pumppu siirtää nestettä imusäiliöstä painesäiliöön. Todellinen nostokorkeus ( $H$ ) on staattisen ( $H_{st}$ ) ja dynaamisen ( $H_{dyn}$ ) nostokorkeuden summa. Nostokorkeuden määrittämisessä konkretisoituvat sekä putkiston painehäviöt että nesteen siirtokorkeudet. Tuotosta riippumaton staattinen nostokorkeus lasketaan kaavalla 5.

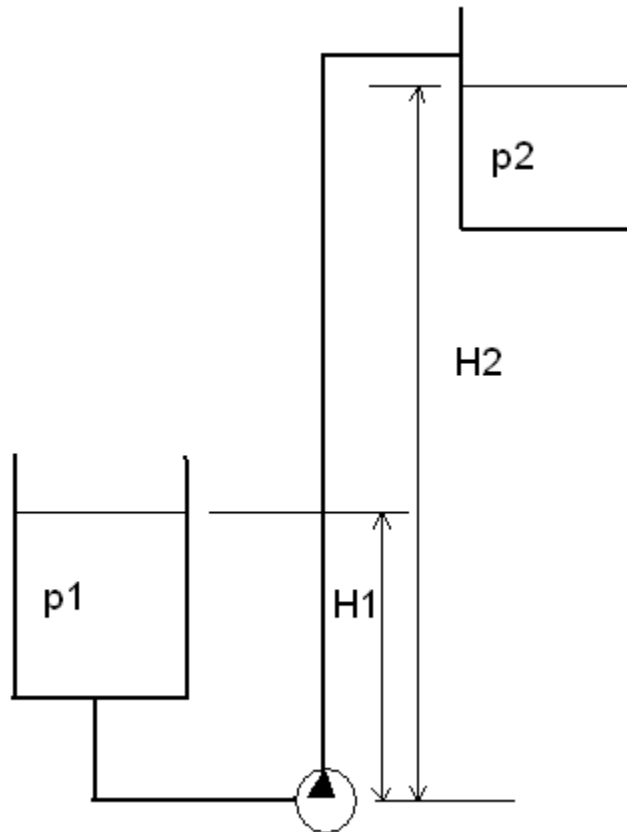
$$H_{st} = H_2 - H_1 + (p_2 - p_1)/(\rho * g) \quad (5.)$$

jossa

$H_{st}$ = staattinen nostokorkeus	[m]
$H_1$ = pinnankorkeus imusäiliössä	[m]
$H_2$ = pinnankorkeus painesäiliössä	[m]
$p_1$ = paine imusäiliössä	[Pa]
$p_2$ = paine painesäiliössä	[Pa]
$\rho$ = virtausaineen tiheys	[kg/m <sup>3</sup> ]
$g$ = putoamiskiihtyvyys (9,81)	[m/s <sup>2</sup> ]

Säiliöiden pinnankorkeudet mitataan pumpun imuaukon tasoon nähden. Jos pumppu on sijoitettu imusäiliön pinnan yläpuolelle, tulee kaavassa imusäiliön pinnankorkeus ( $H_1$ ) ilmoittaa negatiivisena. Kyseisessä työssä säiliöt eivät olleet paineistettuja, vaan järjestelmä oli niin sanotusti avoin järjestelmä, joten staattiseen nostokorkeuteen vaikuttivat vain pinnankorkeudet. Samoin pinnankorkeuksien vaihdellessa on staattinen

nostokorkeus laskettu epäedullisimman tilanteen mukaan, jolloin imusäiliön pinta on alimmillaan ja painesäiliön pinta korkeimmillaan.



KUVA 5. Staattinen nostokorkeus. (Kuva Juho Airaksinen)

Dynaamisessa nostokorkeudessa ( $H_{dyn}$ ) summautuvat kaikki putkiston painehäviöt. Tällöin dynaaminen nostokorkeus on riippuvainen myös käytettävästä tuotosta. Tehdessä tarkkoja pumpun mitoituksia dynaaminen nostokorkeus tulisi laskea eri tuoton arvoilla, joita pumpulla tullaan käyttämään. Näin saadaan mitoitettua pumpusta paras hyötysuhteen alue. Mutta näin toimittaessa on prosessin pysyttävä muilta osin vakaana, kuten esimerkiksi virtausaineen tiheyden ja partikkelikoon kannalta. Kyseisessä työssä dynaaminen nostokorkeus on laskettu maksimituottoa hyväksi käyttäen. Dynaaminen nostokorkeus lasketaan kaavalla 6.

$$H_{dyn} = \Delta p_v / (\rho * g) \quad (6.)$$

jossa

$H_{dyn}$ = dynaaminen nostokorkeus	[m]
$\Delta p_v$ = putkiston + rakenneosien virtausvastus	[Pa]
$\rho$ = virtausaineen tiheys	[kg/m <sup>3</sup> ]
$g$ = putoamiskiihtyvyyys (9,81)	[m/s <sup>2</sup> ]

Kun staattinen ja dynaaminen nostokorkeus on saatu määritettyä, voidaan laskea todellinen pumpulta vaadittava nostokorkeus, (kaava 7).

$$H = H_{st} + H_{dyn} \quad (7.)$$

jossa

H = tarvittava nostokorkeus	[m]
H <sub>st</sub> = staattinen nostokorkeus	[m]
H <sub>dyn</sub> = dynaaminen nostokorkeus	[m]

### 5.5 Pumpun käytettävissä oleva imukorkeus

Pumpun käytettävissä oleva imukorkeus eli NPSH (Net Positive Suction Head) on tärkeä määrittää erityisesti kavitaation estämiseksi. Kun halutaan varmistaa pumpun luotettava toiminta, tulee huolehtia siitä, että pumpun sisällä olevan nesteen paine pysyy koko ajan vallitsevan ulkoilmanpaineen yläpuolella. Tämän varmistamiseksi on kehitetty laskentamenetelmä, NPSH arvo, (kaava 8).

$$NPSH_a = (H_1 - H_{pumppu}) + \frac{(p_1 - p_H - \Delta p_{imu})}{(\rho * g)} \quad (8.)$$

jossa

NPSH <sub>a</sub> = käytettävissä oleva imukorkeus	[m]
H <sub>1</sub> = imusäiliön pinnankorkeus	[m]
p <sub>1</sub> = abs. paine imusäiliössä	[Pa]
p <sub>H</sub> = nesteen höyrynpaine	[Pa]
Δp <sub>imu</sub> = imuputken virtausvastus	[Pa]
ρ = virtausaineen tiheys	[kg/m <sup>3</sup> ]
g = putoamiskiihtyvyyys (9,81)	[m/s <sup>2</sup> ]

NPSH<sub>a</sub> (Net Positive Suction Head) tarkoittaa käytettävissä olevaa NPSH-arvoa, ja sen tulee aina olla suurempi kuin pumpun toimittajan ilmoittama NPSH<sub>r</sub> (Net Positive Suction Head required) -arvo. Liian matala NPSH arvo voi johtaa pumpun kavitointiin. Työssä oli käsittelyssä avoin järjestelmä, jolloin imusäiliön paine on sama kuin vallitseva ulkoilmanpaine. Riippuen pumpun sijainnista merenpintaan nähden muuttuu myös ulkoilmanpaine, tällöin paineen vaihtelu on otettava huomioon. Kaivosteollisuudessa pumpun sijainti voi poiketa paljonkin merenpinnan tasosta. Varmuusmarginaa-

lina käytetään yleensä 1 - 2 metriä. (Metso Minerals AB. 2009. 65-67. Vuorikari O. 2007. 34.)

## 6 PUMPPUTRENDIEN TUTKINTA

Yaralla on käytössä Metso Oy:n kehittämä prosessin ohjausjärjestelmä, MetaFrame DNA trend. Järjestelmällä ohjataan koko rikastamon toimintaa sähköisesti ohjaamosta käsin. Järjestelmä myös kerää ja tallentaa käytetyt pumppujen ohjausarvot sekä esimerkiksi virtausaineiden tiheydet.

Kyseisen järjestelmän seurantaversiolla tarkasteltiin pumppujen toimintaa pitemmällä ajalla. Kaikista pumpuista oli kerätty ohjaustietoa ainakin kahden vuoden ajan, jona aikana pumppuja oli käytetty erilaisissa tilanteissa ja eri kuormituksilla. Itse ohjelman opettelu ja tiedon etsiminen otti oman aikansa, sillä prosessikaan ei ollut ennestään tuttu.

Trendien tutkinnassa selvisi parhaiten pumppujen tämänhetkinen tilanne. Jo pelkkien ohjaustietojen perusteella pystyi havainnoimaan pieneksi käyneitä pumppuja sekä muita ongelmatapauksia. Jatkuvasti maksimiohjauksella pyörivät pumput olivat käyneet tuottojen perusteella pieniksi. Pahimmissa tapauksissa varalla olevaa pumppua jouduttiin pyörittämään varsinaisen pumpun rinnalla takaamaan vaadittu virtaus. Trendien tutkinta vahvisti laskemalla saatujen arvojen todenmukaisuuden. Prosessia seuraamalla tarkentui myös vaahtoavan nesteen käyttäytyminen pumppauksessa. Vaikka pumppu pyöri tasaisella kierrosnopeudella, virtauksesta tuli jaksottaista ja virtausarvot heittelivät välillä huomattavastikin. Eräs epäkohta pumppauksessa oli myös se, että pumppujen kierrosnopeuden säätö ei aina vaikuttanut suoraan pumpun virtaukseen. Kierrosnopeuden kasvatus ja virtauksen kasvu ei korreloinut pumppuvalmistajien antamien pumppukäyrien kanssa. Tämä ongelma oli yleinen monessa pumppaustapahtumassa, ja se johtui pääsääntöisesti lietteen ilmapitoisuudesta ja muista ominaisuuksista. Hankalaksi ongelman teki se, ettei se ollut systemaattista, vaan johtui pitkälti tekijöistä, joita ei mittarein pystynyt mittaamaan. Joskus pieni kierrosnopeuden lasku saattoi nostaa virtausta, vaikka virtauksen olisi tässä tapauksessa pitänyt laskea.

Kaikkiaan selvisi, että pumppujen suurennustarpeet pystyisi arvioimaan hyvin myös pelkästään pumpputrendejä tutkimalla. Pumpputrendejä tutkimalla pystyi määrittämään tiettyihin tapauksiin korjauskertoimet todellisen pumppauksen ja teoreettisen arvon välille. Ottamalla tämä kerroin huomioon valittaessa uusia pumppuja voitaisiin uudet pumput mitoittaa paremmin tarpeisiinsa toimiviksi. Todellisen pumppukoon



määrittämiseen tarvittaisiin kuitenkin laskennallinen pohja, jolla tarkat toimintapisteet ja putkiston vastukset pystyttäisiin määrittämään.

## 7 PUMPPUJEN VERTAILU

### 7.1 Hankintakustannukset

Kaikki kustannukset taulukoitiin Excel-taulukkolaskentaan. Hankintakustannuksiin otettiin huomioon pumppuyksikön ostohinta. Pumppuyksikköön kuului peruspumpun lisäksi moottorituki ja kiilahihnakäytön osat. Kaikki tarjotut pumpput olivat kiilahihnakäyttöisiä. Käyttömoottoreiden vertailu ei kuulunut työhön, mutta pumppujen ottamat tehot pyrittiin ottamaan huomioon moottorivalintojen helpottamiseksi. Hankintakustannusten perusteella Metson ja Giw:n tarjouksilla ei ollut suurta eroa. Metson tarjous oli noin 16 % halvempi.

### 7.2 Kunnossapitokustannukset

Yksi syy tämän opinnäytetyön tarpeellisuudelle oli vanhojen pumppujen kallis huolto ja kunnossapito. Kun nykyiset pumpput ovat pyörineet 70-luvulta asti ja niitä on säännöllisesti jouduttu huoltamaan vuosittain, ovat kunnossapitokustannukset ylittäneet moninkertaisesti hankintakustannukset. Niinpä kunnossapitokustannuksia oli erityisesti syytä tarkastella. Lähtökohtana oli, että pumpun kunnossapitokustannukset määritettäisiin yksillä pumpun märkeen osilla, jotka olisivat juoksupyörä, pesä, imukaula ja mahdollinen kulutuslevy.

Rakenteellisesti nämä kahden pumppuvalmistajan pumpput olivat samanlaisia, joten kulutusosat olivat samat. Näiden varaosahintojen perusteella Giw:n tarjous oli noin 25 % halvempi.

### 7.3 Käytettävyys

Kustannusten tärkein valintakriteeri oli kunnossapitokustannukset. Rahallisesti kyseiset kustannukset olivat helppo laskea tarjouksien perusteella. Hankalaa oli kuitenkin arvioida pumppujen käytettävyttä eli sitä, kuinka usein eri pumppumalleja jouduttaiisiin huoltamaan ja vaihtamaan niiden kriittisimpiä osia.

Kaikissa tarjotuissa pumpuissa käytettävät materiaalit olivat lähestulkoon samoja, joten käytettävyyttä pyrittiin arvioimaan erityisesti juoksupyörien massoilla ja siten materiaalivahvuuksilla. Kuten aiemmin tässä työssä todettiin, on juoksupyörä lietteiden pumppauksessa erityisen rasituksen ja kulutuksen kohteena esimerkiksi kavitaation ja lietteessä liikkuvien partikkelien takia. Juoksupyörän kulumisen heikentää erityisesti pumppaustehoa. Näin pumpun huoltoväliä pyrittiin arvioimaan juoksupyörän kulumisen kannalta. Vaikka materiaalit olivat lähes samoja eri pumppuvalmistajien välillä, oli juoksupyörien massoissa kuitenkin huomattavia eroja.

Pääsääntöisesti Giw:n juoksupyörät olivat selvästi Metson vastaavia painavampia. Kaikkiaan painoero oli noin 32 %, joten Giw:n osien oletetaan myös kestävän pidempään.

#### 7.4 Vertailun yhteenveto

Hankintakustannusten perusteella Metson tarjous olisi halvempi. Tässä työssä tärkeämpänä pidettiin kuitenkin kunnossapidon aiheuttamia kustannuksia. Pumpun määränpäänosat olivat Giw:llä halvemmat. Jos vertaillaan tarjousten perusteella kokonaiskustannuksia, kustannukset ovat samat näiden kahden valmistajan välillä, yksien määränpäänosien vaihdon jälkeen. Jos ajatellaan, että pumput pyörivät taas seuraavat 40 vuotta, on Giw:n tarjous näillä varaosahinnoilla parempi. Vaikka osien vaihtoväliä ei voida määrittää tarkasti, voidaan Giw:n osien olettaa kestävän pidempään suuremman massan perusteella.

Lisäksi pumppukäyriä vertailemalla lasketut toimintapisteet käyvät paremmin Giw:n pumppujen käyriin. Pidemmällä aikavälillä myös tämä tulee näkymään kustannuksissa Giw:n eduksi.

## 8 YHTEENVETO

Opinnäytetyön tarkoituksena oli määrittää rikastelietettä pumppaavien keskipakopumppujen toimintapisteet uudelleen. Työssä tutkittiin noin 30:a pumppua Yaran Siilinjärven rikastamolla. Pumppujen päivittämiseen syynä oli vanhojen pumppujen kallis kunnossapito ja nousseet tuotantotavoitteet. Lisäksi uusista pumpuista pyydettiin tarjoukset, joiden perusteella annettiin Yaralle suositus valittavista pumpuista.

Pumppujen ja putkistojen toimintapisteiden laskennassa vaativinta oli tiedonhallinta. Noin 30 pumpun tiedot taulukoitiin, jotta kokonaisuus ja lopputulos olisivat hallittavissa. Selkeä taulukointi ja laskentamallit taulukkolaskentaohjelmaan jättivät hyvän pohjan Yaran henkilöstölle myös myöhempää tarkastelua varten.

Uudet toimintapisteet kertoivat selkeästi pumppujen päivitystarpeista. Hankaluutena oli vaahtoavien lietteiden käsittely. Mitään yksiselitteistä yhtäläisyyttä kavitointiin ei löytynyt kyseisissä tapauksissa. Tiedetään vain kalsiumkarbonaatin ( $\text{CaCO}_3$ ) aiheuttavan paljon vaahtoa prosessissa. Tässä tilanteessa vaahtoamista pystytään hillitsemään mäntyrasvahapolla, mutta mäntyrasvahappo on haitallista prosessin myöhemmissä vaiheissa ja sitä joudutaan suodattamaan pois jätekäteen. Kaikkiaan pieneksi kävi kymmenen pumppua, näistä pyydettiin tarjoukset Metso Minerals Finland Oy:ltä, Giw Industries Oy:ltä sekä Weir Minerals Oy:ltä.

Tähän työhön vertailtavaksi saatiin Metson ja Giw:n tarjoukset. Weir:n koko tarjous ei ennättänyt ajoissa, vaan varaosahinnat jäivät puutteellisiksi lisäselvitysten vuoksi. Weir:n tarjous on tarkoitus vertailla tämän kirjoitustyön jälkeen, sillä se on hyvin varteenotettava vaihtoehto ja Yara on tehnyt paljon yhteistyötä Weir:n kanssa. Tämän hetkisten tarjousten perusteella Giw:n vaihtoehto on pitkällä aikavälillä parempi.

## LÄHTEET

Bergius, Blomsten, Hedenfalk, Jonsson, Kempe, Nilsson, Pegert, Ullgren ja Wennström. 1975. *Pumppaustekniikka, Nesteiden pumppaus*. Tukholma. Kääntänyt ja suomen oloihin soveltanut A. Leonard. 1978. Helsinki. Insinööritieto Oy.

Edupoli 2009. Uudenmaan kemian alan virtuaalikoulu. *Keskipakopumppu* [viitattu 7.4.2011]. Saatavissa: <http://www.edupoli.fi>

Metso Minerals AB. 2009. *Slurry pump Basic*, edition 4. Sala, Sweden.

Serlachius, konepajateollisuus. 1976. *Huolto- ja varaosakirja, keskipakopumppu LPN*. Mänttä.

SFS 4874 Pumput. Nesteiden siirtoon käytettyjen pumppujen ryhmittely ja toimintaperiaatteet, Suomen standardoimisliitto.

Sulzer pumps, *Application Survey*. Kemira Chemicals Oy, Siilinjärvi, Apatiittirikastamo.

Yara Suomi. Historia. [viitattu 4.4.2011]. Yara A. Saatavissa: <http://www.yara.fi>

Yara Suomi. Tuotantolaitokset Suomessa. [viitattu 4.4.2011]. Yara B. Saatavissa: <http://www.yara.fi>

Vuorikari O. 2007. *Käytännön virtaustekniikkaa, Putkiston virtaustekninen mitoitus*. [viitattu 19.3.2011]. [webd.savonia.fi](http://webd.savonia.fi). Ei yleisesti saatavilla.

Warman pumput. 1996. *Käyttö- ja huoltoohjeet, AH-sarja*.



---

[www.savonia.fi](http://www.savonia.fi)

