

**Teemu Puumala**

## **PUTKISTOSUUNNITTELU**

**Opinnäytetyö**

**CENTRIA-AMMATTIKORKEAKOULU**

**Kemiantekniikan koulutusohjelma**

**Maaliskuu 2021**

**TIIVISTELMÄ OPINNÄYTETYÖSTÄ**

<b>Centria-ammattikorkeakoulu</b>	<b>Aika</b> Maaliskuu 2021	<b>Tekijä/tekijät</b> Teemu Puumala
<b>Koulutusohjelma</b> Kemiantekniikka		
<b>Työn nimi</b> PUTKISTOSUUNNITTELU		
<b>Työn ohjaaja</b> Risto Puskala		<b>Sivumäärä</b> 36 + 4
<b>Työelämäohjaaja</b> Risto Puskala		
<p>Opinnäytetyön tarkoituksena oli suunnitella Virtaus- ja energiatekniikan (Flow Dynamics &amp; Energy Technology) -opintojakson harjoitustyössä käytetyn putkiston sijoittelu prosessilaboratorioon (019) sen sijaittua aiemmin moottorilaboratoriossa (022). Opinnäytetyöhön valmistauduttiin edellä mainitun opintojakson kurssimateriaalia kertaamalla, minkä lisäksi tutustuttiin kirjallisuuteen, kuten Voimalaitostekniikka-oppikirjaan soveltuvin osin, jotta lukija sai käsityksen esimerkiksi pumpun valinnan merkityksestä. Opinnäytetyötä varten hyödynnettiin myös verkosta löytyvää materiaalia. Itse suunnittelutyö tehtiin piirto-ohjelmistolla 3D-tilaa vastaavissa olosuhteissa ja samalla hyödyntäen itse otettuja valokuvia mahdollisten fyysisten esteiden huomioimiseksi.</p> <p>Käytössä oli laskennallinen ja tilastollinen menetelmä, minkä ohella myös kyseessä oli kvalitatiivinen analyysi. Tutkimuksessa oli kyse teoreettisesta tarkastelusta koskien vielä olemassa olematonta järjestelyä. Putkiston ominaisuuksia selviteltiin laskemalla painehäviöt tietokoneavusteisesti Excel-ohjelmistolla ja edelleen painehäviöiden avulla vastuskertoimet. Teoreettinen peruste laskelmille saatiin valitsemalla tilavuusvirrat pumpun valmistajan laatimista tuottokäyristä. Vastuskerrointen avulla puolestaan voitiin todeta putkiston sileys, eli omien tutkimusten yhtäpitävyys valmistajan ilmoittamien putkia koskevien tietojen kanssa ns. Moodyn käyrästä hyödyntäen. Sen kanssa omista kuvaajista saatiin varsin yhtäpitävät. Tuloksien luotettavuuden arviointiin saattaa valmiin kokeellisen datan puuttumisen vuoksi liittyä pientä epävarmuutta, mutta toisaalta olettamusta tulosten luotettavuudesta tukee se, että painehäviölaskelmat tukevat valmistajan ilmoittamaa tietoa ja lisäksi teholaskelmissa pumppu todettiin valmistajan ilmoittamien tietojen nojalla prosessilaboratorion olosuhteissa ehdotetulle järjestelylle soveltuvaksi. Kokeellista dataa hankkiessa tuloksiin voi tulla epävarmuutta korkeintaan inhimillisistä virheistä.</p>		

**Asiasanat**

Moodyn käyrästä, Painehäviö, paikallisvastus, putkistosuunnittelu, reliabiliteetti, suhteellinen karheus, valideiteetti, virtausvastus

## ABSTRACT

<b>Centria University of Applied Sciences</b>	<b>Date</b> March 2021	<b>Author</b> Teemu Puumala
<b>Degree programme</b> Chemical Engineering		
<b>Name of thesis</b> PIPELINE DESIGN		
<b>Instructor</b> Risto Puskala	<b>Pages</b> 36 + 4	
<b>Supervisor</b> Risto Puskala		
<p>The purpose of this thesis was to present a pipeline design, using the knowledge provided by Flow Dynamics &amp; Energy Technology course. The experiment was based on the pipeline used in an exercise work as a part of the course. Previously, the pipeline used to be located in Motor laboratory (room 022), but there is a plan to move the pipeline into Process laboratory (room 019). In this study, a new arrangement for the pipeline was considered. Preparations for this thesis were made by reviewing the material of the course. Also, other material was used as well, such as textbook of power plant instrument and processes and theoretical textbooks on which also the course is based on. The purpose of using these books was to include in the theoretical part of this thesis what is the meaning of pipes and pumps, and their features. The new pipeline arrangement in room 019 was designed with the help of CAD footage received from Mr. Puskala and drawing the suggested pipeline arrangement with as simple software as Paint, with correct dimensions added as the image itself is not in scale. In addition, some photographs from 019 were used, in order to note any possible physical obstructions before drawing the pipeline. Also, existing equipment were used in the design process.</p> <p>In order to understand the functionality of new pipeline, the changes of water pressure (which is going to be the fluid in the pipeline, as it has been used before in 022) was estimated by computer aided calculation using the formulas from Flow Dynamics &amp; Energy Technology. The methods in this study were computational and calculational methods. As this study is only based on theoretical review, the reliability and validity of the results cannot be fully verified. However, as the calculations were computer aided (Excel), in these circumstances the result should be quite reliable. It will be seen over time whether the results are reliable or not, if other people are able to repeat these results in reasonable tolerances. Then, as other people gather experimental data, it will be much easier to fully estimate the reliability of the results. Also, if it is later decided that the pipeline will not be installed exactly as in this study, new theoretical data will be needed in the same way as in this study.</p>		

### Key words

Moody's diagram, drop in pressure, local resistance, pipeline design, reliability, relative roughness, resistance of flow, validity

## SUUREIDEN MÄÄRITTELY

Aluksi lista opinnäytetyössä esiintyvistä suureista yksiköineen (suluissa):

$\Delta p$  = Paine-ero (Pa)

$\rho$  = Tiheys ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )

$g$  = Maan putoamiskiihtyvyys ( $9,81 \text{ m}/\text{s}^2$ )

$H$  = Nostokorkeus (m)

$Q$  = Tilavuusvirta ( $\text{m}^3/\text{s}$ )

$P$  = Teho (W)

$\eta$  = Hyötösuhde (teoreettinen teho jaettuna todellisella teholla)

NPSH = Minimipaine, joka tarvitaan nesteen höyrystymispaineen lisäksi imuaukossa häiriöttömän toiminnan varmistamiseksi

$\dot{V}$  = tilavuusvirta (m/s)

$R$  = putkiston geometrinen muuttuja ( $\text{s}^2/\text{m}^5$ )

$Re$  = Reynoldsin luku (yksikötön, osana putkivirtausten laskelmia)

$w$  = virtausnopeus (m/s)

$l$  = putken pituus (m)

$d$  = putken halkaisija (m)

$\nu$  = kinemaattinen viskositeetti ( $\text{m}^2/\text{s}$ )

$A$  = Virtauksen poikkipinta-ala ( $\text{m}^2$ )

$d_h$  = Hydraulinen halkaisija (m)

$U$  = Märkäpiiri (m)

$\zeta$  = Yksikötön kertavastuskerroin paikallisten virtausvastusten (kuten putkiston mutkat) laskennassa

## TIIVISTELMÄ

## ABSTRACT

## SUUREIDEN MÄÄRITTELY

## SISÄLLYS

<b>1 JOHDANTO .....</b>	<b>1</b>
<b>1.1 Tutkimusmenetelmä ja sen valinta .....</b>	<b>2</b>
<b>1.2 Tutkimusmenetelmiä .....</b>	<b>3</b>
<b>1.2.1 Kvalitatiiviset menetelmät .....</b>	<b>3</b>
<b>1.2.2 Kvantitatiiviset menetelmät .....</b>	<b>3</b>
<b>1.3 Tutkimuksen validiteetti ja reliabiliteetti .....</b>	<b>4</b>
<b>2 PUTKISTOSUUNNITTELU .....</b>	<b>5</b>
<b>2.1 Putkistosuunnittelun teollisia toimijoita .....</b>	<b>5</b>
<b>2.2 Putkistosuunnitteluun liittyvät vaatimukset .....</b>	<b>5</b>
<b>2.3 Pumput nesteen siirrossa .....</b>	<b>6</b>
<b>2.3.1 Syrjäytyspumput .....</b>	<b>6</b>
<b>2.3.2 Dynaamiset pumput .....</b>	<b>7</b>
<b>2.4 Pumppujen toiminta: Teoria .....</b>	<b>8</b>
<b>2.5 Pumpun valinta ja sen käyttäminen .....</b>	<b>9</b>
<b>2.5.1 Pumpun häiriöt ja säädöt .....</b>	<b>10</b>
<b>2.5.2 Pumpun imukyky .....</b>	<b>11</b>
<b>2.6 Pumpun toimintapisteen määrittäminen .....</b>	<b>11</b>
<b>3 PUTKISTOVIRTAUKSET: TEORIAA .....</b>	<b>13</b>
<b>3.1 Pyöreät putkistot .....</b>	<b>13</b>
<b>3.2 Muut kuin ympyränmuotoiset poikkipinnat .....</b>	<b>15</b>
<b>3.3 Paikalliset virtausvastukset .....</b>	<b>16</b>
<b>4 PUTKISTOSUUNNITTELU: PUTKISTON UDELLEENSIJOITTELU .....</b>	<b>17</b>
<b>4.1 Putkiston uudelleensijoittelu .....</b>	<b>19</b>
<b>4.2 Painehäviön laskeminen .....</b>	<b>20</b>

<b>5 LASKUT .....</b>	<b>22</b>
<b>5.1 Neliönmuotoisen putkiston painehäviö .....</b>	<b>22</b>
<b>5.2 Ympyränmuotoisen putkiston painehäviö .....</b>	<b>24</b>
<b>5.3 Pumpun soveltuvuuden arviointi .....</b>	<b>27</b>
<b>6 TULOSTEN ARVIOINTI JA POHDINTA .....</b>	<b>33</b>
<b>LÄHTEET.....</b>	<b>35</b>
<b>LIITTEET .....</b>	<b>37</b>

## 1 JOHDANTO

Opinnäytetyö perustuu teoreettiseen tarkasteluun; Siihen ei ole antaa kokeellisen työn tarjoamaa tietoa, joten opinnäytetyössä keskitytään ehdotukseen putkiston uudelleen sijoittelusta ja sen suunnitteluun uusissa tiloissa. Teoreettisen tarkastelun osana on laskennallinen data, tässä tapauksessa painehäviöiden arviointia ilman kokeellista dataa. Teoreettinen tarkastelu on siis hyvin samankaltaista kuin esimerkiksi Tehdassuunnitteluprojektin opintojakson työskentely, jossa tutkimusongelman käsittely niin ikään rajoittui teoreettiseen tarkasteluun, eikä kokeellinen työ useinkaan ollut edes mahdollista. Kyseinen opintojakso sijoittuu kemiantekniikan opintojen loppuvaiheeseen. Siinä voidaan katsoa olevan opiskelijalle tarjolla tämän tutkimuksen kaltainen tutkimusongelma, jossa suunnitellaan teoreettisen tarkastelun pohjalle järjestelyä, joka olisi mahdollista sellaisenaan toteuttaa.

Tässä opinnäytetyössä tarkastellaan pumpun valinnan merkitystä. Tarkastelussa on prosessilaboratoriossa olevan pumpun toimintakäyrä, josta valitaan tilavuusvirtoja, joiden avulla puolestaan lasketaan painehäviöt suunnitellulle putkistolle. Painehäviön laskemisella voidaan päätellä se, onko pumpun kapasiteetti riittävä. Pumpun ominaisuuksia tarkastellessa hyödynnetään teollisuutta silmällä pitäen kirjoitettua kirjallisuutta, jonka tarjoama teoria sopii myös tähän opinnäytetyöhön. Opinnäytetyössä keskitytään keskipakopumppuun eli siihen, millainen prosessilaboratorionkin pumppu on, mutta esitellään lyhyesti myös muita pumpputyyppejä.

Opinnäytetyön lähteinä on käytetty Virtaus- ja energiatekniikan (Flow Dynamics & Energy Technology) opintojakson materiaalin ja sen sisältämän laboratoriotyöharjoitus Putkivirtauksen virtausvastukset -harjoitustyön ohella Markku Huhtisen, Risto Korhosen, Tuomo Pimiän ja Samu Urpalaisen kirjoittamaa kirjaa Voimalaitostekniikka. Se esittelee sähköä tuottavien voimalaitosten ja niiden sisältämien osasten toimintaperiaatteita. Teos on varsin laaja, mutta soveltui hyvin tietolähteeksi tähän opinnäytetyöhön. Putkistosuunnittelun kannalta kirjasta saatiin hyödyllistä tietoa esimerkiksi pumppujen ominaisuuksista, kuten kavitaatiosta. Kavitaatiosta kerrotaan tarkemmin johtopäätöksissä. Voimalaitostekniikka -kirjan ohella muita teoksia opinnäytetyön pohjatyössä olivat Willi Bohlin Teknillinen virtausoppi ja Kari Keskinen Kemian laitetekniikan taulukoita ja piirroksia. Putkistosuunnitteluun liittyviin asioihin tutustuttiin yksinkertaisesti internethakuja tekemällä. Hauilla haluttiin tarkastella esimerkiksi

putkistosuunnittelun teollisia sovellutuksia, jottei lukija jäisi putkistosuunnittelusta muodostamaan mielikuvaa pelkästään opinnäytetyöni pohjalta. Lisäksi tietoa hakiessa on tutustuttu esimerkiksi aikaisempiin opinnäytetöihin, joissa on sivuttu putkistosuunnittelua. Tämän tarkoituksena oli pitkälti tarkastella, missä laajuudessa putkistosuunnittelua on aikaisemmissa opinnäytetöissä käsitelty ja mitä kaikkea tekijät ovat tällöin tarkastelleet. Tämän tarkastelun avulla tavoitteena oli siis suunnitella oman opinnäytetyön suuntaviivoja, missä laajuudessa putkistosuunnitteluun liittyviä asioita kannattaa omissa opinnäytetyöissäni tarkastella muuten kuin omaan tutkimusongelmaan liittyen, jottei se paisu liikaa.

Putkistosuunnittelun teollisia sovellutuksia tarkastellessa tutustuttiin esimerkiksi siihen, mitkä yritykset tarjoavat putkistosuunnittelun palveluja. Tosin jo kesätyökokemukseni kautta esimerkiksi Caverion on minulle tullut tutuksi teollisuusalan toimijana, joskaan ei putkistosuunnittelussa vaan enemmänkin vuosihuoltoseisakkeihin liittyvissä huoltotöissä. Esittelen luvussa 2.1 lyhyesti Caverionin ja muiden putkistosuunnittelun teollisuuden toimijoiden toimintaa. Oman tutkimusongelmani kannalta puolestaan putkistosuunnittelun tärkein yksittäinen työkalu lienee tietokoneen piirto-ohjelmisto, jota käytettiin suunnitteluun. Teoreettinen tarkastelu sisältää esimerkiksi laskut, kuten painehäviön arvioinnin. Teoreettiseen tarkasteluun sisältyy myös tulosten luotettavuuden arviointi. Painehäviöiden arvoja tarvitaan, jotta voidaan selvittää, soveltuuko prosessilaboratoriossa käytössä oleva pumppu tässä opinnäytetyössä suunniteltuun ympäristöön moottorilaboratorion putkistolle prosessilaboratoriossa.

## **1.1 Tutkimusmenetelmä ja sen valinta**

Tutkimusmenetelmät voidaan jaotella kvalitatiivisiin eli laadullisiin ja kvantitatiivisiin eli määrällisiin menetelmiin. Tutkimusta voi tehdä esimerkiksi mallintamalla, tilastollisella ja kokeellisella menetelmällä. Tässä tapauksessa, koska kyseessä on teoreettinen tarkastelu olemassa olemattomasta järjestelystä, suoritetaan tutkimus laskennallisella ja tilastollisella menetelmällä, jota varten on luonnollisesti olemassa myös matemaattinen malli, tässä tapauksessa jäljempänä esitettävät laskukaavat. Laskennallisen menetelmän osalta tutkimuksessa hyödynnettiin Microsoftin Excel -ohjelmistoa, jonka toimintoja hyväksi käyttäen suoritettiin tutkimukseen liittyvät laskelmat. Samaista ohjelmistoa käytettiin myös tilastolliseen tutkimukseen, kun laskelmista laadittiin taulukot. (Aalto-yliopisto 2020)



Tutkimuksessa oli kyse kvantitatiivisesta eli määrää koskevasta tutkimuksesta. Luvussa 1.2 esitellään lyhyesti eri tutkimusmenetelmiä, joiden joukosta päädyttiin edellä mainittuihin menetelmiin.

## **1.2 Tutkimusmenetelmiä**

### **1.2.1 Kvalitatiiviset menetelmät**

Mallintaminen: Todellinen ilmiö kuvataan joko fyysisellä tai käsitteellisellä mallilla. Fyysisessä mallinnuksessa on kyse vaikkapa pienoismallista. Käsitteellisellä mallinnuksella puolestaan voidaan tarkoittaa vaikkapa matemaattista mallinnusta. Kokeellisessa menetelmässä pyritään selvittämään toistettavuutta sellaiselle järjestelylle, joka on jo olemassa. (Aalto-yliopisto 2020) Koska tässä tutkimuksessa kyseessä on vielä pelkkä teoreettinen tarkastelu, tulee kokeellinen menetelmä kysymykseen vasta, kun putkisto on jollain tapaa jo sijoitettu prosessilaboratorioon, joko tämän opinnäytetyön esittelemällä tai muulla tavalla. Lisäksi kokeellisessa menetelmässä selvitetään tarkastelun kohteena olevan järjestelyn käyttäytymistä standardisoituja menetelmiä ja materiaaleja käyttäen, pyrkien siihen, että menetelmän koetulokset ovat toistettavia.

### **1.2.2 Kvantitatiiviset menetelmät**

Laskennallinen menetelmä puolestaan on usein tietokoneavusteinen, jolloin säästyy huomattavasti enemmän aikaa, kun hyödynnetään vaikkapa Excel -ohjelmiston ominaisuudet. Laskentaohjelmisto auttaa huomattavasti etenkin ajankäytössä. Laskennallista menetelmää on tärkeää havainnollistaa kuvin, kuten tässäkin opinnäytetyössä on tehty. Tilastollinen menetelmä liittyy puolestaan jo aiemmin mainittuun kuvin havainnollistamiseen: saaduista tuloksista laaditaan graafinen esitys, jossa mallinnuksella saatuja tuloksia esitetään. Edellä mainitut menetelmät koskevat pääasiassa laboratoriolaitteita, joissa käytetään joitain aineita. Jos tutkimus puolestaan kohdistuu ihmisiin ja joihinkin ominaisuuksiin tutkimukseen osallistuvien ihmisten joukossa, on hyvä käyttää kyselytutkimusta. Kyselytutkimuksessa voidaan käyttää niin suurta joukkoa ihmisiä kuin halutaan, ja tutkimuksen kesto aiheesta riippuen voi myös vaihdella suurestikin. Sinällään kyselytutkimus käsitteenä on valtavan laaja-alainen. (Vehkalahti 2019, 11–13.)

### **1.3 Tutkimuksen validiteetti ja reliabiliteetti**

Tutkimuksen luotettavuuden arviointiin liittyy olennaisina osina validiteetin ja reliabiliteetin arviointi. Mainitussa järjestyksessä voidaan edellä mainittujen termien sanoa koskevan pätevyyden ja pysyvyyden arviointia. Validiteetti ilmaisee siis, kuinka päteviä ja todellisuutta vastaavia saadut tulokset ovat ja sitä, millainen kyky mittarilla on mitata sitä, mitä halutaan selvittää. Lisäksi on huomioitava ns. systemaattiset virheet, jotka voivat johtua esimerkiksi tutkijan väärästä työtavasta, mittarin viasta jne. Reliabiliteetillä puolestaan punnitaan tutkimustulosten johdonmukaisuutta ja samalla muun muassa arvioidaan mittarin pysyvyyden kautta tulosten toistettavuutta. (Kajaanin ammattikorkeakoulu 2020)

## **2 PUTKISTOSUUNNITTELU**

### **2.1 Putkistosuunnittelun teollisia toimijoita**

Teollisuuden merkittävistä putkistosuunnittelun toimijoista voi mainita esimerkiksi Caverionin ja Oukotekin. Caverion toimii Keski-Pohjanmaan ja Pohjanmaan teollisuudessa paitsi putkistosuunnittelun, myös muissa asiakastehtaiden tehtävissä. Caverionilla on omien sanojensa mukaan vahva osaaminen muun muassa teollisuuden modernisoinnin ja huoltohankkeiden suunnittelussa. Osaamista tarjotaan esimerkiksi sähkö-, teräsrakenne- ja putkistosuunnittelussa. (Caverion 2020)

Oukotek on oululainen yritys, joka tarjoaa muun muassa putkistosuunnittelua. Muut tarjottavat palvelut käsittävät prosessi- ja rakennussähkösuunnittelua, automaatio-suunnittelua ja instrumentointisuunnittelua. Oukotekillä on verkkosivujensa mukaan vahvaa osaamista esisuunnittelusta, erilaisista putkistoista, joustavuusanalyseistä, asennusvalvonnasta ja käyttöönottoon liittyvistä tehtävistä. Oukotekillä on käytössä AutoCAD, ja muitakin ohjelmistoja, kuten Autodesk Plant. (Oukotek 2020)

Kokkolassa on oma paikallinen putkistosuunnittelusta vastaava yritys Merius. Meriuksen 3D-tehdassuunnitteluun kuuluvat mm. materiaalivirtojen tarkastelu, tuotanto- ja kuljetinjärjestelmät, putkistosuunnittelu ja putkisillat. Meriuksella on toimipiste myös Oulussa. (Merius 2020)

### **2.2 Putkistosuunnitteluun liittyvät vaatimukset**

Tiedonhakuvaiheessa vastaan tulleista opinnäytetöistä tulee varsin hyvin esille putkistosuunnittelun liittyvien osaamisalueiden hallinnan tärkeys. Esimerkiksi selluteollisuudessa on erityisen tärkeää varmistaa muun muassa putkiston kestävyys, koska sellunvalmistuksessa liikkuu paljon erilaisia hyvin voimakkaita kemikaaleja, kuten lipeää eri muodoissa, klooridioksidia ja rikkihappoa. Nämä kemikaalit (kuten teollisuuskemikaalit yleensä) aiheuttavat esimerkiksi putkirikkojen yhteydessä vuodon vakavuudesta riippuen hyvin vakavia haittoja ympäristölle ja mahdollisen altistuksen saaneen työntekijän terveydelle. Lisäksi avainasemassa on käyttövarmuuden hallinta, johon puolestaan liittyy suunnittelun eri osa-alueiden riskien tunnistaminen ja niiden hallinta. Oikeanlaisesti suunniteltu putkisto

paitsi parantaa turvallisuutta, myös maksimoi putkiston käyttöiän. Tämä helpottaa myös putkistonsuunnittelusta vastaavan tahon ja asiakastehtaan välistä yhteistyötä, jotta jokavuotisessa huoltoseisakissa voidaan arvioida, mitkä putkistot milloinkin on uusittava. Kuten monessa muussakin teollisuudessa, myös sellunvalmistuksessa koko toiminnan kannattavuudessa putkiston toimintavarmuus on varsin keskeisessä osassa. Toimintavarmuuteen ja sen varmistamiseen puolestaan liittyy esimerkiksi materiaalinvalinta: Eri materiaaleilla on erilaisia kestävyysominaisuuksia, joten väärää materiaalia oleva putkisto kuluu loppuun haluttua nopeammin. Tällöin kustannukset kasvavat paitsi materiaalin uusinnan, myös suunnitteluun kuluvien työtuntien kannalta. Materiaalin valintaan vaikuttaa useita tekijöitä, kuten tietyn materiaalin lämmönkestokyky, prosessin eri lämpötilojen ollessa tiedossa jo suunnitteluvaiheessa. (Kääriäinen 2017, 27-28)

## **2.3 Pumput nesteen siirrossa**

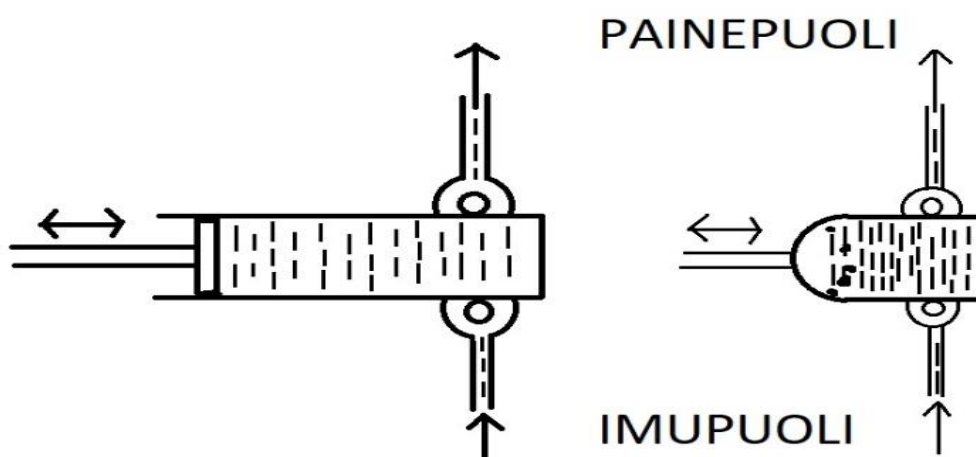
Kun puhutaan nesteen siirrosta, tarvitaan niiden liikkeeseen pumppuja. Nesteen siirtoon käytettävät pumput ovat jaettavissa toimintaperiaatteen perusteella kahteen pääryhmään, eli syrjäytuspumppuihin ja dynaamisiin pumppuihin. Edelleen dynaamiset pumput voidaan jakaa keskipakopumppuihin ja aksiaalipumppuihin, kun taas syrjäytuspumput mäntä-, kalvo-, siipi-, ruuvi-, letku- ja hammaspyöräpumppuihin.

### **2.3.1 Syrjäytuspumput**

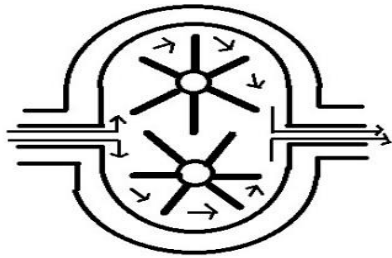
Syrjäytuspumpuissa syrjäytyselin syrjäyttää pesässä olevan nesteen paineistettuun poistoputkeen. Tällöin tilavuusvirta ( $Q$ ) säilyy käytännössä vakiona riippumatta nostokorkeuden ( $H$ ) suuruudesta. Johtuen edellä mainitusta tilavuusvirran käyttäytymisestä suhteessa nostokorkeuden muutokseen, syrjäytuspumput ovat käyttökelpoisia, kun nestevirta halutaan pitää vakioarvossa riippumatta vastapaineen suuruudesta. Kuitenkin pumppu kannattaa varustaa imupuolelta painepuolelle nestettä päästävällä ylivirtausventtiilillä, sillä muussa tapauksessa pumppujen akselitiivisteet voivat särkyä pumppujen käydessä suljettua venttiiliä vasten.

### 2.3.2 Dynaamiset pumput

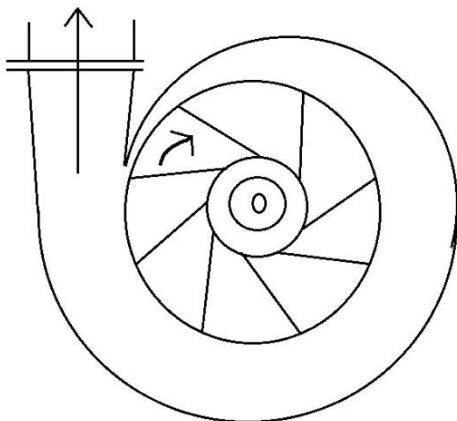
Dynaamisten pumppujen toiminta puolestaan perustuu mekaanisen tai liike-energian muuttamiseen liike- ja paine-energiaksi. Toisin kuin syrjäytyspumppujen tapauksessa, dynaamisten pumppujen kohdalla, kun tilavuusvirta  $Q$  kasvaa, nostokorkeus  $H$  laskee. Dynaamisiin pumppuihin kuuluvat keskipako-, aksiaali- ja suihkupumput. Näistä keskipakopumppu on yleisin nesteen siirrossa käytettävä pumpputyyppejä, jonka valinta on tarkastelun kohteena myös tämän opinnäytetyön tutkimusongelmassa. (Huhtinen, Korhonen, Pimiä & Urpalainen 2018, 135.) Kuvissa 1- 3 esitellään muutamia pumpputyyppejä.



KUVA 1: Mäntä- ja kalvopumpun toimintaperiaatteet ja rakenteet. Vasemmalla mäntäpumppu, oikealla kalvopumppu. (Mukaiillen: Puskala, 2016)



KUVA 2: Hammaspyöräpumpun toimintaperiaate. Nuolet osoittavat kuljetettavan aineen kulku- ja hammaspyörien pyörimissuunnat. (Mukaiillen: Puskala, 2016)



KUVA 3: Keskipakopumpun rakenne. Nuolet osoittavat juoksupyörän pyörimissuunnan ja aineen virtaussuunnan. (Mukaiillen: Puskala, 2016)

## 2.4 Pumppujen toiminta: Teoria

Tärkeimpiä pumppuja koskevia suureita ovat tilavuusvirta  $Q$  ( $\text{m}^3/\text{s}$ ), nostokorkeus  $H$  (m), tehon tarve  $P$  (W) ja hyötysuhde  $\eta$ . Näiden keskinäistä riippuvuutta kuvaillaan pumpun ominaiskäyrästöillä, jollainen tässäkin opinnäytetyössä nähdään työn tutkimusongelman tarkastelun yhteydessä. Avataan hieman edellä mainittuja suureita lisää: Yleensä kun puhutaan nostokorkeudesta, tarkoitetaan pumpun nesteelle

aikaansaamaa paineen kasvua. Paine-eron ja nostokorkeuden yhteyttä toisiinsa kuvataan seuraavalla yhtälöllä:

$$\Delta p = \rho g H \quad (1)$$

Selitykset:  $\Delta p$  on paine-ero,  $\rho$  nesteen tiheys,  $g$  putoamiskiihtyvyys ( $9,81 \text{ m/s}^2$ ) ja  $H$  nostokorkeus.

Teoreettinen tehon tarve  $P$  voidaan laskea kertomalla yhtälön (1) mukaisesti paine-ero tilavuusvirralla.

$$P_{\text{teor}} = \rho g H Q \quad (2)$$

Yleensä kuitenkin pumpun tehon tarve on todellisuudessa teoreettista tehon tarvetta suurempi, joten pumpun häviöt huomioidaan hyötysuhteella:

$$\eta = \frac{P_{\text{teor}}}{P_{\text{tod}}} \quad (3)$$

Pumpun akseliteho puolestaan lasketaan yhtälöllä (4):

$$P = \Delta p * \dot{V} \quad (4)$$

## 2.5 Pumpun valinta ja sen käyttäminen

Pumpun valintaperusteita ovat putkistossa haluttavan virtaavan nesteen määrä ja nostokorkeus. Alustava valinta tehdään nostokorkeuden ja tilavuusvirran perusteella kaikista pumpuista, joiden joukosta valitaan parhaiten soveltuva pumppu. Seuraavaksi tarkastellaan ominaiskäyrästä, josta voidaan valita tapauskohtaisesti parhaiten soveltuva joko juoksupyörän halkaisija tai kierrosluku. Yleensä pumpulla on maksimi tilavuusvirta, minkä lisäksi pumppua on voitava säätää pienemmällekin nestevirralle. Aiemmin mainittu paine-ero muodostuu pumpussa niin sanotuista staattisesta ja dynaamisesta paineesta. Staattinen paine pysyy vakiona tilavuusvirran vaihtuessa, mutta dynaaminen paine on riippuvainen putkiston virtausvastuksista aiheutuvista painehäviöistä, jotka kasvavat virtausnopeuden kasvun suhteen

sen neliönä, eli toisessa potenssissa. Mitä pienempi staattisen paineen osuus kokonaispaineesta maksiminestevirralla, sitä voimakkaammin pienenevä on pumpulla tuotettava paine.

### 2.5.1 Pumpun häiriöt ja säädöt

Pumpun imuaukon paine laskee sitä mukaa, mitä korkeammalle pumppu on asennettu verrattuna imusäiliön nesteen pintaan. Mikäli imupaine laskee veden höyrystymispaineeseen, veteen syntyy höyrymuodostelmia, ja kuplat siirtyvät nestevirran mukana kohtaamaan keskipakovoiman synnyttämän paineen. Tämän paineen ollessa tarpeeksi suuri, höyry tiivistyy nopeasti ja kuplia ympäröivä vesi lyö siipipyörästön siipiin suurella voimalla. Tästä muodostuu vasaran iskua metallipintaa vasten muistuttava ääni, jolloin puhutaan kavitaatiosta. Jatkuvan kavitoinnin seurauksena metallipinta alkaa särkyä. Kavitaatioilmiö on hallittavissa niin sanotulla kuristuksella, joka tehdään virtaukselle pumpun painepuolella. Kuristussäädössä säätöventtiiliä kuristetaan, minkä seurauksena putkivirtausvastus kasvaa, mistä taas seuraa nostokorkeuden kasvu ja tilavuusvirran pienentyminen.

Pumpulle voi tehdä myös kierrosnopeussäätöjä. Yleensä kun kierroslukua muutetaan, muiden toiminta-arvojen muutosta voi tarkastella pumpun valmistajan laatimasta ominaiskäyrästöstä. Mikäli tämä ei ole mahdollista, voidaan kierroslukumuutoksen vaikutusta arvioida yhtälöillä (5)-(7):

$$Q_1 / Q_2 = n_1 / n_2 \quad (5)$$

$$H_1 / H_2 = (n_1 / n_2)^2 \quad (6)$$

$$P_1 / P_2 = (n_1 / n_2)^3 \quad (7)$$

Yhtälön (5) mukaan tilavuusvirtojen suhde on suoraan verrannollinen kierroslukujen suhteeseen, nostokorkeuksien suhde puolestaan kierroslukujen suhteen neliöön ja tehon suhde kierroslukujen kuutioon.



### 2.5.2 Pumpun imukyky

Pumpulla on tietty imukyky, joka ilmoitetaan yleisesti NPSH-termin avulla. NPSH kertoo, minkä suuruisen paineen pumpun imuaukossa on vallittava nesteen höyrystymispaineen ohella, jotta pumppu voi toimia imun kannalta suotuisasti. Sallittu imukorkeus on laskettavissa yhtälöllä (8):

$$H_i \leq (P_0 - P_h) / \rho g - \text{NPSH} - H_v \quad (8)$$

Yhtälössä (8)  $H_i$  = imukorkeus,  $P_0$  nesteen pintaan kohdistuva paine imusäiliössä,  $P_h$  veden höyrystymispaine ja  $H_v$  imujohdon virtausvastus painekorkeutena ilmaistuna (m nestepatsasta). (Huhtinen ym. 2018, 133–140.)

### 2.6 Pumpun toimintapisteen määrittäminen

Kun muodostetaan samaan kuvaajaan pumpun ja putkiston ominaiskäyrät, muodostuu näiden leikkauskohtaan pumpun toimintapiste. Toimintapiste on mahdollista määrittää laskennallisesti yhtälöiden (9) ja (10) avulla:

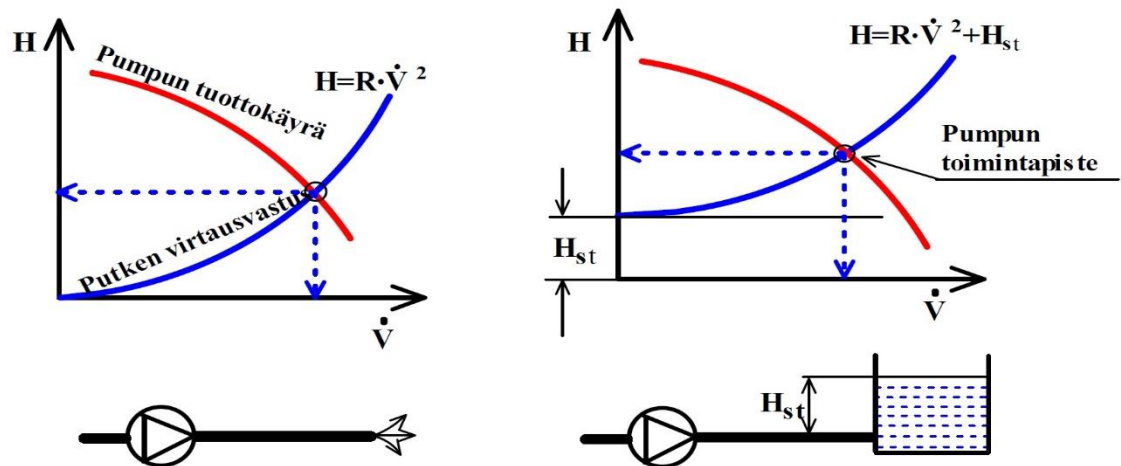
$$H = R \dot{V}^2 \quad (9)$$

Yhtälössä  $H$  = painehäviö (m),  $\dot{V}$  = tilavuusvirta (m<sup>3</sup>/s) ja  $R$  = putkiston geometrinen muuttuja (s<sup>2</sup>/m<sup>5</sup>)

Edelleen,  $R$  on määritettävissä seuraavasti:

$$R = \frac{\sum \zeta}{2 A^2 g 10^6} \quad (10)$$

Yhtälössä  $A$  = putken poikkileikkauksen pinta-ala ja  $g = 9,81 \text{ m/s}^2$  eli Maan putoamiskiihtyvyyys.



KUVA 4. Pumpun toimintapisteen määrittäminen (Puskala 2016)

Kuvassa 4 on kaksi tapausta pumpun toimintapisteen määrittämisestä edellä kuvatulla tavalla. Vasemmanpuoleisen tapauksen käyrästä osoittaa, mistä käyrät pelkästään muodostuvat. Oikeanpuoleinen tapaus on muuten samanlainen, mutta siinä on huomioitu myös säiliössä olevan nesteen hydrostaattinen paine ( $H_{st}$ ). Toimintapistestä voidaan todeta sitä koskevat nostokorkeus ja vastaava virtaama, eli  $\dot{V}$ .

### 3 PUTKISTOVIRTAUKSET: TEORIAA

#### 3.1 Pyöreät putkistot

Kun kokoon puristumaton neste virtaa putkessa, syntyy kitkan vaikutuksesta painehäviö. Mikäli paine on alussa  $p_1$ , on se tällöin loppupaineen  $p_2$  ja painehäviön  $\Delta p$  summa:

$$p_1 = p_2 + \Delta p \quad (11)$$

Putkistovirtaus on joko laminaarista tai turbulenttista. Laminaarisen virtauksen tapauksessa riittävän pitkällä putken alkupäästä, virtaus kulkee akselin suuntaisina kerroksina. Siinä missä laminaarisen virtauksen tapauksessa puhutaan edellä mainitun mukaisesta kitkahäviöstä, turbulenttisessa virtauksessa puhutaan lisäksi putkistovirtauksen nopeusvaihteluista aiheutuvista pyörrehäviöistä. Putkistovirtauksen laminaarisuuden tai turbulenttisuuden voi tunnistaa myös laskemalla niin sanotun Reynoldsin luvun avulla. Kun Reynoldsin luku on alle 2 300, virtaus on laminaarista ja muussa tapauksessa turbulenttista. Reynoldsin luku voidaan laskea kaavalla (12):

$$Re = \frac{w \cdot d}{\nu} \quad (12)$$

Yhtälössä  $w$  = virtausnopeus (m/s),  $d$  = putken halkaisija (m) ja  $\nu$  kinemaattinen viskositeetti ( $m^2/s$ )

Yhtälössä (12) mainittu virtausnopeus voidaan keskiarvona määritellä useallakin tavalla, kuten puolet maksimivirtauksesta yhtälössä (13) tai jatkuvuusyhtälöllä yhtälössä (14):

$$w = \frac{1}{2} W_{\max} \quad (13)$$

$$w = \frac{\dot{V}}{A} \quad (14)$$

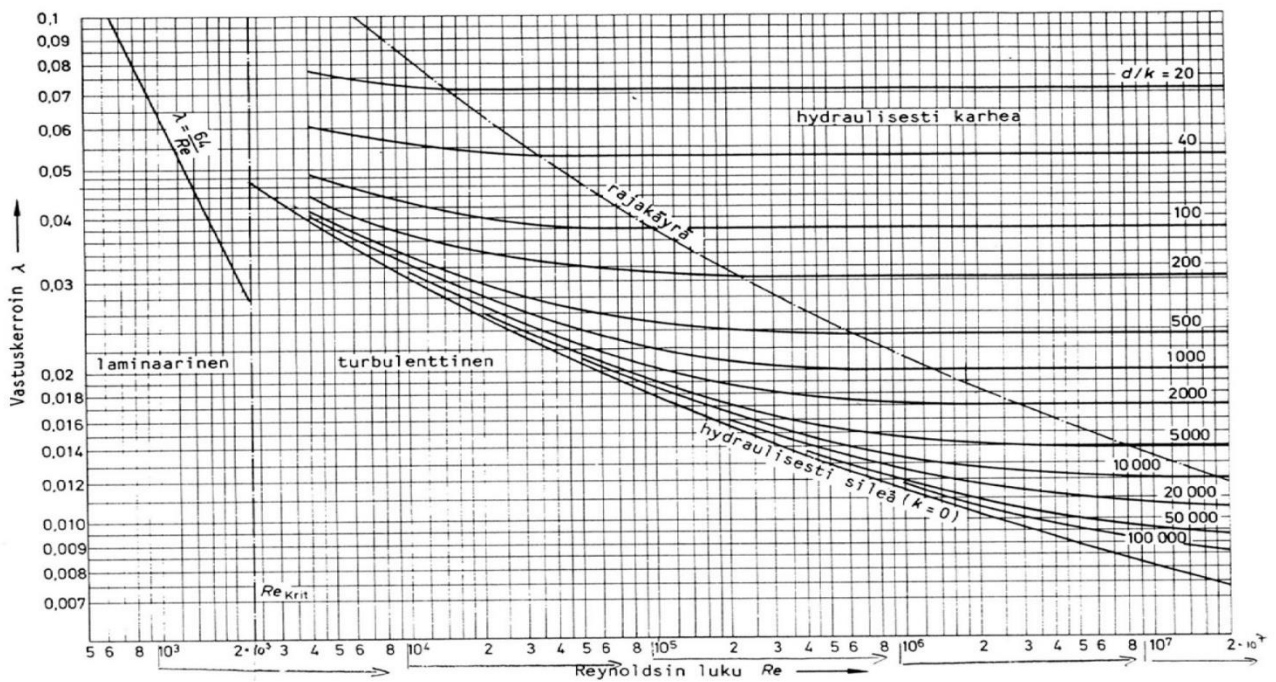
Jatkuvuusyhtälössä (11)  $\dot{V}$  = tilavuusvirta ( $\text{m}^3/\text{s}$ ) ja  $A$  = virtauksen poikkipinta-ala ( $\text{m}^2$ ). Kun tilavuusvirta  $\dot{V}$  pysyy vakiona, mutta putken poikkipinta-ala muuttuu, ovat poikkipinta-alojen ja virtausnopeuksien tulot suoraan verrannollisia keskenään:

$$\dot{V} = A_1 w_1 = A_2 w_2 \quad (15)$$

Yhtälö (15) ei kuitenkaan huomioi putkistovirtauksissa muodostuvaa kitkaa. Käytännössä virtauksen tapahtumiseksi täytyy putken päiden välillä vallita paine-ero  $\Delta p$ :

$$\Delta p = \lambda \frac{l}{d} \frac{\rho}{2} * w^2 \quad (16)$$

Toisin kuin laminaarisen virtauksen tapauksessa, turbulenttisen virtauksen kohdalla painehäviöön vaikuttaa myös putken karheus. Tässä avainasemassa on yhtälön (16) termi  $\lambda$  eli putkivirtauksen vastuskerroin: Se valitaan kuvan 5 (myös liite 2) esittämästä käyrästä Reynoldsin lukua ja suhteellista karheutta  $d/k$  ( $d$  = putken halkaisija,  $k$  = karheus) (Bohl 1984, 98–99.)



KUVA 5: Putkivirtauksen vastuskerroin  $\lambda$ :n selvittäminen Reynoldsin luvun ja suhteellisen karheuden  $d/k$  funktiona. (Keskinen 2012, 66 & Puskala 2016)

Virtausvastuskerroin  $\lambda$  voidaan myös kuvan 5 menetelmän ohella määrittää myös jollain kaavoista (17) – (21):

$$\lambda^{-0,5} = -2 * \lg\left(\frac{k/d}{3,71} + \frac{2,51}{Re * \lambda^{-0,5}}\right) \quad \text{Colebrook \& White (karhea)} \quad (17)$$

$$\lambda = 0,3164 * Re^{-0,25} \quad \text{Blasius: } 5 * 10^3 < Re < 10^5 \text{ (sileä)} \quad (18)$$

$$\lambda = 0,0054 + 0,396 * Re^{-0,3} \quad \text{Herrman: } 2,5 * 10^3 < Re < 1,5 * 10^6 \text{ (sileä)} \quad (19)$$

$$\lambda^{-0,5} = 2 * \lg(Re * \lambda^{0,5}) - 0,8 \quad \text{Prantl: } 2,5 * 10^3 < Re < 3,4 * 10^6 \text{ (sileä)} \quad (20)$$

$$\lambda = \frac{0,25}{\left[\lg\left(\frac{k}{3,7 * d} + \frac{5,74}{Re^{0,9}}\right)\right]^2} \quad \text{Swamee-Jain (karhea)} \quad (21)$$

Kaavat 17 ja 21 soveltuvat karheille putkistoille, kun taas 18–20 soveltuvat sileille. Kullekin on mainittu, millaisille Re-luvun arvoille yhtälöä voi käyttää.

### 3.2 Muut kuin ympyränmuotoiset poikkipinnat

Putkisto voi olla poikkileikkaukseltaan muunkin kuin ympyrän muotoinen, esimerkiksi neliön muotoinen, kuten tämänkin opinnäytetyön tutkimusongelmassa osa tarkastelun alla olevasta putkistosta. Kun tarkastellaan tällaista putkistoa, määritellään niin sanottu hydraulinen halkaisija,  $d_h$ . Se voidaan laskea yhtälön (17) mukaisesti:

$$d_h = \frac{4 * A}{U}$$

Yhtälössä  $A$  = poikkipinta-ala ja  $U$  = märkäpiiri. Painehäviön laskemiseen hydraulisen halkaisijan tapauksessa voidaan soveltaa yhtälöä (16):

$$\Delta p = \lambda \frac{l}{d_h} \frac{\rho}{2} * w^2$$

Reynolds-luvun laskemiseen puolestaan voidaan soveltaa yhtälöä (10):

$$Re = \frac{w * d_h}{\nu}$$

### 3.3 Paikalliset virtausvastukset

Paikallisia virtausvastuksia esiintyy putkiston erilaisissa rakenneosissa, kuten laajennuksissa (putken poikkipinta-ala muuttuu, mutta esimerkiksi poikkileikkaus pysyy sinällään samankaltaisena), mutkissa, venttiileissä jne. Yleisesti tällaisten vastusten laskeminen ei ole teoreettisesti kovin yksinkertaista, vaan pikemminkin paikallisvastukset ovat kokeellisesti havaittuja arvoja. Kuitenkin yhtälö (19) on olemassa paikallisvastusten laskemiseen:

$$\Delta p = \zeta * \frac{\rho * w^2}{2} \tag{19}$$

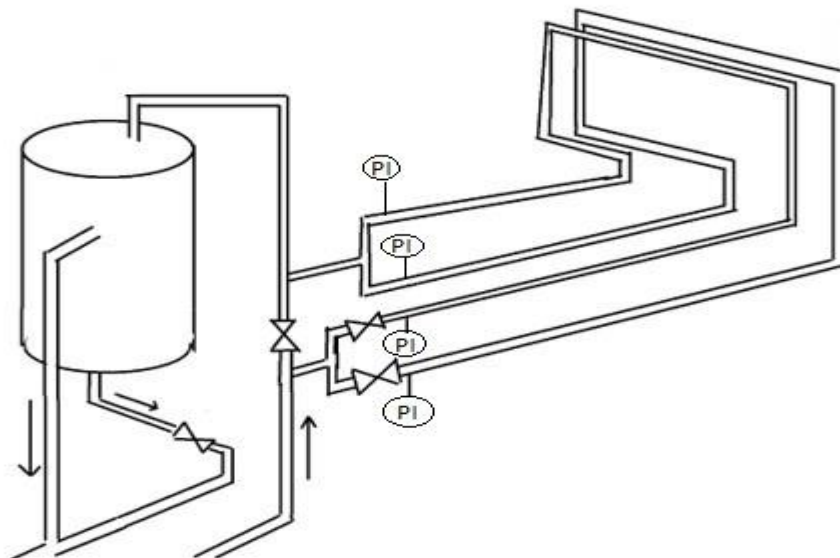
Yhtälössä  $\zeta$  on yksikötön kertavastuskerroin, jolle on erilaisia muuntokertoimia riippuen esimerkiksi putkiston mutkan kulmasta. Tätä tarkastelua olisi periaatteessa tehtävä sekä laminaariselle että turbulenttiselle virtaukselle, mutta koska laminaarisen virtauksen tapauksessa nämä vastukset ovat varsin harvinaisia, on esimerkiksi Virtaus- ja energiatekniikan oppimateriaaleissa käsitelty paikallisvastuksien kertavastuskertoimia pelkästään turbulenttisen virtauksen tapauksessa. (Puskala 2016)

#### 4 PUTKISTOSUUNNITTELU: PUTKISTON UUDELEENSIIJOITTELU

Putkivirtauksen virtausvastukset -harjoitustyössä käytetystä laitteistosta oli putkistoa käytettävissä tähän tutkimukseen seuraavasti:

- Pyöreä putkisto, sisähalkaisija 24 mm: 19,61 m
- Pyöreä putkisto, sisähalkaisija 32,5 mm: 19,27 m
- Neliömäinen putkisto: Sisäsivu 27 mm (sama kuin hydraulinen halkaisija, kappale 5.1)
- Putkiston 90 asteen mutkia:  $2 \cdot 6 = 12$  kpl

Kunkin putkiston osalta ilmoitetut käytettävissä olevat määrät tarkoittavat putkien suoria osuuksia. Virtausvastukset-harjoitustyön työohjeessa kullekin putkistolle on mainittu karheudeksi  $k = 0,05$ , mikä tarkoittaa liki sileää putkea. Tähän saakka putkisto on sijainnut moottorilaboratoriossa tilassa 022, josta sitä on suunniteltu siirrettäväksi prosessilaboratorioon tilaan 019. Prosessilaboratoriossa on käytössä Grundfosin tyyppiä CH1 4-30 A-W-G-BQQV oleva pumppu, joka maksimissaan kykenee pumppaamaan vettä 29 metrin korkeuteen ja nimellisvirtaamaksi mainitaan  $4,5 \text{ m}^3/\text{h}$ . Kuva 6 esittää alustavan suunnitelman, miten putkisto kulkisi prosessilaboratoriossa:



KUVA 6: Alustava suunnitelma putkiston sijoittelusta prosessilaboratoriossa, tila 019. (Tekijän henkilökohtainen arkisto)

Kuvassa 6 on piirretty putkiston alustavan sijoittelun suunnitelma prosessilaboratorion ylätasanteella. Ylätasanne on noin 3,5 metrin korkeudessa. Kuvaan on suunniteltu jo olemassa olevia (KUVA 7) ratkaisuja hyväksikäyttäen moottorilaboratoriosta siirrettävien putkistojen kulkureittiä. Putkiston olisi tarkoitus seurata prosessilaboratorion ylätasanteella myös kuvassa 7 näkyvää kaidetta, jotta sen asennus käytännössä olisi mahdollisimman helppoa. Kuvassa 6 nuolet osoittavat veden kulkusuunnan. Alaspäin osoittava nuoli liittyy säiliöön suunniteltuun ylivuotolinjaan.



KUVA 7. Prosessilaboratorion ylätasanteen vesisäiliö ja putkistoa. (Tekijän henkilökohtainen arkisto)



Kuten kuvasta 7 nähdään, kuvassa 6 piirretty käsiventtiili on jo olemassa. Vesisäiliön vieressä nousevaa putkea hyödyntäen olisi tarkoitus tehdä putkeen sivuhaarat, josta edelleen haarautuisi omiksi linjoikseen putkistot seuraavasti:

- Neliömäinen putkisto: 6 mutkaa, suorat osuudet 16 m
- Pyöreä putkisto: 6 mutkaa, suorat osuudet 16 m; 14 m (sisähalk. 24 mm) ja 2 m (sisähalk. 32,5 mm)

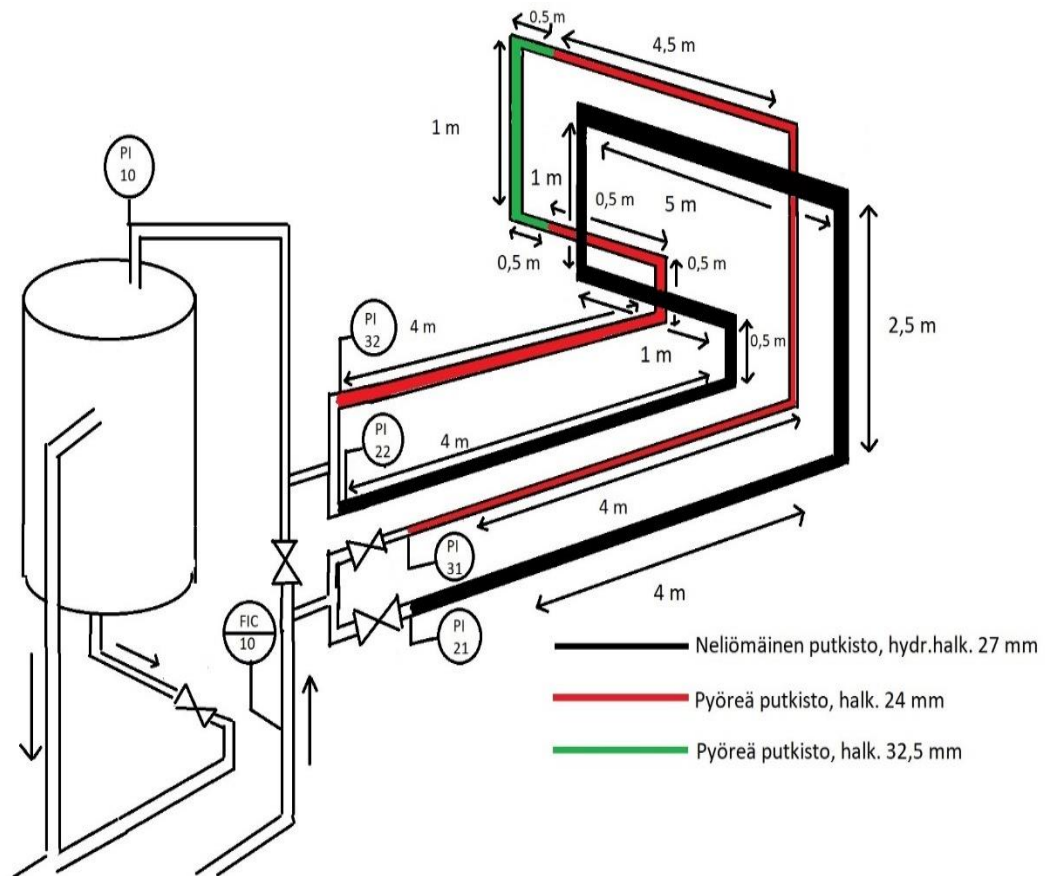
Kuvassa 6 ei ole ollut tarkoitukseen piirtää putkistoja pituudeltaan eri vaiheissa oikeisiin mittasuhteisiin, vaan esitellä putkiston kulku pääpiirteissään, jotta esimerkiksi nähtäisiin oikea määrä mutkia putkistossa. Putkistoon on kuvassa siis suunniteltu molemmille linjoille 6 mutkaa, jotka ovat kaikki 90 asteen mutkia. Molempien putkilinjojen alkupäässä olisi ensin joko magneetti- tai käsiventtiili, joiden jälkeen painemittaus. Välimittaus tulisi putkiston korkeimpaan kohtaan linjojen kolmansien mutkien jälkeen, tai ainakin valmius painemittarin asentamiseen jälkikäteen. Kolmas painemittaus voisi olla linjojen loppupäässä ennen paluuhaaraa tai kuten kuvassa 6 on suunniteltu, säiliön yläpuolella jo olemassa olevan putken ohessa.

#### **4.1 Putkiston uudelleensijoittelu**

Putkiston painehäviön laskemisessa tulee huomioida erinäiset paikallisvastukset, kuten mutkat ja laajennukset tai supistukset. Neliömäisen putkisto-osan tapauksessa ei esiinny laajennuksia tai supistuksia, vaan paikallisvastukset muodostuvat vain 90 asteen mutkista. Putkiston pyöreään linjaan on suunniteltu ennen kolmatta mutkaa metrin pituinen osuus laajempaa, eli halkaisijaltaan 32,5 millimetrin putkea, samoin toinen vastaava laajennus juuri ennen viimeistä mutkaa ja paluuhaaraa. Kaiken kaikkiaan molemmat linjat olisivat suorien osuuksien osalta 18 metrin pituisia. Pyöreän putken linjassa olisi siis 16 metriä 24 millimetrin halkaisijalla olevaa putkea ja loput 2 metriä 32,5 millimetrin putkea. Näin ollen esimerkiksi neliön muotoinen putki tulisi jokseenkin kokonaan hyödynnettyä; sitä oli käytössä Putkivirtauksen virtausvastukset -harjoitustyössä 18,78 metriä. Näin ollen yhteensä lähes puolet pyöreistä putkista jäisi käyttämättä.

## 4.2 Painehäviön laskeminen

Painehäviö lasketaan pyöreissä putkissa siten, että lasketaan osuus kerrallaan; Koska pyöreän putken linjasto käsittää laajennuksia ja supistuksia, kuuluu painehäviön laskentaan kolme osuutta: ensin ensimmäinen kapeamman pyöreän putkiston osuus, tämän jälkeen leveämmän putkiston 2-metrinen osuus, ja lopuksi toinen kapeamman putkiston painehäviön osuus. Kapeamman putkiston osuudet on suunniteltu kumpikin 8 metrin pituisiksi, jolloin saadaan yhteispituudeksi koko putkistolle 18 metriä, kuten neliömuotoisellekin putkistolle. Putkiston osuudet on havainnollistettu kuvaa 6 hyödyntäen kuvaan 8:



KUVA 8. Suunnitelma eri putkistojen käytöstä linjaston suunnittelussa. (Tekijän henkilökohtainen arkisto)

Kuten kuvassa 8 nähdään, putkiston käyttöä haluttiin havainnollistaa eri värejä käyttämällä, eli musta väri koskee neliömuotoista putkea ja muut pyöreän putkiston kumpaakin halkaisijaa siten, että vihreä koskee leveämpää putkea ja punainen kapeampaa. Leveämmän putken kaksimetrisen osuus suunniteltiin

niin, että senkin varrelle osuu kaksi putkiston mutkista. On hyvä huomioida, että putkiston pituus 18 metriä koostuu vain suorista osuuksista. Käyttöön otettavat mutkat voivat olla esimerkiksi moottorilaboratoriossa käytössä olleita mutkia, ja tarpeen vaatiessa putkistoon voidaan liittää erillisiä mutkia, kunhan kaikki ovat keskenään samanlaisia, pyöreitä 90 asteen mutkia. Kuvaan on lisäksi suunniteltu muutamia paikallisia painemittareita, kaksi kummallekin putkilinjastolle ja yksi on suunniteltu jo olemassa olevan säiliön päälle. Tämän lisäksi, ennen kuin putki jakaantuu neliömäisen ja pyöreä putkiston linjastoihin, ollaan suunniteltu virtauksen osoitin ja etäsäätö (lukijalle: poikkiviiva kirjaintunnusten ja numeron välissä tarkoittaa etäohjausta). Kuvaan on lisätty putkiston kunkin suoran osuuden mitat. Kuten kuvasta voidaan havaita, se ei ole aivan mittasuhteissaan, mutta mittatietojen ja putkien värivalintojen avulla kuvalla 8 pyritään kuitenkin lukijalle havainnollistamaan, miten putkisto on suunniteltu prosessilaboratorioon sijoitettavaksi. Tilan puutteen vuoksi kuvasta 8 puuttuu pyöreän putkiston mitta ensimmäisen mutkan jälkeen; se on 2,5 metriä neliömäisen putkiston vastaavan osuuden tavoin.

## 5 LASKUT

Laskuissa ja kaavojen valinnassa on hyödynnetty johdannossa mainitun opintojakson kurssimateriaalia. Kun lähdetään laskemaan eri tekijöitä, kuten virtausnopeutta ja Reynolds-lukua, aloitetaan tilavuusvirran valinnalla pumpun valmistajan verkossa olevalta pumpun käyrältä. Käyrältä on tilavuusvirraksi valittu  $3 \text{ m}^3/\text{h}$ , jolloin laskuissa  $\dot{V} = 3 \text{ m}^3/\text{h}$ , kun pyöreän putkiston venttiili on auki ja neliön muotoisen putkiston venttiili kiinni (tai päinvastoin). Tällöin:

$$w = \frac{3 \text{ m}^3/\text{h}}{\frac{\pi d^2}{4}}$$

### 5.1 Neliönmuotoisen putkiston painehäviö

Neliönmuotoiselle putkistolle Reynolds-lukua laskettaessa on selvittävä niin sanottu hydraulinen halkaisija. Lasketaan neliömäisen putkiston poikkileikkauksen sisäpinta-ala,  $(0,027 \text{ m})^2 = 7,29 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$ , jota käyttämällä hydraulinen halkaisija saadaan kaavalla (17) ja muut tarvittavat tiedot:

$$d_h = \frac{4 \cdot A}{U} = \frac{4 \cdot 7,29 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2}{4 \cdot 0,027 \text{ m}} = 0,027 \text{ m}.$$

$$w = \frac{\dot{V}}{A} = \frac{3 \text{ m}^3/\text{h}}{7,29 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2} = 4115,226 \text{ m/h} = 1,143 \text{ m/s}$$

$$Re = \frac{w \cdot d_h}{\nu} = \frac{1,143 \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot 0,027 \text{ m}}{1,006 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}} = 30676$$

Reynolds-lukua laskettaessa käytetty veden kinemaattinen viskositeetti,  $1,006 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$  on hankittu Flow Dynamics & energy technology -opintojakson luentomateriaaleista löytyvästä taulukosta. Kinemaattisen viskositeetin arvoksi on valittu edellä mainittu arvo olettamuksella, että putkistossa virtaavan veden lämpötila on  $20^\circ\text{C}$ . Termin  $\lambda$  eli vastuskertoimen selvittämiseksi käytetään kaavaa (18) eli niin sanottua Blasiusen yhtälöä:

$$\lambda_{\text{Blasius}} = 0,3164 \cdot Re^{-0,25}$$

$$= 0,0239$$

Blasiuksen yhtälöä voidaan käyttää, kun putki oletetaan sileäksi. Tällöin saadaan yksi vaihtoehto arvioksi painehäviöstä (merk.  $\Delta p_{f1}$ ). Vertailun vuoksi painehäviö arvioidaan myös, kun käytetään valmistajan ilmoittamaa karheutta putkistolle, eli tällöin painehäviö on  $\Delta p_{f2}$ .

Paikallisvastusten kerroin on valittu 90 asteen suuruisen kulman mukaan, joka neliön muotoiselle putkistolle olisi  $\zeta = 1,3$ .

Nyt, soveltamalla kaavoja (18) ja (19)

$$\begin{aligned} \Delta p_{f1} &= \left( \frac{18 \text{ m}}{0,027 \text{ m}} * 0,0239 + 6 * 1,3 \right) * 1000 \text{ kg/m}^3 * \frac{(1,143 \frac{\text{m}}{\text{s}})^2}{2} \\ &= 15503 \text{ Pa} \end{aligned}$$

Kun halutaan ottaa  $\lambda$ :n laskennassa huomioon myös valmistajan ilmoittama putken karheus, voidaan käyttää ns. Swamee-Jainin yhtälöä:

$$\begin{aligned} \lambda_{S-J} &= \frac{0,25}{\left[ \lg \left( \frac{k}{3,7 * d} + \frac{5,74}{Re^{0,9}} \right) \right]^2} \\ &= \frac{0,25}{\left[ \lg \left( \frac{0,05 * 10^{-3} \text{ m}}{3,7 * 0,027 \text{ m}} + \frac{5,74}{30676^{0,9}} \right) \right]^2} \\ &= 0,0280 \end{aligned}$$

Nyt

$$\begin{aligned} \Delta p_{f2} &= \left( \frac{18 \text{ m}}{0,027 \text{ m}} * 0,028 + 6 * 1,3 \right) * 1000 \text{ kg/m}^3 * \frac{(1,143 \frac{\text{m}}{\text{s}})^2}{2} \\ &= 17289 \text{ Pa} \end{aligned}$$

Painehäviöarvioissa voidaan havaita pieni ero; kun laskelmissa huomioidaan valmistaja ilmoittama putken karheus 0,05 mm, on painehäviöarvio hieman suurempi. Kuitenkin vastuskertoimet  $\lambda$  ovat suuruusluokaltaan melko samankaltaiset, kuten kuuluukin olla.

## 5.2 Ympyränmuotoisen putkiston painehäviö

Ympyränmuotoisen putkiston painehäviötä laskettaessa huomioidaan samalla tavoin paikallisvastukset kuin neliönmuotoisellakin putkistolla. Neliönmuotoisesta putkistosta poiketen ympyränmuotoisen putkiston paikallisvastuksissa pitää huomioida myös muut tekijät paikallisvastuksina, kuten putkiston laajennus ja supistus. Putkiston koon muutokset huomioidaan niin sanottuina äkillisinä muutoksina, joita varten löytyy  $\zeta$ :n arvo kirjallisuudesta, samoin kuin putkiston mutkille. Äkillisten muutosten tapauksessa ratkaiseva tekijä on kapeamman putkiston halkaisijan suhde suurempaan ( $d/D$ ), joka tämän tutkimusongelman tapauksessa on  $24 \text{ mm} / 32,5 \text{ mm} = 0,738$ . Tällöin äkillisen laajennuksen tapauksessa  $\zeta = 0,2$  ja äkillisen supistuksen tapauksessa  $\zeta = 0,19$ .

Laskuissa äkillinen laajennus ja supistus huomioidaan, kun lasketaan leveämmän pyöreän putkiston osuus pyöreän putkiston kokonaispainehäviöön. Lisäksi kullekin osuudelle huomioidaan mutkien määrä sikäli, kuin kuvassa 6 on määritelty. Pyöreälle putkistolle on  $R/d$  -arvot, missä  $R$  tarkoittaa käyrityssädettä. Kuitenkin, laskuissa lähdemme olettamuksesta, että  $R/d = 1$ . Koska putken karheus on pieni ja kunkin mutkan kulmaksi on suunniteltu  $90^0$ , tulee pyöreän putkiston mutkien  $\zeta$ -arvoksi 0,21. (Keskinen 2012, 68) Karhealle putkelle vastaava luku olisi 0,51, mutta koska valmistajan ilmoittama putken karheus on vain 0,05 mm eli liki sileä, käytetään paikallisvastusten  $\zeta$ -arvoksi pelkästään lukua 0,21.

Lukijalle haluttiin vertailun vuoksi laskea painehäviöarvot käyttäen kahta vastuskertoimen  $\lambda$  arvoa, sekä yhtälöllä (18) että (21) laskettuna, koska (21):ssä kerroin lasketaan putken karheuden perusteella, eli vastaava mikä tehtiin edellisessä kappaleessa. Koska suuremmassa ympyränmuotoisessa putkessa olosuhteet muuttuvat, on sen virtausnopeus selvitettävä kaavalla (15):

$$\dot{V} = A_1 w_1 = A_2 w_2$$

Tätä kaavaa voidaan käyttää myös pyöreän putkiston sisähalkaisijaltaan 24 mm eli ensimmäisen (ja kolmannen) osuuden virtausnopeuden selvittämiseksi. Seuraavissa laskuissa on muutamia indeksointeja, jotka halutaan selventää lukijalle. Vastuskerrointen  $\lambda$  alaindeksoinnissa  $B_I$  tarkoittaa Blasiuksen yhtälöstä johdettua vastuskerrointa ja S-J Swamee-Jainin yhtälöstä johdettua vastuskerrointa. Numeroindeksointi puolestaan osoittaa suureiden liittyvän keskenään samaan osaan putkistoa.

$$w_1 = \frac{\dot{V}}{A_1}$$

$$= \frac{\frac{3 \text{ m}^3}{3600 \text{ s}}}{\frac{\pi \cdot (0,024 \text{ m})^2}{4}}$$

$$= 1,842 \text{ m/s}$$

$$Re_1 = \frac{1,842 \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot 0,024 \text{ m}}{1,006 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}}$$

$$= 43944$$

Vastuskertoimet sekä Blasiuksen (putkisto sileäksi oletettuna) että Swamee-Jainin (valmistajan ilmoittama karheus huomioituna):

$$\lambda_{\text{Blasius}} = 0,3164 \cdot 43944^{-0,25} = 0,0219$$

$$\lambda_{\text{S-J}} = \frac{0,25}{\left[ \lg \left( \frac{0,05 \cdot 10^{-3} \text{ m}}{3,7 \cdot 0,024 \text{ m}} + \frac{5,74}{43944^{0,9}} \right) \right]^2} = 0,0214$$

24 mm pyöreän putken painehäviön arviot, koko pyöreän putkiston ensimmäinen osuus (sisältäen putken laajennusta koskevan äkillisen laajennuksen paikallisvastuksen):

Painehäviö putkisto sileäksi oletettuna:

$$\Delta p_{1\text{BI}} = \left( \frac{8 \text{ m}}{0,024 \text{ m}} \cdot 0,0219 + 2 \cdot 0,21 + 0,2 \right) \cdot 1000 \text{ kg/m}^3 \cdot \frac{\left( 1,842 \frac{\text{m}}{\text{s}} \right)^2}{2} = 13436 \text{ Pa}$$

Painehäviö putkiston valmistajan ilmoittamalla karheudella:

$$\Delta p_{2\text{S-J}} = \left( \frac{8 \text{ m}}{0,024 \text{ m}} \cdot 0,0214 + 2 \cdot 0,21 + 0,2 \right) \cdot 1000 \text{ kg/m}^3 \cdot \frac{\left( 1,842 \frac{\text{m}}{\text{s}} \right)^2}{2} = 13153 \text{ Pa}$$

Seuraavaksi arvioidaan painehäviö 32,5 mm pyöreässä putkessa eli koko pyöreän putkiston keskimmaisessä osassa, edellisvaiheen tavoin sekä olettaen putki sileäksi että käyttäen valmistajan ilmoittamaa putken karheutta:

Lasketaan nesteen virtausnopeus kaavan (15) avulla:

$$w_2 = \frac{\frac{3 \text{ m}^3}{3600 \text{ s}}}{\frac{\pi \cdot (0,0325 \text{ m})^2}{4}} = 1,0045 \text{ m/s, jossa}$$

$$\dot{V} = 3 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$d = 32,5 \text{ mm} = 0,0325 \text{ m}$$

$$Re_2 = \frac{1,0045 \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot 0,0325 \text{ m}}{1,006 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}} = 32451$$

Vastuskertoimet sekä Blasiuksen että Swamee-Jainin yhtälöillä:

$$\lambda_{BI} = 0,3164 \cdot 32451^{-0,25} = 0,0236$$

$$\lambda_{S-J} = \frac{0,25}{\left[ \lg \left( \frac{0,05 \cdot 10^{-3} \text{ m}}{3,7 \cdot 0,0325 \text{ m}} + \frac{5,74}{32451^{0,9}} \right) \right]^2} = 0,0271$$

Painehäviö putkisto sileäksi oletettuna:

$$\Delta p_{BI} = \left( \frac{2 \text{ m}}{0,0325 \text{ m}} \cdot 0,0236 + 2 \cdot 0,21 \right) \cdot 1000 \text{ kg/m}^3 \cdot \frac{\left( 1,0045 \frac{\text{m}}{\text{s}} \right)^2}{2} = 945 \text{ Pa}$$

Painehäviö putkiston valmistajan ilmoittamalla karheudella:

$$\Delta p_{S-J} = \left( \frac{2 \text{ m}}{0,0325 \text{ m}} \cdot 0,0271 + 2 \cdot 0,21 \right) \cdot 1000 \text{ kg/m}^3 \cdot \frac{\left( 1,0045 \frac{\text{m}}{\text{s}} \right)^2}{2} = 1053 \text{ Pa}$$

Pyöreän putkiston viimeinen osuus, painehäviöt huomioiden osuuden alussa oleva äkillinen supistus:

Painehäviö putkisto sileäksi oletettuna:

$$\Delta p_{BI} = \left( \frac{8 \text{ m}}{0,024 \text{ m}} \cdot 0,0219 + 2 \cdot 0,21 + 0,19 \right) \cdot 1000 \text{ kg/m}^3 \cdot \frac{\left( 1,842 \frac{\text{m}}{\text{s}} \right)^2}{2} = 13419 \text{ Pa}$$

Painehäviö putkiston valmistajan ilmoittamalla karheudella:



$$\Delta p_{S-J} = \left( \frac{8 \text{ m}}{0,024 \text{ m}} * 0,0273 + 2*0,21 + 0,19 \right) * 1000 \text{ kg/m}^3 * \frac{\left(1,842 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2}{2} = 16483 \text{ Pa}$$

### 5.3 Pumpun soveltuvuuden arviointi

Prosessilaboratorion pumpun soveltuvuutta on arvioitava vielä tarkastelemalla painehäviöitä siltä osin, kun pumpu pumpataan alakerrasta ylös. Korkeuseroa on neljä metriä. Arvioinnissa huomioidaan hydrostaattinen paine ja painehäviö 32,5 mm pyöreässä putkistossa, jota otettiin tarkasteluun, koska esimerkiksi 24 mm pyöreästä putkistosta suurin osa on jo käytetty tämän tutkimuksen ehdottamassa järjestelyssä. Koska pumpulle on nimetty nimellinen suurin tilavuusvirta 4,5 m<sup>3</sup>/h, käytetään painehäviöarvioissa tilavuusvirtaa 4 m<sup>3</sup>/h. Tämän perusteella valitaan myös Excel-taulukosta soveltuvat arvot. Pumpun soveltuvuusarviointiin tarvitaan hydrostaattinen paine ja putkiston kokonaispaine, joka koostuu 4 metrin matkasta sisähalkaisijaltaan 32,5 mm pyöreää putkistoa ja itse sijoitellun putkilinjaston paineesta, joksi valittiin neliömäinen putkisto, sillä siinä laskettiin suurimmat yksittäiset painehäviön arvot. Hydrostaattinen paine ja putkistojen kokonaispaine taas muodostavat sen yhteispaineen, mitä käytetään pumpun teoreettisen tehon tarpeen laskentaan ja edelleen akselitehon laskentaan hyötysuhteen avulla.

Hydrostaattinen paine:

$$\begin{aligned} \Delta p_{\text{hyd.}} &= \rho * g * h \\ &= 1000 \text{ kg/m}^3 * 9,81 \text{ m/s}^2 * 4 \text{ m} \\ &= 39\,240 \text{ Pa} \end{aligned}$$

Valittu putkiston yksittäinen paine (4 m<sup>3</sup>/h, neliömäinen putkisto):  $p_1 = 29970 \text{ Pa}$

Soveltaen kappaleen 5.2 laskuja, lasketaan  $p_2$  eli painehäviö sisähalkaisijaltaan 32,5 mm pyöreässä putkessa neljän metrin matkalla lattiatasolta ylös:

$$w = 1,3394 \text{ m/s}$$

$$Re = 43270$$

$$\lambda_{S-J} = 0,026081$$

$$\Delta p_2 = \left( \frac{4 \text{ m}}{0,0325 \text{ m}} * 0,0261 \right) * 1000 \text{ kg/m}^3 * \frac{\left(1,3394 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2}{2}$$

$$= 2881 \text{ Pa}$$

Putkiston yhteispaine  $\Delta p_{\text{kok}} = \Delta p_1 + \Delta p_2$

$$= 29970 \text{ Pa} + 2881 \text{ Pa}$$

$$= 32851 \text{ Pa}$$

Teoreettinen tehontarve, kun tilavuusvirta on  $4 \text{ m}^3/\text{h}$ :

$$P_{\text{teor}} = 32851 \text{ Pa} * 0,0011 \text{ m}^3/\text{s} = 36 \text{ W}$$

Koska hyötysuhde  $\eta = \frac{560 \text{ W}}{800 \text{ W}} = 0,7$ , on akseliteho:

$$P_{\text{aks}} = \frac{36 \text{ W}}{0,7} = 51 \text{ W}$$

Painehäviöiden arviot on koostettu taulukkoihin 1 ja 2. Taulukossa 2 sovelletaan samaa indeksointitapaa kuin sivulla 23 on kuvailtu. Lisäksi numeroindeksointi viittaa putkiston sisähalkaisijaan.

TAULUKKO 1. Painehäviöiden arviot neliömäisessä putkistossa, karhea putkisto

	$\Delta p_{\text{Bl}} , \text{ Pa}$	$\Delta p_{\text{S-J}} , \text{ Pa}$
$\lambda_{\text{Blasius}} = 0,0239$	15503	
$\lambda_{\text{Swamee-Jain}} = 0,0280$		17289

TAULUKKO 2. Painehäviöiden arviot pyöreässä putkistossa osuuksittain

	$\Delta p$ 24 mm osa 1 [Pa]	$\Delta p$ 32,5 mm [Pa]	$\Delta p$ 24 mm osa 2 [Pa]
$\lambda_{\text{Blasius}24}$ 0,0219	13436		13419
$\lambda_{\text{S-J}24}$ 0,0273	13153		16483
$\lambda_{\text{Blasius}32,5}$ 0,0236		945	
$\lambda_{\text{S-J}32,5}$ 0,0271		1053	

Taulukoista 1 ja 2 nähdään, että painehäviöt ovat melko samaa suuruusluokkaa riippumatta siitä, huomioidaanko näin vähäistä karheutta vai ei. Kapeamman pyöreän putkiston tapauksessa karheuden huomiointi laskee painehäviötä, kun taas leveämmän pyöreän putkiston ja neliömäisen putkiston tapauksessa painehäviö nousi.

Taulukkoja laadittiin Excelissä lisää, ja niissä selvitettiin kunkin putkiston osuuden osalta kokeellisesti karheutta siten, että laskettiin  $\lambda$ -arvot putkistolle sekä sileäksi oletettuna että valmistajan ilmoittamalla karheudella. Tämän jälkeen piirrettiin sileäksi oletettujen putkistojen kuvaajat sekä Exceliä käyttäen (liite 1) että Moodyn käyrästöön (liite 2). Liitteestä on nähtävissä, että teoreettisen tarkastelun perusteella putkistot ovat jokseenkin sileitä. Hetkellisesti hydraulisesti sileä käyrä kulkee ylempänä kuin putkistojen käyrät, mutta tämä johtuu siitä, että Flow Dynamics & Energy Technology -opintojakson luentomateriaalista saadusta Moodyn käyrästöstä ei onnistuttu poimimaan jokaisesta kohdasta pisteparia ilman tulkinnanvaraa. Käsien Moodyn käyrästöön piirretyistä kuvaajista (liite 2) voidaan huomata, että kuvaajat kulkevat varsin lähellä hydraulisesti sileää käyrää, hieman sen yläpuolella. Käyrästöstä poimitut  $d/k$ -arvot ovat taulukossa 3:

TAULUKKO 3. Arviot putkistojen d/k-arvoista

Putkisto	d/k	Laskettu k [mm]
24 mm pyöreä	100 000	0,00024
Neliömäinen	150 000	0,00018
32,5 mm pyöreä	175 000	0,00019

Taulukon 3 d/k –arvot saatiin, kun Moodyn käyrästä (liite 2) arvioitiin ne jokaiselle putkistolle ja edelleen laskettiin arvot k:lle. Luvut ovat arvioita silmämääräiseen tarkasteluun perustuen, mutta kuitenkin suuntaa antavia. Taulukoissa 4-6 puolestaan on esitetty eri putkilinjastojen laskelmat, kuten Reynolds-luvut ja painehäviöt. Kunkin suureen arvot perustuvat Excelillä tehtyihin laskelmiin.

TAULUKKO 4. Neliömäisen putkiston laskelmat

V (m <sup>3</sup> /h)	w (m/s)	Re-luku	$\lambda$ (Blasius)	$\Delta p$ (Pa)
1	0,38	10227	0,031463	2089
2	0,76	20453	0,026457	7387
3	1,14	30680	0,023907	15509
4	1,52	40907	0,022248	26288
5	1,91	51134	0,021041	39614
6	2,29	61360	0,020103	55410
7	2,67	71587	0,019343	73618

TAULUKKO 5. Pyöreän (halk. 24 mm) putkiston laskelmat

V (m <sup>3</sup> /h)	w (m/s)	Re-luku	$\lambda$ (Blasius)	$\Delta p$ (Pa) 1. osuus	$\Delta p$ (Pa) 2. osuus	$\Delta p$ (Pa) Yhteensä
1	0,614	14649	0,028760	1924	1922	3846
2	1,228	29297	0,024184	6546	6539	13085
3	1,842	43946	0,021853	13410	13394	26804
4	2,456	58595	0,020336	22316	22286	44602
5	3,070	73243	0,019233	33136	33088	66224
6	3,684	87892	0,018376	45777	45709	91486
7	4,298	102541	0,017681	60168	60076	120244

TAULUKKO 6. Pyöreän (halk. 32,5 mm) putkiston laskelmat

V (m <sup>3</sup> /h)	w (m/s)	Re-luku	$\lambda$ (Blasius)	$\Delta p$ (Pa)
1	0,335	10817	0,031025	131
2	0,670	21635	0,026088	454
3	1,005	32452	0,023574	944
4	1,339	43270	0,021938	1588
5	1,674	54087	0,020747	2378
6	2,009	64905	0,019823	3310
7	2,344	75722	0,019074	4378

Lasketut painehäviöt koostettiin vielä kunkin putkiston osalta yhteenvedona Taulukkoon 7:

TAULUKKO 7. Painehäviöiden yhteenvedo

V (m <sup>3</sup> /h)	$\Delta p$ (Pa), pyöreä putkisto	$\Delta p$ (Pa), neliömäinen putkisto
1	3977	2089
2	13539	7387
3	27748	15509

4	46190	26288
5	68602	39614
6	94796	55410
7	124622	73618

## 6 TULOSTEN ARVIOINTI JA POHDINTA

Tutkimuksen tulokset esitetään taulukoissa 1–7. Vertailun vuoksi vastuskerroin  $\lambda$  laskettiin sekä yhtälöillä 18 että 21, lähinnä jotta nähtäisiin termin  $k$  eli karheuden merkitys painehäviöitä arvioidessa. Painehäviöt ovat eriteltyinä taulukoissa 1 ja 2, kun ne laskettiin ensin tilavuusvirralla  $3 \text{ m}^3/\text{h}$ . Kattavammat tilastot löytyvät taulukoista 4–6, ja taulukossa 7 on yhteenveto, jossa on kerrattu neliömäisen putkiston painehäviö ja lisäksi kaikkien pyöreän putkiston osien kokonaispainehäviö. Taulukosta 3 on hyvä huomioda, että Moodyn käyrästä (liite 2) poimitut  $d/k$ -arvot ovat silmämääräisiä arvioita. Kunkin putkiston käyrät on piirretty Moody-käyrästä käsin, jolloin kuvaajia on pisteiden (Reynolds-luku ja vastuskerroin) jälkeen jatkettu  $d/k$ -arvojen määrittämiseksi.  $d/k$ -arvoissa voi siis esiintyä epätarkkuutta, mutta ne ovat silti suuntaa antavia ja teoreettinen tarkastelu osoittaa joka tapauksessa, että putkistot ovat lähes sileitä.

Taulukkoja ja liitteen 2 Moody-käyrästä tarkastellessa voidaan havaita, että kunkin putkiston tulokset noudattavat varsin hyvin hydraulisesti sileän käyrän linjaa. Taulukossa 5 sisähalkaisijaltaan  $24 \text{ mm}$  pyöreän putkiston painehäviöt eivät osuuksien välillä juuri muutu. Vähäinenkin ero selittyy sillä, että ensimmäisen osuuden painehäviölaskelmissa otettiin huomioon putkiston äkillinen laajennus, ja toisessa osassa sen äkillinen supistus, kun  $2 \text{ metrin}$  matkalla käytössä on osuuksien välissä leveämpi pyöreä putkisto. Äkillisen laajennuksen ja supistuksen vastuskertoimet ovat erisuuruiset. Laajennukseen on useita mahdollisuuksia olemassa, mutta suunnittelussa päätettiin tehdä laskelmat äkillisen laajennuksen ja supistuksen mukaan. Painehäviöitä ei laskettu suuremmalle tilavuusvirralle kuin  $7 \text{ m}^3/\text{h}$ , koska tämä oli pumpun valmistajan käyrästä (liite 3) viimeinen kokonaislukuarvo tilavuusvirralle. Kullekin pyöreän putkiston osalle laskettiin painehäviöt erikseen, mutta niiden kokonaispainehäviöt eritellään taulukossa 7. Liitteessä 3 on korostettu käyrältä valinnat tilavuusvirraksi (kokonaislukuina kuutiometriä tunnissa).

Mikäli putkisto päätetään sijoittaa prosessilaboratorioon tämän opinnäytetyön ehdotuksen mukaisesti, uskon tulosten toistettavuuden olevan hyvällä tasolla. Käytännössä eroa voi syntyä inhimillisistä virheistä. Jos putkisto taas halutaan sijoittaa eri tavalla kuin tässä opinnäytetyössä on suunniteltu, tulosten validiteetti ja reliabiliteetti on varmistettava samankaltaisilla uusilla laskelmilla kuin tässä on

tehty. Kun puhutaan teoreettisesta tarkastelusta, on vaikea arvioida esimerkiksi tulosten toistettavuutta, josta saadaan parempi varmuus vasta, kun jonkinlainen uusi järjestely putkistolle on prosessilaboratoriossa olemassa. Tällöin toistettavuuden arviointia helpottaa, kun tilastollisen ja laskennallisen menetelmän rinnalle voidaan ottaa myös kokeellinen menetelmä. Kaiken kaikkiaan tulosten luotettavuuden suhteen pienen epäilyksen voi heittää korkeintaan niille lasketuille tuloksille, jotka koskevat tilavuusvirraltaan suurempaa kuin  $4 \text{ m}^3/\text{h}$  virtausta, koska pumpun valmistajan ilmoittama nimellinen maksimi esimerkiksi pumpussa sijaitsevassa laatassa ja verkossa on  $4,5 \text{ m}^3/\text{h}$ , mutta datakäyrät kuitenkin antoivat tietoa  $7 \text{ m}^3/\text{h}$  asti.

Yleisellä tasolla tulosten luotettavuuteen kavitaatio voi aiheuttaa ongelmia. Siinä imupaineen lasku veden höyrystymispaineeseen aikaansaa virtaavaan veteen höyrymuodostelmien syntymistä. Se puolestaan johtaa siihen, että keskipakovoiman synnyttämän paineen kohdatessaan nämä höyrymuodostelmat tiivistyvät nopeasti ja aiheuttavat iskuja metallipintoihin ja siten riskin pintojen vaurioitumisesta. Kavitaatiota voi hillitä niin sanotulla painepuolen kuristuksella. Kuristussäädössä putkivastus kasvaa, jolloin nostokorkeus lisääntyy ja tilavuusvirta pienenee. (Huhtinen ym. 2018, 147.) Tässä tapauksessa kuitenkin kavitaatio tuskin koituu ongelmaksi, sillä nostokorkeus jää selvästi valmistajan pumpulle ilmoittaman nimellisenostokorkeuden taakse. (Grundfos 2020) Lisäksi koska luvussa 5.3 lasketut tehot eivät ylitä valmistajan tehokäyrän arvoa valitussa tilavuusvirrassa, tarkasteltavana olleen pumpun voi todeta soveltuvan tutkimuksessa ehdotettuun järjestelyyn (LIITE 3).

Kun pumpun akselitehoa selvitettiin, on syytä mainita, että hyötysuhteen laskemiseen käytetyt tehon lukemat saatiin valmistajan ilmoittamista tiedoista. Koska ehdotetun kaltaisessa järjestelyssä ei kavitaatiota synny, sen havainnollistamiseksi voisi jatkokehittää seuraavan järjestelyn: Pumpun imupuolelle voi lisätä kuristusventtiilin, jolloin saadaan pumpun imupuolen paine laskemaan nesteiden höyrynpaineen alapuolelle virtauksen pienentyessä. Koska tällöinkin kavitaatioilmiön syntyessä siitä saataisiin pelkkiä kuulohavaintoja, voisi kavitaation havainnollistamista täydentää asentamalla linjaan pumpun painepuolelle näkölasin, jonka avulla kavitaatio on helpompi todeta.



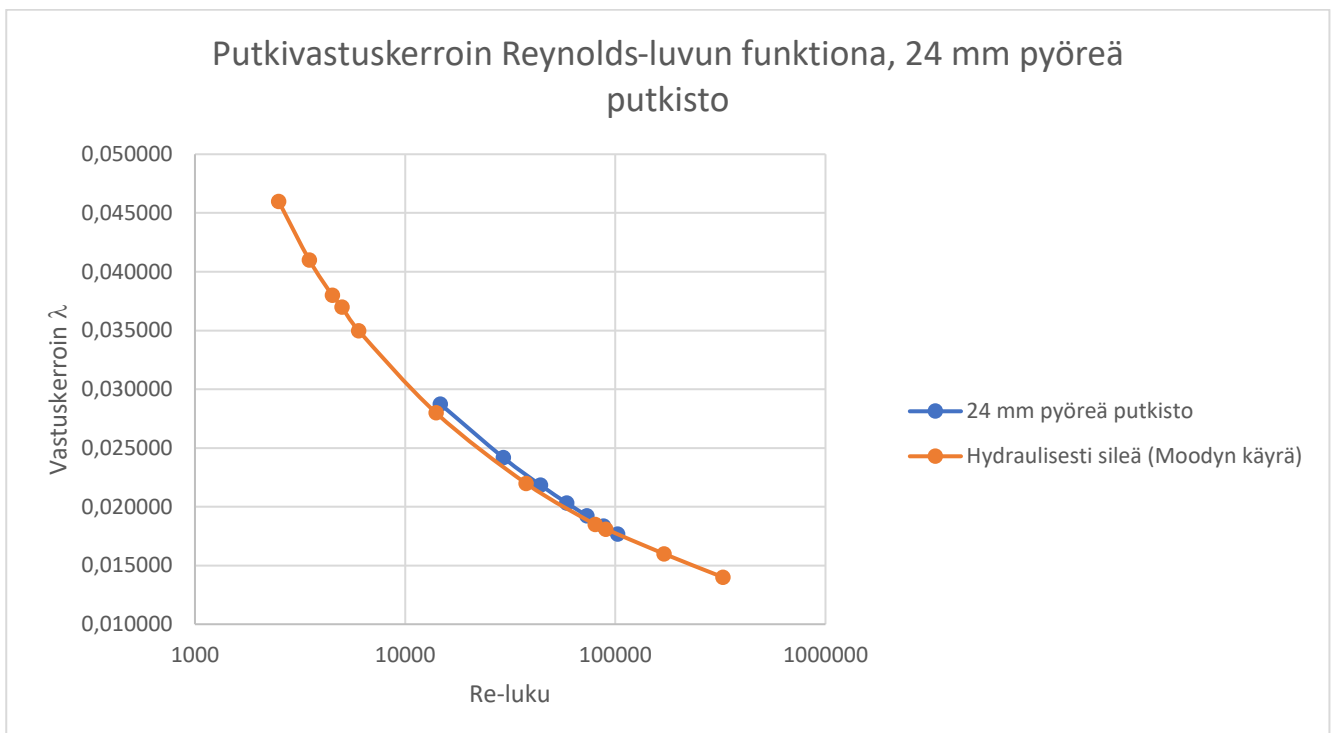
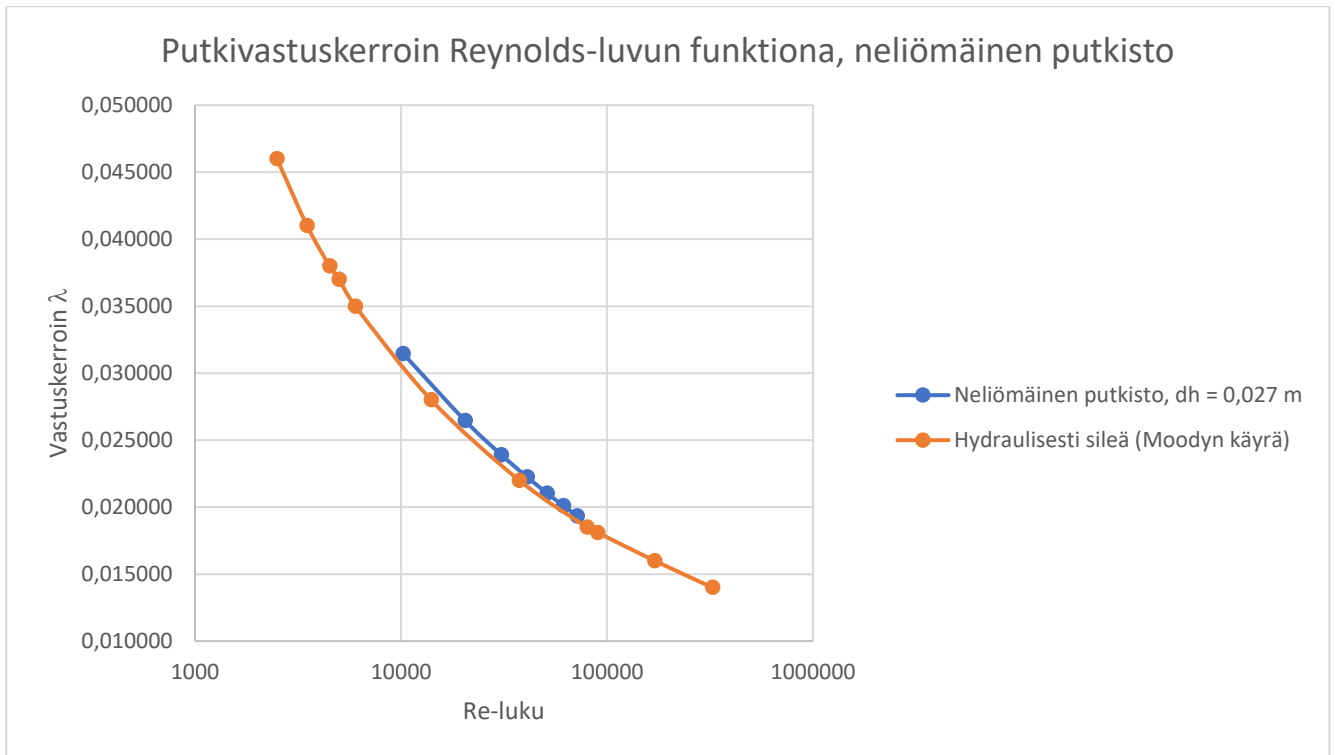
## LÄHTEET

- Aalto-yliopisto 2020. *Tutkimusmenetelmän valinta*. Helsinki: Aalto-yliopisto. Saatavissa: [https://foto.aalto.fi/opetus/tiede\\_ja\\_tutkimus/tutkimusmenetelmat/tutkimusmenetelman\\_valinta.htm](https://foto.aalto.fi/opetus/tiede_ja_tutkimus/tutkimusmenetelmat/tutkimusmenetelman_valinta.htm). Viitattu 16.12.2020
- Bohl, W. 1984. *Teknillinen virtausoppi*. Alkuperäisteos: Strömungslehre, 5. painos, 1982. Suom. Matti Krannila. Jyväskylä: Gummerus Oy.
- Caverion 2020. *Teollisuuden suunnittelu ja projektin johto*. Saatavissa: <https://www.caverion.fi/katalogi/palvelut/laitos-kone-sahko-automaatiosuunnittelu/>. Viitattu 25.3.2021
- Grundfos 2020. *Pumpun tuottokäyrät*. Saatavissa: <https://product-selection.grundfos.com/products/chi/chi-4/chi-4-30-4J518003?productnumber=4J518003&custid=GMA&lang=FIN&tab=variant-curves&pumpsystemid=1167494688>. Viitattu 16.12.2020
- Huhtinen, M., Korhonen, R., Pimiä, T., Urpalainen, S. 2018. *Voimalaitostekniikka*. 4. painos. Tampere: Juvenes Print – Suomen Yliopistopaino Oy.
- Kajaanin ammattikorkeakoulu 2020. *Luotettavuus: Validiteetti & reliabiliteetti*. Kajaani: Kajaanin ammattikorkeakoulu. Saatavissa: <https://www.kamk.fi/fi/opari/Opinnaytetyopakki/Teoreettinen-materiaali/Tukimateriaali/Luotettavuus>. Viitattu 16.12.2020
- Keskinen, K. I. 2012. *Kemian laitetekniikan taulukoita ja piirroksia*. 13. painos. Helsinki: Hakapaino Oy.
- Kääriäinen, K. 2017. *Sellutehtaiden käyttövarmuuden kehittäminen – Putkistojen linkaaren hallinta*. Diplomityö. Oulu: Oulun yliopisto. Saatavissa: <http://jultika.oulu.fi/files/nbnfioulu-201711303213.pdf>. Viitattu 16.12.2020
- Merius 2020. *3D-tehdassuunnittelu: Putkistosuunnittelu*. Saatavissa <https://www.merius.fi/tekninensuunnittelu/>. Viitattu 16.12.2020
- Oukotek 2020. *Suunnittelupalvelut & Putkistosuunnittelu*. Saatavissa <https://oukotek.fi>. Viitattu 16.12.2020
- Puskala, R. 2016. *Flow Dynamics & Energy Technology*. Opettajan kurssimateriaali opiskelijoille.

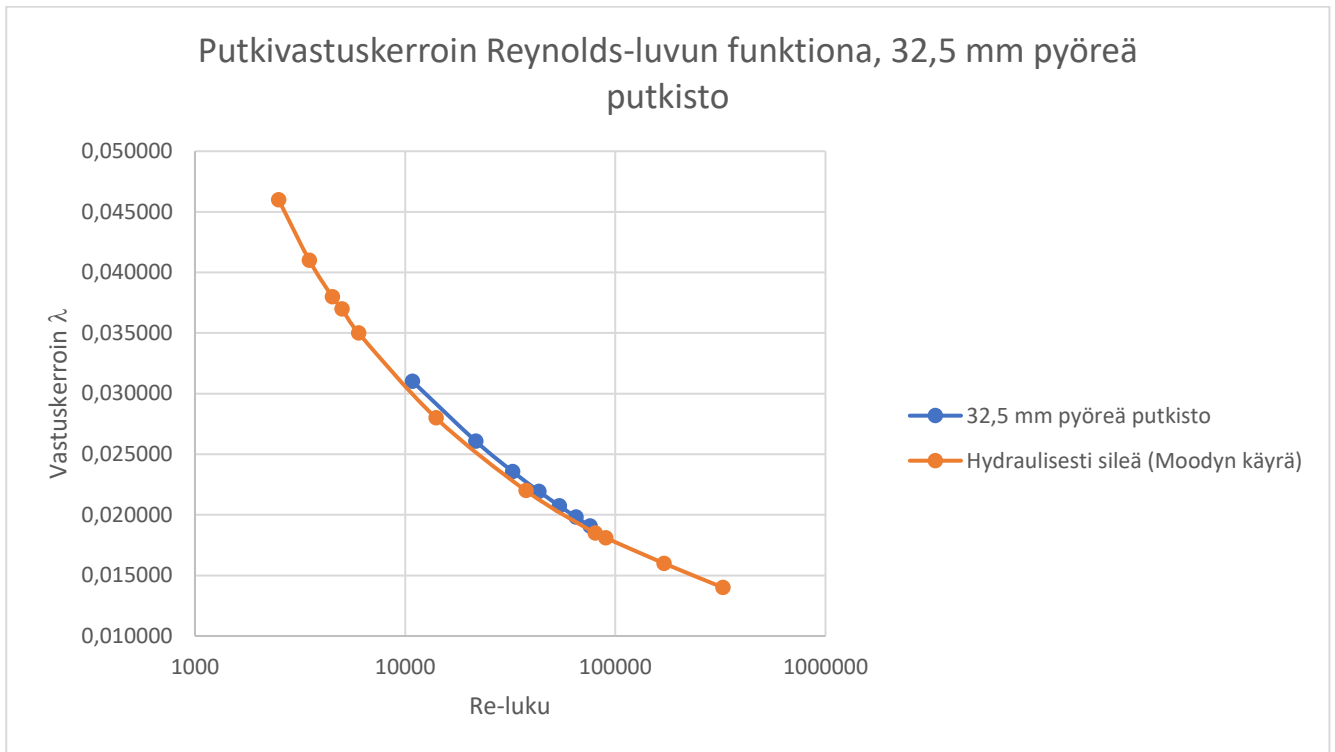
Vehkalahti, K. 2019. *Kyselytutkimuksen mittarit ja menetelmät*. Helsingin yliopisto. Saatavissa: <https://helda.helsinki.fi/bitstream/handle/10138/305021/Kyselytutkimuksen-mittarit-ja-menetelmat-2019-Vehkalahti.pdf>. Viitattu 16.12.2020

## LIITTEET

## LIITE 1/1

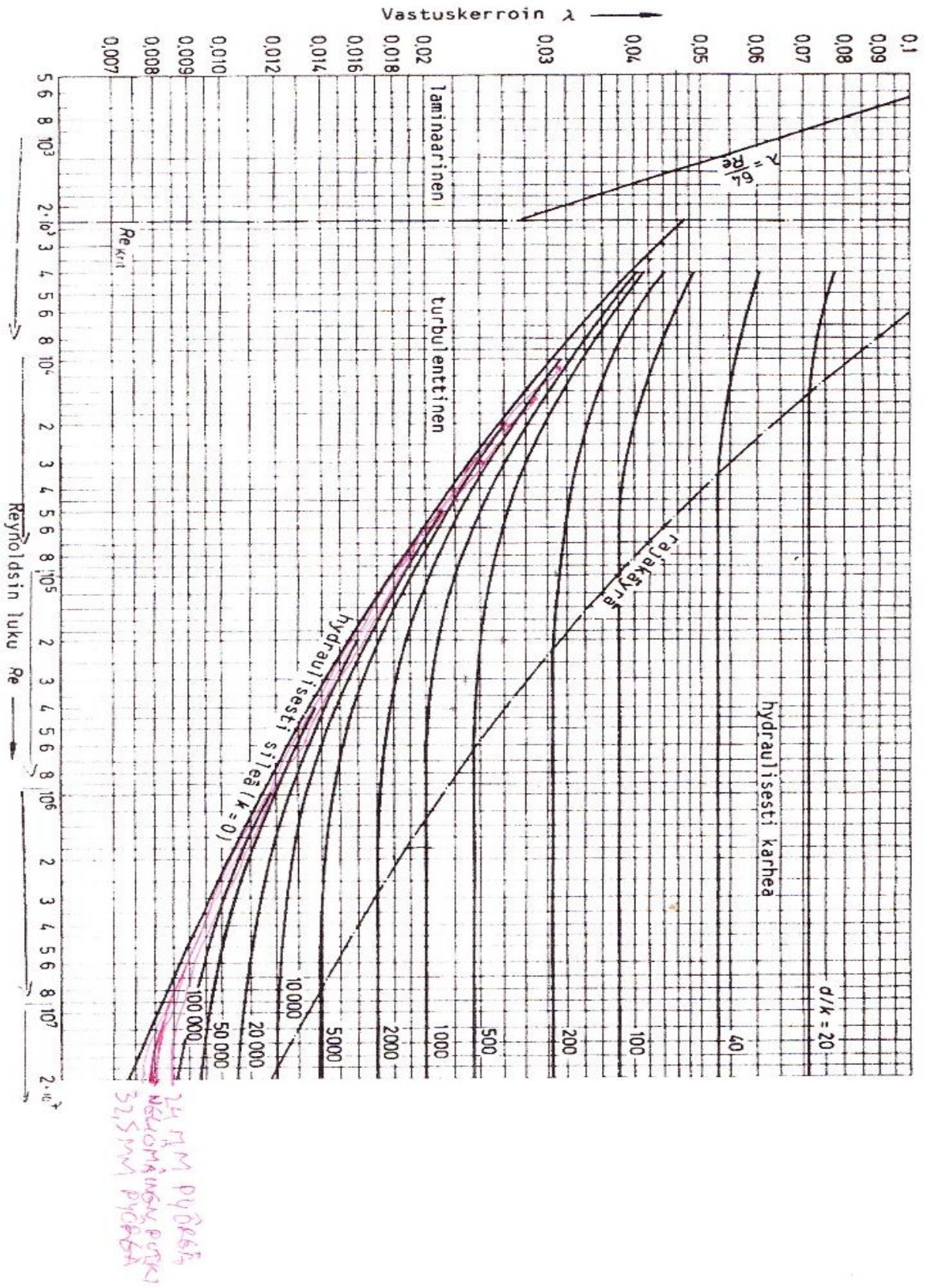


## LIITE 1/2



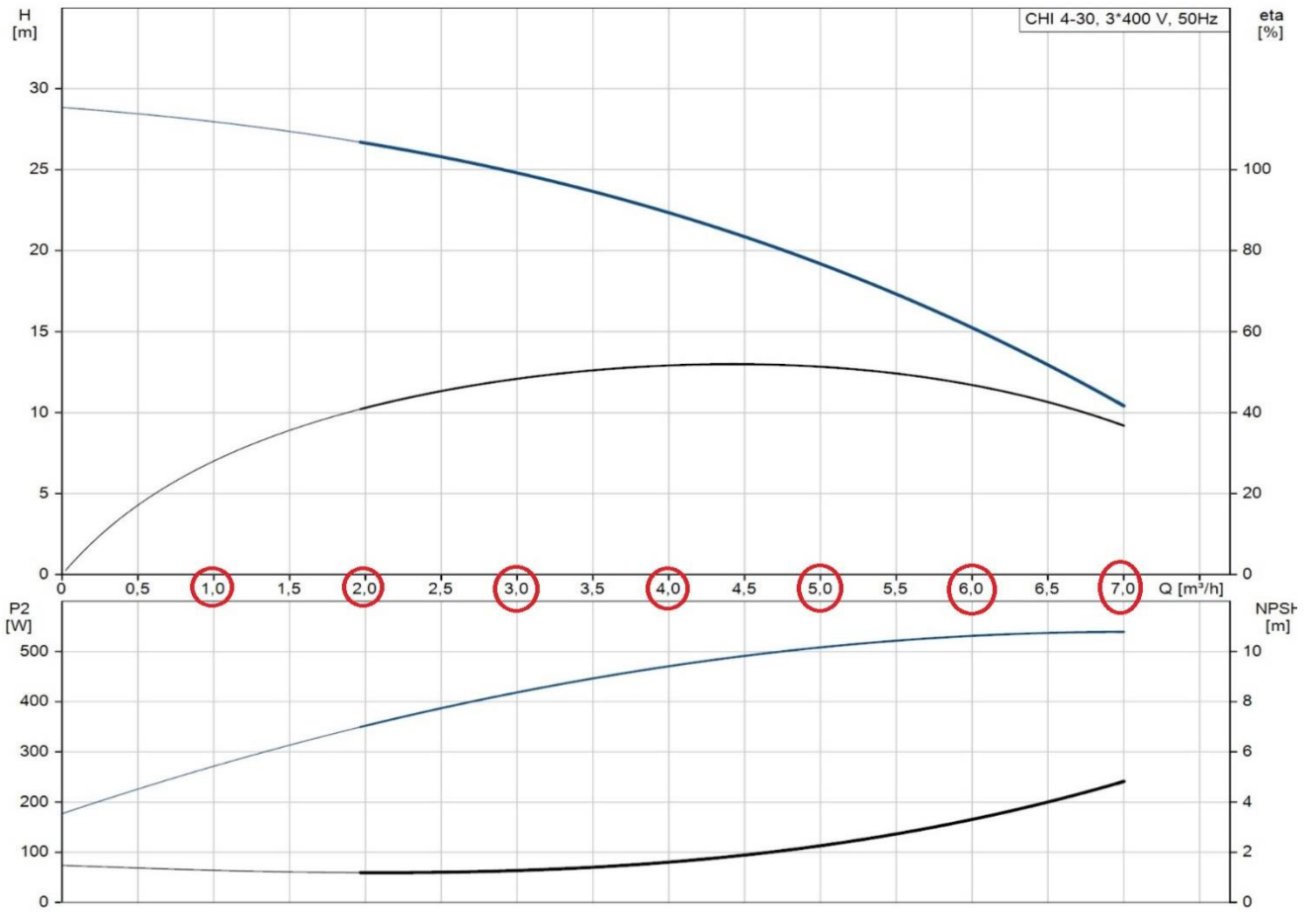
LIITE 2

MOODY-diagrammi



LIITE 2: Moodyn käyrästä (Keskinen 2012, 66)

**LIITE 3**



LIITE 3: Pumpun tuottokäyrät (Grundfos 2020)