

Julius Pigg

# MAALÄMPÖKAIVON KERUUPUTKEN PAINEHÄVIÖN MITTAUS JA MALLIN- NUS

Tekniikan ja luonnontieteiden tiedekunta  
Diplomityö  
Huhtikuu 2020

# TIIVISTELMÄ

Julius Pigg: Maalämpökaivon keruuputken painehäviön mittaus ja mallinnus  
Diplomityö  
Tampereen yliopisto  
Konetekniikan tutkinto-ohjelma  
Huhtikuu 2020

---

Tässä diplomityössä tutkittiin maalämpökaivon keruuputken painehäviötä mittaamalla sekä mallintamalla laskennallista painehäviötä olemassa olevilla korrelaatioilla. Työssä tutkittiin myös painehäviön aiheuttamaa kustannusvaikutusta, jonka tutkimista varten tehtiin Excel-laskentatyökalu kohdeyritykselle. Työ suoritettiin Rototec Oy:lle, joka toimii Euroopan suurimpana geoenergiaratkaisujen toimittajana. Työn tavoitteena oli tutkia laskennallisen painehäviön ja mitatun painehäviön mahdollisia eroavaisuuksia sekä tehdä laskentatyökalu keruuputkien kokonaiskustannusten eli investointi- ja käyttökustannusten vaikutuksista eri kokoisten keruuputkien kesken.

Painehäviö on yksi maalämpökaivokentän suunnittelussa huomioitava asia. Painehäviö vaikuttaa maalämpökaivokentän suunnitteluun, minkä huomiointi on oleellista, kun suunnitellaan toimivaa maalämpökaivokenttää. Maalämpökaivokenttään tulee saada riittävä virtaama, jotta suunniteltu energia- ja tehomäärä saadaan käyttöön. Tästä syystä painehäviön suuruus tulisi olla huomioituna jo suunnitteluvaiheessa, jotta putkikoot ja kiertovesipumppu osataan mitoittaa oikein, jolloin maalämpökaivokentän mahdollisimman energiatehokas toiminta on mahdollista. Painehäviön suuruuteen putkessa vaikuttaa virtaavan nesteen viskositeetti, tiheys, putken pinnankarheus, putken pituus, nesteen virtausnopeus sekä putken halkaisija.

Painehäviö aiheuttaa kustannuksia, kun nestettä pumpataan maalämpökaivokentässä. Painehäviöön ja sitä kautta pumppauskustannukseen voidaan vaikuttaa maalämpökaivon keruuputken halkaisijaa kasvattamalla. Keruuputken halkaisijan kasvattaminen pienentää pumppauskustannusta, mutta samalla investointikustannus kasvaa keruuputken halkaisijan kasvaessa. Keruuputken investointikustannukseen vaikuttaa lisäksi se, jos porattavan maalämpökaivon kokoa joudutaan kasvattamaan isomman keruuputken vuoksi.

Tässä työssä tehdyissä mittauksissa tutkittiin sileän 40 mm:n keruuputken, rihlatun 40 mm:n keruuputken sekä 45 mm:n rihlatun keruuputken painehäviötä. Mittaukset suoritettiin samassa maalämpökaivossa siten, että kukin keruuputki laskettiin vuorollaan maalämpökaivoon, jonka jälkeen mittaukset tehtiin. Mittausten jälkeen tuloksia verrattiin laskennallisen painehäviön arvoon. Laskennallinen ja mitattu painehäviö vastasivat toisiaan yllättävän hyvin, eikä suuria eroavaisuuksia havaittu. Mittausten tärkein tulos olikin se, että laskennallinen painehäviö sekä mitattu painehäviö vastasivat hyvin toisiaan. Rihlatun 40 mm:n ja sileän 40 mm:n halkaisijaisen keruuputken välistä eroa oli kiinnostavaa tutkia, mutta merkittävä ero ei niiden välille kuitenkaan tullut. Rihlatun ja sileän keruuputken mitatun painehäviön pientä eroavaisuutta voi selittää osin se, että rihlatussa keruuputkessa rihla on niin loiva ja pieni, ettei sen vaikutus painehäviöön mittauksissa käytetyillä virtaaman arvoilla ole merkittävä.

Painehäviön kustannusvaikutuksen arviointia varten tehtiin neljä eri CASE:a, joissa verrattiin 40 mm:n ja 45 mm:n keruuputken investointi- ja käyttökustannuksia. Kustannuslaskelman eri CASE:t erosivat toisistaan virtaaman, hyötysuhteen sekä nk. piiskapumpun investoinnin osalta. Painehäviön kustannusvaikutus oli sitä suurempi, mitä isompi painehäviön arvo oli. Huolimatta pienemmästä painehäviöstä ei isompaa keruuputkea kannata aina hankkia sen korkeampien investointikustannusten vuoksi. Keruuputkien takaisinmaksuaikaa toisiinsa nähden voi verrata tässä työssä esitetyllä laskennalla, jolloin saa viitteitä erikokoisten keruuputkien kokonaiskustannusten jakautumisesta. Kokonaiskustannusten vertailu voi auttaa keruuputki-investointia tehtäessä, jolloin elinkaaren aikana voidaan säästää tuhansia euroja ja saada paremmin toimiva maalämpöjärjestelmä.

Avainsanat: Painehäviö, keruuputki, rihla, maalämpökaivo

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

# ABSTRACT

Julius Pigg: The measurement and modeling of pressure drop in borehole heat exchanger  
Master's thesis  
Tampere University  
Mechanical Engineering  
April 2020

---

In this thesis the pressure drop of the borehole heat exchanger was investigated by measuring and modeling the calculated pressure drop with existing correlations. The study also investigated the cost impact of pressure drop for which an Excel calculation tool was developed for the target company. The work was done for Rototec Oy, which is Europe's largest supplier of geenergy solutions. The aim of this study was to investigate the possible differences between the calculated pressure drop and the measured pressure drop and make a calculation tool on the impact of the total cost of the collector pipes, i.e. investment and operating costs, on the different sizes of borehole heat exchangers.

Pressure loss is one of the things to consider when designing a borehole field. The pressure drop affects the design of a borehole field, which is essential when designing a functional borehole field. The borehole field must have enough flow rate to provide the planned amount of energy and power. For this reason, the magnitude of the pressure drop should be taken into account already at the design stage in order to be able to properly dimension the pipe sizes and the circulation pump, thus enabling the borehole field to be as energy efficient as possible. The magnitude of the pressure drop in the pipe is affected by the viscosity, density, roughness of the pipe, length of the pipe, fluid flow rate and pipe diameter.

Pressure drop causes costs when pumping liquid in a borehole field. The pressure drop and hence the pumping cost can be influenced by increasing the diameter of the collector pipe. Increasing the diameter of the collector pipe reduces the cost of pumping, but at the same time the investment cost increases as the diameter of the collector pipe increases. In addition the investment cost of the collector pipe will be affected if the size of the borehole must be increased due to the larger collector pipe.

The measurements made in this work studied the pressure drop from a smooth 40 mm collector pipe, 40 mm collector pipe with micro fins and 45 mm collector pipe. The measurements were carried out in the same borehole, with each collector pipe being dropped into the borehole in turn, after which the measurements were made. After the measurements, the results were compared with the computed pressure drop value. The computed and measured pressure drop corresponded surprisingly well with no major differences. The main result of the measurements was that the computed pressure drop and the measured pressure drop were quite similar. It was interesting to study the difference between the finned 40 mm collector and the smooth 40 mm collector pipe, but there was no significant difference between them. The slight difference between the measured pressure drop of the finned and the smooth collector pipes can be partly explained by the fact that in the finned collector pipe the flange is so gentle and small that its effect on the pressure drop at the flow values used in the measurements is not significant.

To evaluate the cost impact of the pressure drop, four different CASEs were made comparing the investment and operating costs of the 40 mm and 45 mm collector pipes. The different CASEs in the cost calculation differed in terms of flow, efficiency and investment in the so called booster pump. The greater the value of the pressure drop, the greater is the cost impact of the pressure drop. Despite a smaller pressure drop, a larger collector pipe should not always be purchased because of the higher investment costs. The payback time of the collector pipes relative to one another can be compared with the calculation presented in this work, which gives an indication of the distribution of the total cost of the collector pipes at different sizes. Comparing total costs can help you make a collector pipe investment, saving you thousands of euros and getting a better working geenergy system.

Keywords: Pressure drop, collector pipe, fin, borehole

The originality of this thesis has been checked using the Turnitin OriginalityCheck service.

# ALKUSANAT

Tämä diplomityö on tehty Rototec Oy:lle ja työn aihe valikoitui yrityksen tarpeen ja oman kiinnostuksen pohjalta. Rototec Oy:n puolelta työn ohjaajana on toiminut tietohallintojohtaja Tomi Mäkiahho. Työn ohjaajana on toiminut yliopiston lehtori Henrik Tolvanen ja toisena tarkastajana yliopiston lehtori Seppo Syrjälä.

Haluan kiittää Rototec Oy:tä mahdollisuudesta tehdä diplomityötä yritykseen sekä työssä tarvituista taloudellisista resursseista. Kiitokset työn ohjaajalle Tomi Mäkiaholle sekä muille työkavereille neuvoista ja kannustamisesta työn loppuun saattamiseksi. Iso kiitos myös vaimolle tuesta ja tsemppaamisesta vaikeina hetkinä. Haluan myös kiittää Henrik Tolvasta selkeästä ja pätevästä ohjauksesta työn aikana sekä Seppo Syrjälää toisena tarkastajana toimimisesta.

Pirkkalassa, 17.4.2020

Julius Pigg

# SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO .....	1
2. MAALÄMPÖJÄRJESTELMÄ.....	4
2.1 Maalämmön merkitys .....	4
2.2 Maalämpöjärjestelmän toiminta.....	5
2.3 Keruuputket ja niiden toiminta .....	8
2.4 Maalämpöjärjestelmän suunnittelu .....	11
2.5 Kiertovesipumput .....	14
3. PAINEHÄVIÖ PUTKESSA.....	18
3.1 Putkivirtaus .....	18
3.2 Painehäviö ilmiönä .....	20
3.3 Kertavastushäviöt .....	25
3.4 Paineen mittaustekniikka .....	26
3.5 Painehäviön kustannusvaikutukset .....	29
4. AINEISTO JA MENETELMÄT .....	31
4.1 Tutkimuksen tavoite ja rakenne.....	31
4.2 Kuvaus kohteesta .....	32
4.3 Mittausjärjestely .....	34
4.4 Mittausten suorittaminen .....	36
4.5 Teoreettinen mallinnus.....	38
4.6 Herkkyystarkastelut.....	38
4.7 Painehäviön kustannuslaskenta.....	41
5. TULOKSET JA NIIDEN ANALYSOINTI.....	44
5.1 Mittaustulokset .....	44
5.2 Mallinnustulokset .....	47
5.3 Pohdinta mittaus- ja mallinnustulosten pohjalta.....	53
5.4 Tulevaisuuden parannusehdotukset ja tutkimuskohteet .....	54
6. YHTEENVETO.....	55
LÄHTEET .....	57

## LYHENTEET JA MERKINNÄT

IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change (Kansainvälinen ilmastopaneeli)	
EED	Earth Energy Designer	
TWh	Terawattitunti	
COP	Coefficient of performance (Hyötysuhde)	
PE	Polyeteeni	
GTK	Geologian tutkimuskeskus	
TRT	Thermal Response Test (Terminen vastetestti)	
SI-järjestelmä	kansainvälinen yksikköjärjestelmä	
$\Delta T$	lämpötilaero	[°C]
$NPSH_p$	positiivinen imukorkeus	[m]
$Q_{out}$	lämpömäärä lauhduttimelta	[J]
$Q_{in}$	lämpömäärä höyrystimelle	[J]
$W$	sähkötyö	[J]
$ATM$	ympäristön paine	[m]
$P_{gs}$	imupaine	[m]
$H_v$	imukorkeus metreinä	[m]
$g$	putoamiskiihtyvyyys	[m/s <sup>2</sup> ]
$H_{vp}$	nesteen höyrystymispaine	[m]
$P_t$	pumpun teho	[W]
$\rho$	tiheys	[kg/m <sup>3</sup> ]
$Q$	tilavuusvirta	[m <sup>3</sup> /s]
$H$	nostokorkeus	[m]
$\eta_t$	kokonaishyötysuhde	[-]
$\Delta P$	paine-ero	[Pa]
$p$	paine	[Pa]
$U$	virtausnopeus	[m/s]
$z$	korkeus referenssipisteestä	[m]
$A$	pinta-ala	[m <sup>2</sup> ]
$Re$	Reynoldsin luku	[-]
$d$	putken halkaisija	[m]
$\mu$	dynaaminen viskositeetti	[Pa*s]
$\tau$	leikkausjännitys	[Pa]

$\frac{du}{dy}$	nopeusgradientti	[-]
$h_l$	virtaushäviöt vesipatsaan korkeutena	[m]
$f_D$	Darcyn kitkakerroin	[-]
$L$	putken pituus	[m]
$f_f$	Fanningin kitkakerroin	[-]
$\varepsilon$	putken pinnan karheus	[mm]
$\varphi$	kertavastuskerroin	[-]
$F$	voima	[N]
$\rho_m$	manometrin täyttönesteen tiheys	[kg/m <sup>3</sup> ]
$g_l$	paikallinen putoamiskiihtyvyys	[m/s <sup>2</sup> ]
$h_n$	nestepintojen välinen etäisyys	[m]
$m$	massa	[kg]
$A_v$	painevaan tehollinen ala	[m <sup>2</sup> ]
$KE$	vuotuinen pumppauskustannus	[€]
$Ke$	energian hinta	[€/Wh]
$E$	vuotuinen energian kulutus	[Wh]
$t$	aika	[h]

# 1. JOHDANTO

Ilmastonmuutos on lähes jatkuvasti esillä maamme tiedotusvälineissä. Ilmastonmuutoksen vaikutuksia on arvioitu eri tahojen osalta [1, 2, 3, 4] ja yhteistä arvioille on se, että ihmisen toiminnalla on oleellinen merkitys ilmaston muuttumiseen ja toimintojen vaikutukset elinympäristöömme ovat merkittäviä. Eräs kriittinen raja on keskilämpötilan nousun rajaaminen 1,5 °C esiteolliseen aikaan verrattuna. Kriittisenä rajana pidetään 1,5 °C, koska IPPC:n [4] raportissa mainitaan useiden valtioiden pitävän 2,0 °C keskilämpötilan nousuun päätymistä vaarallisena, sillä mm. kaksinkertainen määrä ihmisiä kärsisi vedenpuutteesta, kaksinkertainen määrä eläinlajeista menettäisi ison osan elinympäristöstään sekä jäätömien kesien määrä kymmenkertaistuisi Pohjoisnavalla. Lämpötilan nousun rajoittaminen 1,5 °C edellyttää sitä, että ilmakehään päätyvien päästöjen määrää kyetään pienentämään.

Rakennusten lämmitysenergian tuotanto on yksi kasvihuonepäästöjen aiheuttaja, johon voidaan vaikuttaa valitsemalla vähäpäästöisempiä tuotantotapoja ja muotoja. Energiatohokkuuden parantamisella kyetään pienentämään rakennusten lämmitysenergian tarvetta, jolloin vähennetään suoraan lämmöntuotannosta aiheutuvia päästöjä. Energiatohokkuuden parantamisen lisäksi tarvitaan myös vähäpäästöisempiä lämmönlähteitä energiantuotantoon. Energiatohokkuuden parantamiseen annetaan tällä hetkellä myös valtion taholta tukea, kun ympäristöministeriön tiedotteen mukaan [5] energia-avustusta myönnetään yhteensä 100 miljoonaa vuosina 2020-2022 asuinrakennusten energiatohokkuuden parantamiseen. Maalämpö on oikein mitoitettuna ja suunniteltuna varteen otettava vaihtoehto kiinteistön lämmitysjärjestelmäksi esimerkiksi matalien käytön aikaisien kustannusten takia.

Maalämpöjärjestelmän yksi oleellinen osa on maalämpökaivo tai yksittäisistä maalämpökaivoista muodostuva maalämpökaivokenttä. Riittävän energia- ja tehomäärän saamiseksi maalämpökaivoon tulee saada suunniteltu virtaama. Suunniteltu virtaama voidaan saavuttaa oikein mitoitettulla kiertovesipumpulla. Helpoimmalta ratkaisulta vaikuttaisi mitoittaa kiertopumppu valmiiksi hieman liian suureksi, jolloin pumpun kapasiteetti riittäisi varmasti halutun virtaaman saavuttamiseksi ja toisaalta riittävän nostokorkeuden saavuttamiseksi. Kiertovesipumppua ei kuitenkaan kannata ylimitoitaa, koska investointikustannukset hyvin todennäköisesti kasvavat. Toisaalta ylimitoitettu kiertovesipumppu ei välttämättä toimi optimaalisella hyötysuhteella osatehoa käytettäessä, jolloin sopivan



kokoisen kiertovesipumpun mitoitukseen on syytä kiinnittää huomiota. Kiertovesipumpun mitoitus ja sen valinta ei kuitenkaan ole aina niin yksinkertaista, koska osassa maalämpöpumpuista on valmiiksi asennettu kiertovesipumppu. Tällöin maalämpökaivokentän suunnittelussa tulee huomioida lähtötiedot ja vaatimukset erityisen tarkkaan, joiden mukaan järjestelmä suunnitellaan toimivan kokonaisuuden saamiseksi. Halutun virtaaman saavuttamiseen voidaan kiertovesipumpun lisäksi vaikuttaa maalämpökaivoon asennettavan keruuputken valinnalla. Mitä suurempi halkaisija keruuputkessa on, sitä pienempi painehäviö keruuputkessa muodostuu, mutta toisaalta myös keruuputken hinta sekä kaivokokoa suurennettaessa maalämpökaivon porauskustannus kasvaa.

Aikaisemmin maalämpökaivon keruuputken painehäviötä on tutkinut Acuna et. al [6], joka käsittelee neljää erilaista maalämpökaivon keruuputkea artikkelissaan. Termisiä ominaisuuksia ja spiraalimaisen putken vaikutuksia keruuputken painehäviöön tutkivat Jalaluddin et. al ja Zarrella et al. [7, 8] käyttäen tutkimuksessaan numeerista simulointityökalua. Numeerisen simuloinnin avulla u-keruuputken ja koaksiaalisen keruuputken painehäviötä sekä termisiä ominaisuuksia tutkivat Cvetkovski et al. [9].

Tässä työssä on tarkoituksena tehdä kokeellisia painehäviömittauksia erilaisten keruuputkien välillä. On mielenkiintoista nähdä sileän ja rihlatun keruuputken erot ja siten rihlojen vaikutus painehäviöön ja olemassa oleviin korrelaatioihin. Painehäviömittaukset on tarkoitus tehdä yhdessä maalämpökaivossa, johon eri keruuputkia vaihdetaan. Näin olosuhteet maalämpökaivossa ovat kaikille keruuputkille samat. Painehäviömittausten lisäksi on tarkoitus etsiä tietoa kirjallisuudesta painehäviön vaikutuksesta pumppauskustannuksiin. Tietoa pumppauskustannuksista voidaan hyödyntää investointipäätöksessä eri hintaisten sekä kokoisten keruuputkien ja toisaalta myös kiertopumpun osalta.

Työn tavoitteena on tutkia laskennallisen ja mitatun painehäviön mahdollisia eroavaisuuksia. Painehäviölaskennan ja mittausten vertailun lisäksi työn tavoitteena on tutkia painehäviön kustannusvaikutuksia ja tehdä niistä kohdeyritykselle Excel-laskentatyökalu, jota voidaan hyödyntää yrityksen toiminnassa.

Tämän työn tutkimuskysymykset ovat:

1. Mitkä tekijät vaikuttavat maalämpökaivon keruuputken painehäviöön?
2. Miten painehäviö voidaan mitata kokeellisesti keruuputkesta?
3. Mikä vaikutus rihlatulla putkella on keruuputken painehäviöön?
4. Miten painehäviö vaikuttaa järjestelmän käytön aikaisiin kustannuksiin energiajärjestelmässä?

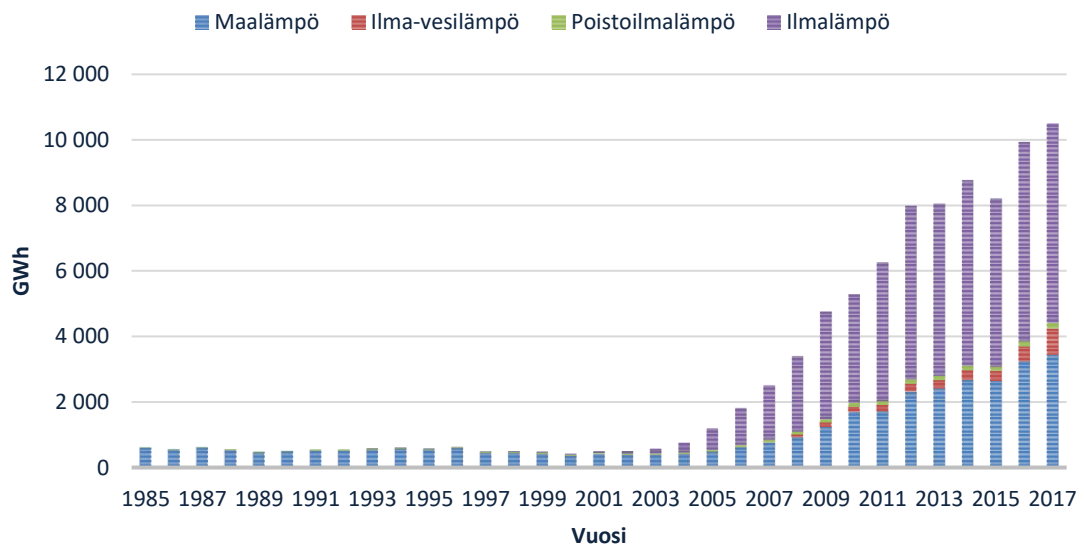
Tässä diplomityössä käydään teoriaosuudessa maalämpöjärjestelmän merkitystä ja toimintaa. Teoriaosuus jatkuu putkivirtauksen ja painehäviön osuudella, jonka jälkeen päästään varsinaiseen tutkimukseen. Tutkimus koostuu keruuputkien painehäviömitauksista sekä laskennallisen painehäviön mallintamisesta. Työssä on myös kuvattu mittausjärjestelyt, mallinnus ja herkkyystarkastelut. Mittausten jälkeen seuraa mittaus- ja mallinnustulokset sekä tulosten vertailu ja pohdinta niiden pohjalta. Lopuksi yhteenvedossa kootaan työn oleelliset tulokset sekä havainnot.

## 2. MAALÄMPÖJÄRJESTELMÄ

### 2.1 Maalämmön merkitys

Ilmastonmuutoksen hillitsemiseksi tarvitaan useampia keinoja käyttöön, jotta ilmaston lämpenemistä pystytään hidastamaan, koska tällä hetkellä ei ole yhtä yksittäistä ratkaisua lämmitysenergian päästöttömälle tuotannolle. Maalämpö on yksi niistä ratkaisuista, joilla pyritään vähentämään rakennusten lämmittämisestä aiheutuvia päästöjä ja kustannuksia. Maalämpö onkin saavuttanut mm. omakotitalojen uudisrakentamisessa merkittävän osuuden, koska vuoden 2015 jälkeen käyttöön otetuissa lämmitysjärjestelmissä on tilastokeskuksen [10] mukaan jo n. 50-%:ssa pääasiallisena lämmitystapana maalämpö.

Lämpöpumpuilla on tuotettu asuin- ja palvelurakennusten lämmitysenergiasta tilastokeskuksen tilaston mukaan [11] vuonna 2017 10,5 TWh, josta maalämmön osuus on 3,45 TWh. Vähentämällä lämpöpumppujen käyttämä sähköenergia saadaan kokonaisuudessaan tuotetuksi ”hyötyenergiaksi” 5,5 TWh, josta maalämmön osuus on 2,47 TWh.



**Kuva 2.1 Lämpöpumppujen lämmön tuotanto tai talteenotto asuin- ja palvelurakennuksissa [11]**

Kuvan 2.1 tietojen mukaan lämpöpumpuilla tuotetun energian määrä on kasvanut vahvasti 2000-luvulla. Maalämmön osalta nousu on ollut melko tasaista, mutta lämpöpumppujen energiantuotannon ylittyä 10 TWh:n rajan, nousua vaikuttaisi olevan tulossa myös jatkossa.

Tulevina vuosina voidaan odottaa nousua mm. maalämpöön sekä muihin lämpöpumppeihin tehtävissä investoinneissa sekä energiantuotannossa valtioneuvoston antaessa asetuksen asuinrakennusten energia-avustuksista vuosille 2020-2022. Energia-avustusta jaetaan ympäristöministeriön tiedotteen mukaan [5] 20 miljoonaa euroa vuonna 2020 sekä 40 miljoonaa euroa vuodessa vuosina 2021-2022. Energia-avustusta voidaan myöntää korjaushankkeen kustannuksiin, joilla parannetaan asuinrakennuksen energiatehokkuutta tietyin vaatimuksin. Avustusta voidaan myöntää omakotitaloille, paritaloille, ketjutaloille sekä kerros- ja rivitaloyhtiöille.

Maalämpö soveltuu hyvin monenlaisiin kohteisiin lämmitysjärjestelmäksi. Maalämpö on jo hyvin suosittu omakotitalojen lämmitystapana erityisesti uudisrakentamisessa, mutta sen suosio kasvaa ja on kasvanut myös isompien kiinteistöjen lämmitystapana. Maalämmön maine on saattanut joskus kärsiä huonosti toteutettujen projektien pohjalta. Valitettavasti huonosti toteutettuja projekteja tulee vieläkin vastaan, joissa maalämpökaivot ovat jäähtyneet liian kylmiksi, jolloin niiden toiminta ei ole sitä, mitä on alun perin oletettu. Näin on saattanut tapahtua projekteissa, joissa porattava metrimäärä on alimitoitettu rakennuksen energian tai tehon tarpeeseen nähden. Huolellisesti tehtyä suunnittelua ei voikaan liikaa korostaa maalämpöjärjestelmää toteutettaessa, joten siihen tulee kiinnittää erityisesti huomiota.

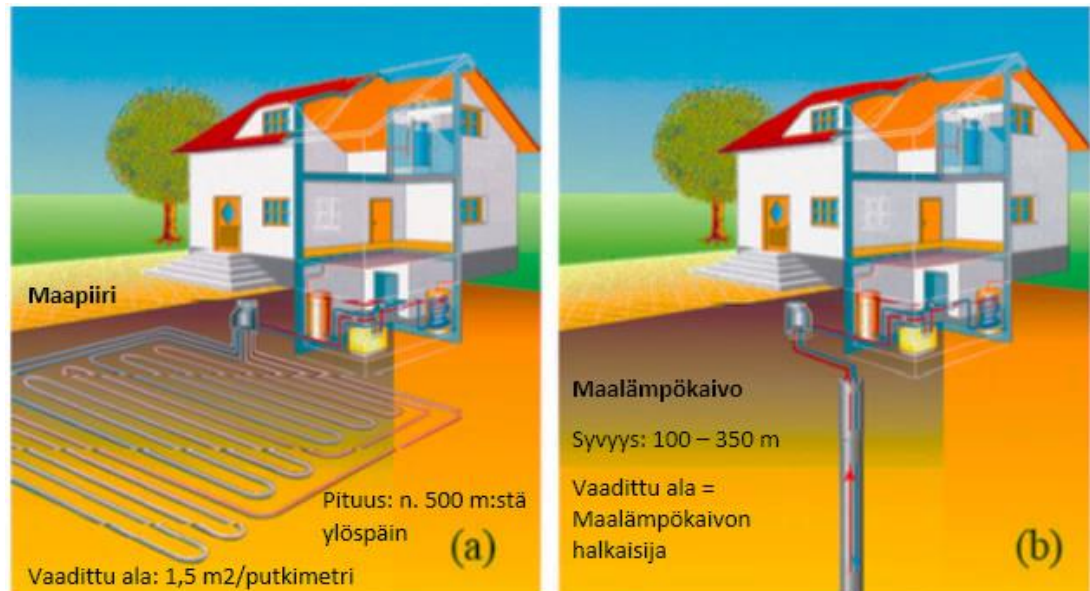
Kesäaikana rakennusten lämmitystarve yleensä pienenee, jolloin maalämpökaivo pääsee elpymään. Esimerkki maalämpöjärjestelmän elvytyksestä on elintarvikekaupan lauhdelämmön siirtäminen maalämpökaivoihin, jolloin kylmältaista saadaan ylimääräisellä lämmöllä ”ladattua” maalämpökaivoja. Maalämpökaivoihin ladattua lämpöä taas voidaan käyttää esimerkiksi käyttöveden tai tilojen lämmitykseen. Maalämpökaivoista käytetään yleisesti termiä energiakaivo, koska kaivoja voidaan käyttää myös viilennykseen. Tässä työssä käytetään kuitenkin termiä maalämpökaivo.

Maalämpöä on tähän mennessä hyödynnetty mm. liiketilojen, omakotitalojen, sairaaloiden, kerrostalojen sekä kauppakeskusten lämmityksessä ja myös viilennyksessä. Oikein suunnitellun maalämpöjärjestelmän etuina voidaan pitää matalia käytönaikaisia kustannuksia ja hyvää sijoitetun pääoman tuottoa.

## **2.2 Maalämpöjärjestelmän toiminta**

Maalämpöjärjestelmä koostuu lämmönkeruupiiristä kuten esimerkiksi maalämpökaivosta tai maahan asennetusta maapiiristä, maalämpöpumpusta sekä lämmityspiiristä.

Yksittäiset maalämpökaivot muodostavat siirtoputkiston kanssa maalämpökaivokentän, jonka toimivuus edellyttää suunnittelua, koska kaivojen keskinäiset etäisyydet ja sijainnit toisiinsa nähden vaikuttavat oleellisesti kaivokentästä saatavan energiamäärään.

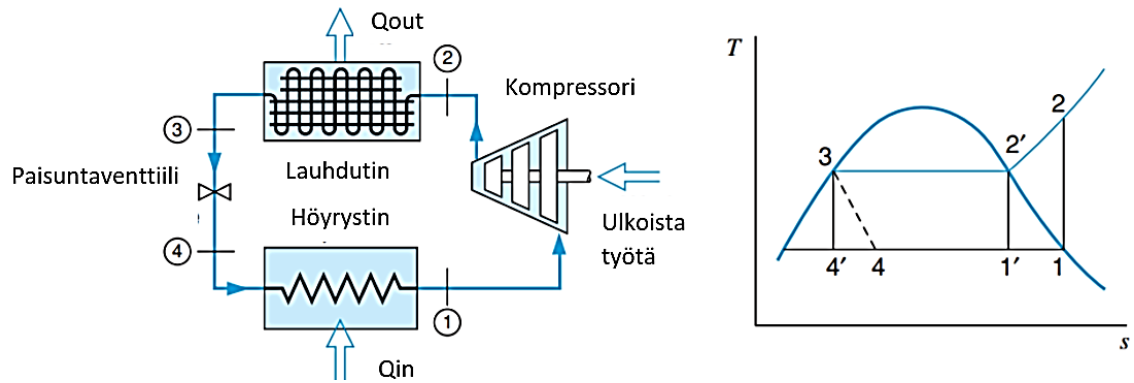


**Kuva 2.2 Havainnekuva maapiiristä ja maalämpökaivosta [12]**

Kuvasta 2.2 havaitaan maapiirin (a) ja maalämpökaivon (b) suurimmat erot. Maapiirissä keruuputkea on upotettu pintamaahan, kun taas maalämpökaivo on porattu maaosuuden läpi kallioon. Huomattavaa on myös se, että maapiiri vie huomattavasti enemmän suuremman tilan kuin maalämpökaivo, eikä maapiiriä tästä syystä voi jokaiselle tontille asentaakaan.

Maalämpöpumpun kiertovesipumppu kierrättää lämmönsiirtonestettä keruupiirissä eli joko maapiirissä tai maalämpökaivossa, josta se palaa käyttötarkoituksen mukaan, joko lämmentyneenä tai jäähtyneenä takaisin pumpulle. Lämmönkeruupiirinä voi maalämpökaivon ja maapiirin lisäksi toimia myös vesistöön asennettu lämmönkeruupiiri. Lämpöpumpun toiminnan kannalta lämmönlähteellä ei pumpun näkökulmasta ole merkitystä. Lämmönsiirtäjä voi olla kiertävän lämmönsiirtonesteen lisäksi esimerkiksi ulkoilma ilma-ilmalämpöpumpun tapauksessa.

Oleellinen osa maalämpöjärjestelmää ja sen toimintaa on maalämpöpumppu. Maalämpöpumpun toimintaperiaate on samanlainen kuin jokaisesta kodista löytyvän jääkaapin. Jääkaapissa kiertävä kylmäaine kerää lämpöä jääkaapista ja luovuttaa sen lauhduttimella huoneilmaan, kun taas maalämpöpumppu ottaa lämpönsä lämmönlähteestä kiertävästä lämmönsiirtonesteestä ja luovuttaa sen rakennuksen käyttöön lauhduttimella.



**Kuva 2.3 Lämpöpumpun toimintaperiaate [13]**

Lämpöpumpun toiminta perustuu siihen, että matalalämpötilaisesta lämmönlähteestä otetaan energiaa ja siirretään lauhduttimen kautta lämmityspiiriin. Lämpöpumppu koostuu kuvan 2.3 mukaan höyrystimestä, kompressorista, lauhduttimesta sekä paisuntaventtiilistä. Lämmönlähteestä kuten maalämpökaivosta tuleva keruuneste menee lämpöpumpun höyrystimelle. Höyrystimellä lämmönsiirtoneste luovuttaa lämmön  $Q_{in}$  ja höyrystää kylmäaineen. Höyrystynyt kylmäaine paineistetaan kompressorilla, jolloin kylmäaineen lämpötila sekä paine kasvaa. Korkean lämpötilan omaava kylmäaine menee paineistuksen jälkeen lauhduttimelle, jossa se lauhtuu kaasusta nesteeksi ja luovuttaa lämpönsä  $Q_{out}$  lämmityspiiriin. Lauhtumisen jälkeen kylmäaine menee paisuntaventtiilille, jossa kylmäaineen paine laskee. Paisuntaventtiilin jälkeen kylmäaine kulkee jälleen höyrystimelle ja kylmäaineen kierto lämpöpumpussa jatkuu.

Lämpöpumpun COP (Coefficient of Performance) eli hyötysuhde kertoo, kuinka paljon energiaa saadaan tuotettua 1 kW:lla sähköä.  $COP_{hp}$  on kuvattu yhtälössä (2.2.1):

$$COP_{hp} = \frac{Q_{out}}{Q_{out} - Q_{in}} = \frac{Q_{out}}{W}, \quad (2.2.1)$$

missä  $Q_{out}$  on lauhduttimella luovutettu lämpö ja  $W$  lämpöpumpun tekemä työ eli kuluttama sähkö. [13]

Maalämpöpumpun jälkeinen osa maalämpöjärjestelmää on rakennuksen lämmityspiiri. Lämmityspiiri saa lämpönsä lämpöpumpun lauhduttimelta, jossa lauhtuva kylmäaine energiaa luovuttaessaan muuttuu jälleen nesteeksi. Lämmityspiiri voi koostua vesikiertoisesta lattialämmityksestä tai patterilämmityksestä sekä käyttöveden lämmityksestä. Lattialämmitystä pidetään hyötysuhteeltaan parempana verrattuna patterilämmitykseen, koska veden lämpötilan ei tarvitse lattialämmityksessä olla niin korkea.

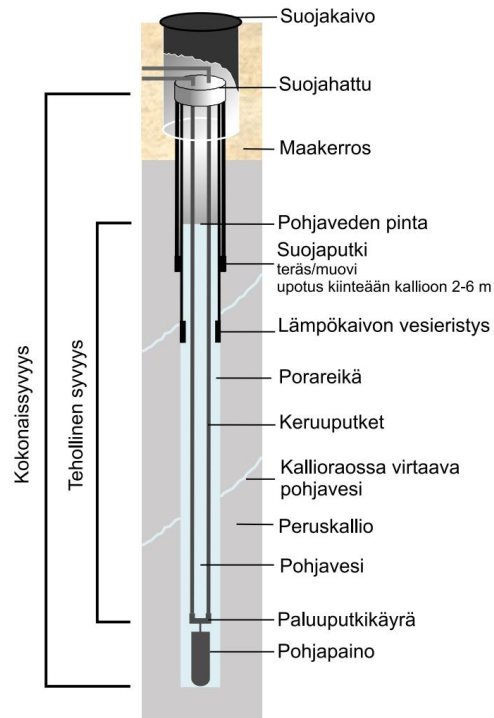
## 2.3 Keruuputket ja niiden toiminta

Maalämpöjärjestelmän lämmönkeruupiirinä voidaan käyttää joko pintamaahan, vesistöön tai maalämpökaivoon asennettua keruuputkea, joka on useimmiten PE-muovia. Yleisesti käytössä olevia putkikokoja ovat 32, 40, 45 ja 50 mm halkaisijaltaan olevat keruuputket, joista 40 mm:n keruuputken voi sanoa olevan yksi eniten käytetyistä putkikoosta Suomen markkinoilla. Maalämpöjärjestelmän käyttö, mitoitus sekä maalämpöpumpun kiertopumppu asettavat ehtoja keruuputken halkaisijalle ja myös maalämpökaivon syvyydelle.

Keruuputkissa kiertää lämmönsiirtoneste, joka maalämpökaivojen osalla on yleensä vesietanoli liuos. Maalämpöjärjestelmän putkistoissa kiertävää vesietanoli liuosta voidaan pitää kokoon puristumattomana, mutta siihenkin liittyy eräs tärkeä huomio. Vesietanoli liuokseen on etenkin liuoksen sekoituksen jälkeen liunneena ilmaa, jonka jälkeen järjestelmän täyttö yleensä tehdään. Maalämpöjärjestelmien käyttöönotoissa tulee huomioida ilman poistamisen tärkeys, jotta järjestelmä saadaan toimimaan oikein. Keruuputkissa onkin syytä kierrättää vesietanoli liuosta riittävän kauan, jotta mahdollisimman suuri osa ilmasta saadaan pois. Huomioitavaa kuitenkin on se, että suurissa järjestelmissä voidaan tarvita erillinen ilman poistin, koska nestetilavuus ja sitä kautta myös poistettavan ilman määrä ovat suurempia.

Maahan vaakatasoon asennettujen keruuputkien tehtävänä on kerätä lämpöä maan pinnasta, kun taas vesistöön asennetuilla keruuputkilla kerätään lämpöä luonnollisesti vedestä. Maalämpökaivo eroaa maahan tai vesistöön asennettavista ratkaisuista siten, että se tulee porata ensin pintamaan läpi ja tämän jälkeen edelleen kallioperään kuten kuvasta 2.2 huomataan. Poraamisen jälkeen maalämpökaivoon lasketaan lämmönkeruunesteellä täytetty keruuputki, joka lämpöpumppuun kytkettynä siirtää lämpöä joko kalliosta keruunesteeseen tai jäähdytyssovelluksessa keruunesteestä kallioon.

Maalämpökaivoissa käytetään yleensä keruuputkia, jotka ovat joko yksittäisiä u-lenkkejä tai kaksinkertaisia u-lenkkejä, jossa on kaksi meno- ja paluuputkea.



**Kuva 2.4 Maalämpökaivon detaljikuva [14]**

Kuvan 2.4 mukaan maalämpökaivon keruuputken päässä on pohjapaino, joka on edellytyksenä keruuputken laskemiselle maalämpökaivoon. Keruuputken yläpäähän, suojahatun yläpuolelle kiinnitetään vaakaputki muovihitsaamalla. Vaakaputki kulkee maalämpökaivolta edelleen joko suoraan rakennuksen lämmönjakohuoneeseen jakotukkiin tai vaihtoehtoisesti maalämpökaivojen vaakaputket kokoavaan kokoomakaivoon. Kokoomakaivolta lämmönsiirtoneste pääsee runkoputkia pitkin edelleen lämmönjakohuoneeseen lämpöpumpulle.

Aikaisemmin mainittujen keruuputkien lisäksi on myös soikeita keruuputkia, joilla pyritään aikaansaamaan pienempi painehäviö suuremman virtauspoikkipinta-alan avulla. Suurempi poikkipinta-ala perustuu siihen, että maalämpökaivoon mahtuu paremmin saman poikkipinta-alan omaava soikea kuin pyöreä keruuputki. Tällöin soikea keruuputki voi olla poikkipinta-alaltaan suurempi pyöreään keruuputkeen verrattuna.

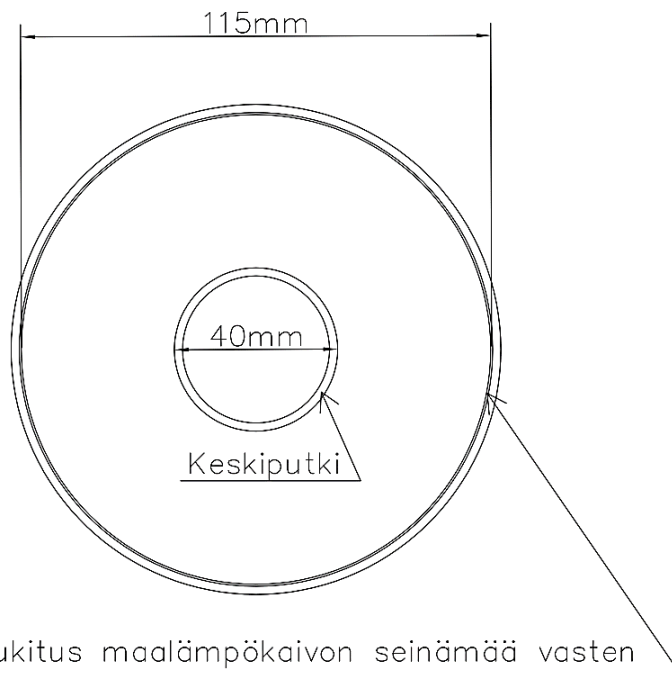
Osassa keruuputkista käytetään erottimia, jotka pitävät u-keruuputken meno- ja paluuputken erillään. Tällä ratkaisulla pyritään varmistamaan se, että lämmönsiirto menevän ja palaavan keruuputken välillä olisi mahdollisimman pientä [15]. Putkierottimien lisäksi keruuputkiin on kehitetty myös muita ratkaisuja. Maalämpökaivoihin on saatavilla sileän putken lisäksi keruuputkea, jossa on rihlat sisäpuolella [16].





**Kuva 2.5 Rihlatun keruuputken sisäpuoli [16]**

Kuvassa 2.5 näkyy keruuputken rihlat, jotka kiertävät putken sisäpinnalla. Todellisuudessa rihlat eivät ole niin massiiviset kuin kuvassa 2.5 näyttää olevan, mutta periaate tulee siitä selväksi. Rihlojen tarkoituksena on saada virtaus keinotekoisesti pyörteiseksi, jotta lämmönsiirto paranisi keruuputkessa olevan vesietanoli liuoksen ja maalämpökaivon välillä myös pienemmillä tilavuusvirran arvoilla. Hieman erilaista keruuputkea edustaa koaksiaalinen keruuputki. Koaksiaalinen keruuputki on periaatteeltaan täysin erilainen verrattuna u-keruuputkiin.



**Kuva 2.6 Koaksiaalisen keruuputken periaatekuva [17]**

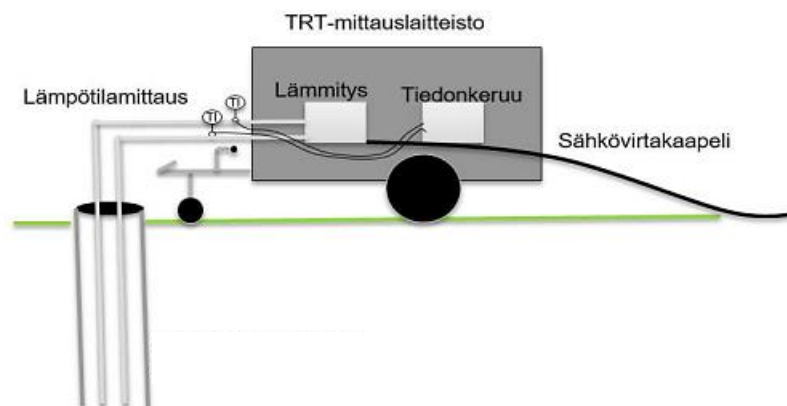
Kuvasta 2.6 nähdään koaksiaalisen keruuputken rakenne, jossa maalämpökaivon seinämää vasten on asennettu sukitus. Sukituksen tarkoitus on [17] mukaan vähentää lämmönsiirtonesteen ja kallion välistä etäisyyttä. Sukitus asennetaan maalämpökaivon seinämään kiinni laskemalla sukka kaivoon ja täyttämällä se vedellä, jolloin se tiivistyy maalämpökaivon seinämää vasten. Sukituksen asennuksen ja tiivistyksen jälkeen maaläm-

pökaivoon asennetaan keskiputki painojen avulla, kuten sukan laskemisessa. Keskiputken saaminen maalämpökaivon keskelle ei Acunan [17] mukaan ole kovin yksinkertaista, joskin keruuputki ja asennustavat ovatkin vielä kehitysvaiheessa.

## 2.4 Maalämpöjärjestelmän suunnittelu

Maalämpöjärjestelmän hyvin tehty suunnittelu on tärkeää, jotta kustannussäästöt sekä järjestelmän toimivuus saadaan varmistettua. Maalämpökaivosta saatavan energian suuruus riippuu maaperän kalliolaadusta, jonka vaihtelua Suomen sisäisesti voidaan tutkia mm. geologian tutkimuskeskuksen GTK:n maankamara karttapalvelusta, jossa kuvataan Suomen maa- ja kallioperää [18]. Kartasta saadun kivilajitiedon perusteella voidaan tutkia kallioperän lämmönjohtavuuksia, jonka pohjalta voidaan lähteä arvioimaan maalämpökaivokentän kokoa simuloinnilla. Karttojen avulla ei saada kuitenkaan kovin tarkkaa tietoa todellisesta kallioperän lämmönjohtavuudesta. Lämmönjohtavuuden todentamukseen ja tarkempaan tutkimiseen on kehitetty TRT-testi eli terminen vastetesti. Maalämpökaivosta saatavaan energiamäärään vaikuttaa mm. pohjaveden pinnankorkeus, maaperän häiriötön lämpötila, kallioperän lämmönjohtavuus, pohjaveden virtaukset sekä maalämpökaivon porakaivovastus. Edellä mainittuja maalämpökaivon ominaisuuksia voidaan tutkia termisellä vastetestillä. Termisen vastetestin tärkeys korostuu erityisesti isoissa maalämpökaivokentissä, koska oikean mitoituksen merkitys tällöin kasvaa. [14]

Termisen vastetestin aikana maalämpökaivon keruuputkessa kiertävää lämmönsiirto- nestettä lämmitetään sähkövastuksella vakioteholla. Keruuneste lähtee TRT-laitteesta lämmentyneenä maalämpökaivoon, jossa se jäähtyy ja palaa takaisin TRT-laitteeseen.



**Kuva 2.7 TRT-mittauslaitteisto [31]**

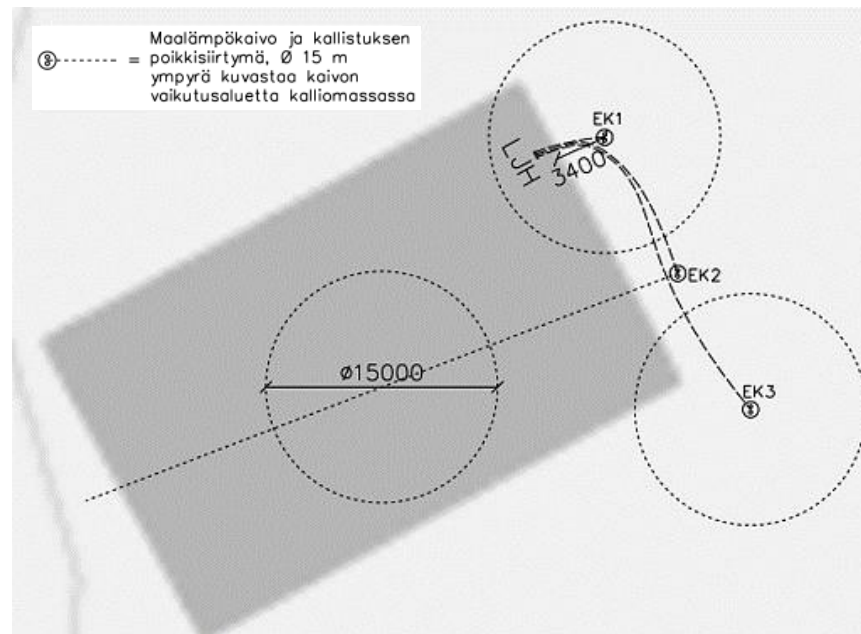
Kuvan 2.7 mukaan keruuputken lämmönkeruuputkien meno- ja paluulinjasta mitataan lämpötila. TRT-mittauslaitteessa on myös tiedonkeruuyksikkö, joka tallentaa lämpötiladataa mittauksesta. Mitattujen lämpötilojen sekä kaivoon kohdistetun lämpötehon perusteella pystytään määrittämään maalämpökaivolle porakaivovastus sekä lämmönjohtavuus. Termisestä vastetestistä saatua lämmönjohtavuutta ja porakaivovastusta voidaan hyödyntää kaivokentän simuloinnissa, kun määritetään tarvittava poraussyvyys maalämpökaivoille.

Eräs kaivokentän simuloinnissa käytettävä ohjelmisto on Earth Energy Designer (EED) tietokoneohjelma, joka on tehty maalämpöjärjestelmän sekä maalämpökaivolämpövaraston suunnittelua varten [19]. EED hyödyntää juuri edellä mainitun TRT-testin mittaus tuloksia simuloinnissaan. Simulointi EED:llä perustuu valmiisiin algoritmeihin, jotka on ohjelmoitu ohjelmaan. EED sisältää hyvin suuren määrän valmiista dataa esimerkiksi kallioperän lämmönjohtavuuksista ja simulointi voidaan tehdäkin ilman TRT-mittausta valmiin datan perusteella. Tarkempaan analyysiin saadaan kuitenkin tietoa TRT-mittauksella, jossa selviää kyseisen mittauspaikan kallioperän lämmönjohtavuus, porakaivovastus sekä maaperän häiriötön lämpötila ominaisuudet ja olosuhteet. Erityisesti suurten maalämpökaivokenttien osalta on suositeltavaa tehdä aina TRT-mittaus ennen EED-simulointia, jotta simuloinnin lähtötiedot ovat mahdollisimman tarkat, jolloin tiedetään, minkä verran energiaa tai tehoa voidaan maalämpökaivoista saada.

EED-simulointia tehdessä tulee ohjelmalle syöttää lähtötietoja. Yksi oleellinen lähtötieto simuloinnin kannalta on rakennuksen energiankulutus ja energian kulutuksen jakautuminen päivien ja tuntien aikana. Mikäli rakennuksen energiankulutuksesta ei ole tietoa, voidaan energiankulutusta arvioida erityisesti uudiskohteiden osalta erilaisilla simulointiohjelmilla. Muita maalämpökaivokentän simuloinnin kannalta oleellisia tietoja ovat maaperän ominaisuudet kuten lämmönjohtavuus, maalämpökaivon porakaivovastus, lämmön siirtoneste, maaperän häiriötön lämpötila sekä keruuputken tyyppi ja maalämpökaivokonfiguraatio. EED-simulointia tehdessä tulee myös valita simuloitavan aikajakson pituus vuosina. Jos TRT-mittausta ei ole tehty, tulee maaperän häiriötön lämpötila määrittää laskennallisesti geotermisen lämpövuon, maan pintalämpötilan sekä maan lämmönjohtavuuden avulla.

EED-simuloinnissa käytetään yhtenä parametrinä maalämpökaivokentän muotoa, jota kutsutaan maalämpökaivokonfiguraatioksi. Maalämpökaivokonfiguraatio tarkoittaa sitä, miten maalämpökaivot ovat sijoittuneet toisiinsa nähden. Maalämpökaivot voivat esimerkiksi olla rivissä, U- tai L-muodostelmassa. [19]

Maalämpökaivokentän suunnittelulla voidaan vaikuttaa siihen, kuinka paljon energiaa maalämpökaivoista saadaan, siten että maalämpökaivot eivät jäähy liian kylmiksi. Maalämpökaivot vaikuttavat toisiinsa ja hyvin lähekkäin poratut pystysuorat maalämpökaivot heikentävät toisiaan erityisesti pelkässä lämmityskäytössä, jossa kaivoja ei erikseen "ladata". Energiakaivo-oppaan [14] mukaan pystysuorien maalämpökaivojen suositeltu minimietäisyys on 15 metriä. Vinoporauksella voidaan kuitenkin ikään kuin siirtää maalämpökaivon keskimääräistä vaikutusaluetta eli alaa, josta maalämpökaivo ottaa energiansa.



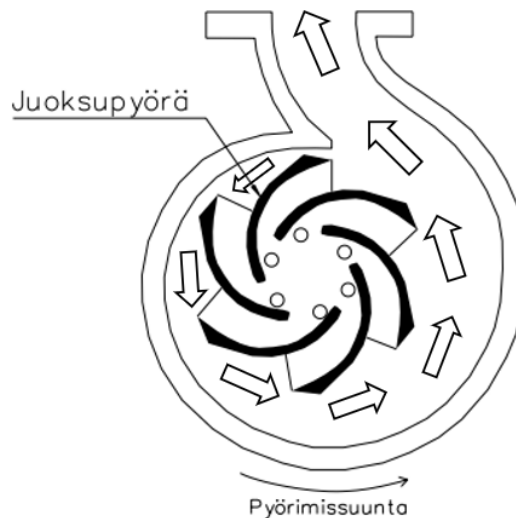
**Kuva 2.8 Maalämpökaivokenttä pienoiskoossa**

Kuvaan 2.8 on piirretty kaksi pystysuoraa ja yksi vinoporattu maalämpökaivo. Maalämpökaivojen vaikutusalueet kaivojen ympärillä ovat lähinnä helpottamassa kaivojen välisen etäisyyden havainnointia. Vaikutusalueet eivät niinkään kerro siitä, kuinka etäältä kaivot ottavat energiaa. EED-simuloinnin avulla saadaankin tietoa tarkemmin siitä, millainen vaikutus mm. maalämpökaivojen määrällä, keskinäisellä etäisyydellä ja mitoituksella on maalämpökaivojen keruunesteen lämpötiloihin. Kaivokentän simuloinnin jälkeen selvitetään investoinnin taloudellinen kannattavuus, jonka jälkeen tehdään päätös toteutuksesta tai tarvittaessa muokataan toteutettavaa järjestelmää kannattavammaksi kuvan 2.9 mukaan.



moitettua nimellisvirtaamaa saavuteta, jolloin lämmönsiirtonesteen meno- ja paluulämpötilojen eron  $\Delta T$  tulee kasvaa. Lämpötilojen eron tulee kasvaa, jotta lämmönsiirtonesteestä saadaan lämpöpumpulle energiaa saman verran kuin suuremmalla tilavuusvirralla saataisiin.

Yksi käytössä olevista kiertovesipumpputyypeistä on keskipakopumppu. Keskipakopumpun toimintaperiaate on melko yksinkertainen. Pumpussa on juoksupyörä, jota pyöritetään esimerkiksi sähkömoottorilla.



**Kuva 2.10 Keskipakopumpun juoksupyörä ja kammiot [20]**

Kuvasta 2.10 nähdään, että juoksupyörä ei sijaitse keskellä kammiota. Pumpun toiminta perustuu alueiden pinta-alojen suhteeseen juoksupyörän molemmiin puoliin. Jos juoksupyörä sijaitisi keskellä kammiota, tilavuusvirran tuotto olisi suurempi, mutta paineen tuotto taas pienempi.

Juoksupyörän lisäksi pumpussa on imusuutin ennen juoksupyörää sekä diffusori juoksupyörän jälkeen, jossa juoksupyörän liike-energia muuttuu staattiseksi paineeksi. Imusuuttimella olevan imupaineen suuruus on kriittinen pumpun toiminnan kannalta. Jos imupaine laskee pumpattavan nesteen höyrystymispaineen alapuolelle, alkaa neste paineen laskun takia höyrystymään eli kavitoimaan. Kavitaatio kuluttaa juoksupyörää, sillä nesteen höyrystyessä muodostuneiden höyrykuplien romahdus aiheuttaa kovia paineiskuja. Jatkuvat paineiskut kuluttavat ajan kanssa juoksupyörää osuessaan siihen. [20]

Kavitaation välttämiseksi pumpuille on olemassa NPSH-arvo (Net Positive Suction Head) eli positiivinen imukorkeus kullekin virtaaman arvolle. Termi  $NPSH_p$  on minimipaine, joka pumpun imupuolella tulee olla, jotta neste ei lähde kavitoimaan. Termi  $NPSH_p$  koostuu eri osista, jotka ovat [20] mukaan:

$$NPSH_p = ATM + P_{gs} + H_v + H_{vp}, \quad (2.5.1)$$

jossa  $ATM$  on ympäristön paine metreinä pumpun asennuskorkeudella,  $P_{gs}$  imupaine metreinä pumpun keskilinjasta,  $H_{vp}$  nesteen höyrystymispaine metreinä sekä  $H_v = \frac{U^2}{2g}$  virtausnopeuden aiheuttama imukorkeuden tarve metreinä. NPSH-arvo muuttuu yhdessä virtaaman kanssa, joten virtaaman muuttuessa tulee tarkistaa myös muuttunut NPSH-arvo kavitoinnin välttämiseksi.

Pumpun tarkoitus on tuottaa suunniteltu tilavuusvirta sekä suunniteltu nostokorkeus. Pumpun todellinen teho nostokorkeuden avulla ilmoitettuna määritetään seuraavasti:

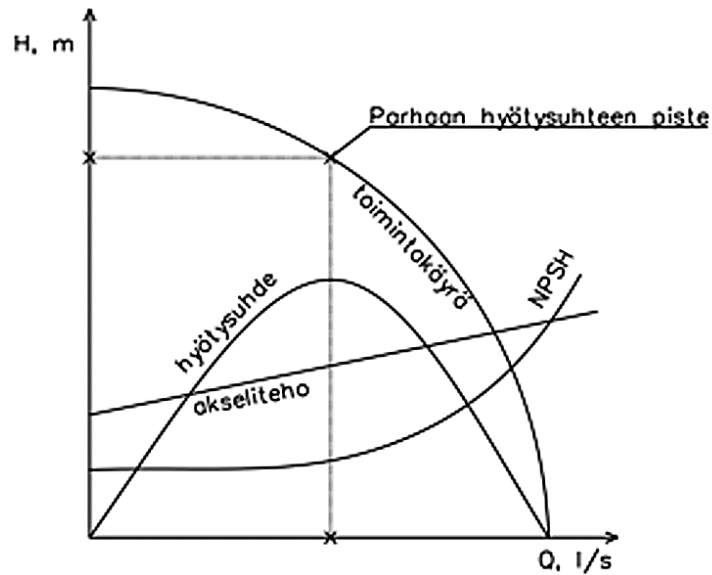
$$P_t = \frac{\rho * Q * g * H}{n_t}, \quad (2.5.2)$$

jossa  $\rho$  on tiheys,  $Q$  tilavuusvirta,  $g$  putoamiskiihtyvyys,  $H$  pumpun nostokorkeus ja  $n_t$  kokonaishyötysuhde. Paine-eron avulla ilmoitettuna pumppausteho saa muodon:

$$P_t = \frac{Q * \Delta p}{n_t}, \quad (2.5.3)$$

jossa  $Q$  on pumpun tuottama tilavuusvirta,  $\Delta p$  on paine-ero pumpun yli ja  $n_t$  kokonaishyötysuhde [21]. Kokonaishyötysuhde kuvaa sitä, kuinka suuren osan pumpun akselille syötetystä tehosta pumppu muuntaa hydrauliseksi pumppaustehoksi. Kauranne et al. mukaan [21] merkittävimpiä pumpun hyötysuhteeseen vaikuttavia tekijöitä ovat paine-ero pumpun yli sekä pumpun pyörimisnopeus. Hyötysuhteeseen vaikuttavat myös mm. pumpun rakennetyyppi, pumpattavan nesteen ominaisuudet, toimintalämpötila sekä kierrostilavuusasetus säätötilavuuksisella pumpulla.

Pumppujen suorituskykyä ja ominaisuuksia kuvataan pumpun toimintakäyrällä, jossa on sekä pumpun tuottama nostokorkeus että tilavuusvirta. Pumpun hyötysuhde vaihtelee sen mukaan, mikä on tarvittava nostokorkeus  $H$  tai tilavuusvirta  $Q$ .



**Kuva 2.11 Periaatekuva pumpun  $Q$ - $H$ -käyrästä [20]**

Kuvassa 2.11 on pumpun toimintakäyrä, josta voidaan lukea pumpun toimintapiste eli esimerkiksi pumpun nostokorkeus tietyllä tilavuusvirran arvolla tai päinvastoin. Akselitehon perusteella voidaan hahmottaa sitä, kuinka suurella teholla pumppu toimii ja toisaalta arvioida, kuinka paljon energiaa pumppu kuluttaa käydessään. Bachus et al. mukaan akseliteho yleensä kasvaa tilavuusvirran tarpeen noustessa, mutta se voi pysyä myös vakiona tai jopa pienentyä tilavuusvirran kasvaessa. Toimintakäyrää voidaan tulkita siten, että nostokorkeuden tarpeen noustessa toimintapiste liikkuu käyrällä ylöspäin, jolloin pumpulla tuotetun tilavuusvirran määrä pienenee. Toisaalta taas tilavuusvirran tarpeen noustessa toimintapiste liikkuu alaspäin, jolloin tuotettu nostokorkeus pienenee. Bachus et al. mukaan pumppu ei voi toimia toimintakäyrän ulkopuolella, jos virtausnopeus, juoksupyörän halkaisija ja suunnittelu on tehty oikein. Pumppu voi toimia huonolla hyötysuhteella aivan oikeassa tai vasemmassa reunassa käyrää, mutta ei siltikään käyrän ulkopuolella. Pumppua valitessa tuleekin kiinnittää huomioita siihen, että pumppu toimisi suurimman osan ajasta parhaalla hyötysuhteella tai sen lähetyvillä. [20]



## 3. PAINEHÄVIÖ PUTKESSA

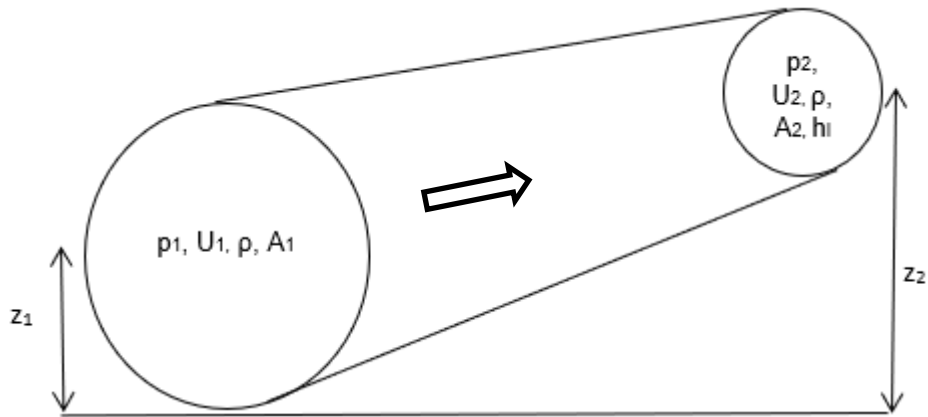
### 3.1 Putkivirtaus

Maalämpöjärjestelmien yhteydessä on tarpeen puhua virtauksesta, koska koko järjestelmä pohjautuu putkissa virtaavaan nesteeseen ja siihen liittyviin lainalaisuuksiin. Maalämpöjärjestelmän keruupiirin putkistoissa virtaava neste on joko laminaarilla alueella, transitoalueella tai turbulenttisella alueella.

Laminaari virtaus on viskoosia virtausta, jossa Reynoldsin luvun määritelmän mukaan (3.2.1) virtauksen tyyppiin vaikuttaa viskositeetti, virtausnopeus, putken halkaisija sekä virtaavan nesteen tiheys [22]. Laminaarin ja turbulenttisen virtauksen välissä on siirtymäalue, jota kutsutaan transitoalueeksi. Transitoalueella virtaus alkaa irrota putken seinäältä ja se alkaa pyörteillä. Transiovirtaus on kuitenkin ilmeisen hankalaa mallintaa ennalta arvaamattoman käyttäytymisensä vuoksi, jonka takia siitä ei löydy kovin hyvin tietoa kirjallisuudesta.

Keruuputkessa kulkevan nesteen tulisi siirtää lämpöä mahdollisimman hyvin, jolloin turbulenttinen virtaus on toivottava nesteen hyvän sekoittumisen vuoksi. Painehäviön suuruus kuitenkin kasvaa nopeasti turbulenttisella alueella, joten sallitun painehäviön suuruus tulee huomioida suunnitteluvaiheessa toimivan järjestelmän saamiseksi. Putkivirtauksen yhteydessä virtausta voidaan pitää laminaarina alueella, jossa Reynoldsin luku on pienempi kuin kriittisenä lukuna pidetty  $Re_{kriittinen} = 2300$ , jota käytetään suunnitteluparametrina transiovirtaukselle. Huolimatta Reynoldsin luvun raja-arvosta transiovirtauksen ja laminaarin virtauksen välillä, virtaus voi olla laminaarista myös huomattavasti korkeammilla Reynoldsin luvun arvoilla. Tämä voi kuitenkin toteutua vain hyvin sileillä putkilla, tasaisella virtauksella ja pyöreällä virtauksen kehittymisalueella. [22, 23]

Putkivirtaukseen liittyvä ja virtauksen energiaa kuvaava fysiikan laki on Bernoullin laki, jolle voidaan johtaa Bernoullin yhtälö kuvan 3.1 pohjalta.



**Kuva 3.1 Havainnekuva putkivirtauksesta**

Bernoullin yhtälö kokoon puristumattomalle sekä kitkahäviöt huomioivalle virtaukselle kirjoitetaan muodossa:

$$\frac{p_1}{\rho} + \frac{1}{2} * U_1^2 + g * z_1 = \frac{p_2}{\rho} + \frac{1}{2} * U_2^2 + g * z_2 + h_l \quad (3.1.1)$$

jossa  $p$  on virtaavan nesteen paine,  $\rho$  tiheys,  $U$  virtausnopeus,  $g$  putoamiskiikkyvyys,  $z$  korkeus referenssipisteestä sekä kitkan ja kertahäviöt sisältävä  $h_l$  häviötermi metreinä. Kaava (3.1.1) esittää virtauksen sisältämää energiaa putken jokaisessa pisteessä, joissa tiheyden oletetaan pysyvän vakiona sekä alku että lopputilanteessa. Kuvassa 3.1 havainnollistetaan virtausta, jossa virtauskanavan poikkipinta-ala muuttuu. [23]

Bernoullin lain mukaan virtauskanavassa virtausnopeuden kasvaessa paine pienenee. Toisaalta taas virtausnopeuden pienentyessä paine virtauskanavassa kasvaa. Paineen nousuun ja laskuun vaikuttaa vertailupisteiden välinen korkeusero, virtauskanavan poikkipinta-ala sekä virtausnopeus. Jatkuvuusyhtälö kertoo pinta-alan ja virtausnopeuden alkupisteen muutoksen vaikutuksen virtauskanavan loppupisteeseen:

$$Q = U_1 * A_1 = U_2 * A_2 \quad (3.1.2)$$

jossa  $A$  on virtauskanavan pinta-ala,  $Q$  tilavuusvirta ja  $U$  virtausnopeus kuvan 3.1 mukaan. [24]

Bernoullin lain kiinnostavuus maalämpöjärjestelmän yhteydessä koskee mm. maalämpökaivokentän runko- ja vaakaputkistoja sekä linjasäätöventtiileitä. Linjasäätöventtiileillä tehdään tasapainotusta maalämpökaivojen välille, jotta kaikkiin kaivoihin saadaan suunniteltu virtaama. Jos venttiiliä joudutaan kuristamaan paljon esimerkiksi huonosti tehdyn suunnittelun pohjalta, korkeaksi kasvanut virtausnopeus sekä painehäviö venttiilissä voi saada aikaan melua ja venttiilin kulumista. Runko- ja vaakaputkistoissa käytetään supistuksia ja laajennuksia, kun siirrytään putkikoosta joko isompiin tai pienempiin. Supistusten kohdalla virtauskanavan eli putken poikkipinta-alan pienentyessä virtausnopeus putkessa kasvaa, jolloin paine Bernoullin lain mukaan pienenee.

Painehäviö on yksi maalämpökaivokentän suunnitteluun vaikuttavista tekijöistä. Maalämpöjärjestelmän suunnittelussa tulee huomioida putkistojen painehäviöt, jotta järjestelmä saadaan toimimaan oikein ja samalla kustannustehokkaasti. Esimerkiksi huonosti tehty painehäviölaskenta voi aiheuttaa sen, että järjestelmän kiertovesipumppu mitoiteetaan väärin. Väärä mitoitus voi lisätä huonomman pumppaushyötysuhteen kautta käytön aikaisia pumppauskustannuksia sekä huonossa tapauksessa myös lyhentää pumpun käyttöikä.

### **3.2 Painehäviö ilmiönä**

Painehäviötä ja erityisesti sen esiintymistä voidaan havaita useissa arkielämän tilanteissa. Esimerkiksi perinteiseen omakotitalon hanaan yhdistetystä, hyvin pitkästä puutarhaletkusta ei todennäköisesti tule kovin suurta tilavuusvirtaa vettä eikä vesisuihku yllä kovin kauas, mutta toisaalta letkua merkittävästi lyhentämällä voidaan havaita voimakkaampi vesisuihku ja suurempi veden tilavuusvirta. Vettä pumppaavalle kiertovesipumpulle on ominainen maksimi nostokorkeus ja tilavuusvirta, jonka pumppu kykenee pumppaamaan. Jos esimerkiksi vesitynnyrin täyttämiseen käytetään pitkää ja hyvin ohutta puutarhaletkua, ei pumppu välttämättä jaksa tuottaa pumpulle ominaista tilavuusvirtaa, koska pumpun tuottama nostokorkeus ei pysty kumoamaan puutarhaletkusta aiheutuvaa painehäviötä. Tästä syystä pumpun tuottama tilavuusvirta on pienempi kuin pumpun ominainen tilavuusvirta, jolloin pumpun nostokorkeus jää samalle tasolle puutarhaletkusta aiheutuvan painehäviön kanssa. Puutarhaletkun kokoa suurentamalla saadaan kompensoitua esimerkiksi puutarhaletkun pituutta, jolloin suurempi halkaisijaisesta, mutta saman pituisesta puutarhaletkusta saadaan suurempi virtaama läpi, koska muodostuva painehäviö on pienempi.

Painehäviöön putkivirtauksessa vaikuttavat virtaavan nesteen viskositeetti, putken halkaisija, nesteen virtausnopeus, putken pituus, nesteen tiheys sekä putken pinnan karheus. Oleellinen osa kitkakertoimen määrittämisestä ja toisaalta painehäviön suuruutta on Reynoldsin luku. Reynoldsin luku on dimensioton luku, joka kuvaa virtauksen tilaa virtauskanavassa. Virtauksen tilalla tarkoitetaan sitä, onko virtaus laminaarista, transiio-alueella vai turbulენტista. Virtauksen tilaan oleellisesti liittyvä Reynoldsin luku määritellään siten yhtälön mukaan:

$$Re = \frac{\rho * d * U}{\mu}, \quad (3.2.1)$$

jossa  $\rho$  on virtaavan aineen tiheys,  $d$  putken halkaisija,  $U$  virtausnopeus ja  $\mu$  dynaaminen viskositeetti. Reynoldsin luvun suuruuteen ja sitä kautta yksi painehäviöön vaikuttava tekijä on viskositeetti. Viskositeetti on suure, joka kuvaa fluidin eli nesteen, kaasun tai plasman sisäistä kitkaa ja ominaisuutta vastustaa fluidin virtausta. Viskositeetin ilmene mistä ja vaikutusta voi havainnoida esimerkiksi juoksemalla ulkona tietä pitkin tai toisaalta juoksemalla vedessä. Vedessä juostessa vastus tuntuu huomattavasti suuremmalta kuin maalla juostessa, koska veden viskositeetti on suurempi kuin ilman. Viskositeetin suuruuteen vaikuttaa fluidin lämpötila ja paine. Lämpötilan noustessa kaasujen viskositeetti kasvaa, kun taas nesteillä lämpötilan noustessa viskositeetti pienenee. Paineen vaikutus viskositeettiin ei kuitenkaan ole merkittävää kuin vasta hyvin suurilla paineilla. Isaac Newton esitti, että virtaavan fluidin virtauskerrosten välille kohdistuu leikkausjännitys seuraavasti:

$$\tau = \mu * \frac{du}{dy}, \quad (3.2.2)$$

jossa  $\mu$  on dynaaminen viskositeetti ja  $\frac{du}{dy}$  nopeusgradientti newtonisille eli lineaarisesti käyttäytyville fluideille. [23]

Kaavan (3.2.2) perusteella voidaan päätellä, että mitä suurempi viskositeetti aineella on, sitä suurempi leikkausjännitys muodonmuutoksessa ilmenee. Vertailua voidaan tehdä esimerkiksi siirapin ja veden välillä. Siirapin suurempi viskositeetti aiheuttaa sen, että sen muoto muuttuu heikommin eli se on jäykempää kuin vesi, jonka voi hyvin havaita valuttamalla niitä purkeista esimerkiksi lasiastiaan. Nesteen viskositeetti voidaan määrittää Kauranne et al. [21] mukaan ISO-standardin mukaisessa lämpötilassa kapillaari-

viskometrillä. Viskositeetti saadaan selville mittaamalla aika, joka tietyllä nestetilavuudella kestää valua viskometrin läpi. Saatua tulosta verrataan tunnetun nesteen mittausarvoon, jolloin saadaan tulos mitatulle nesteelle.

Nesteen virratessa putkessa muodostuu painehäviöitä, jonka eräänä tunnettuna empiirisenä korrelaationa kokoon puristumattomalle virtaukselle on ranskalaisen insinöörin Henry Darcyn ja saksalaisen professorin Julius Weisbachin mukaan nimetty Darcy-Weisbach kaava:

$$h_f = f_D * \frac{L}{d} * \frac{U^2}{2g} \quad (3.2.3)$$

jossa  $f_D$  on dimensioton Darcyn kitkakerroin putken pinnankarheudelle,  $h_f$  painehäviö vesipatsaan korkeutena,  $L$  putken pituus,  $d$  putken halkaisija,  $U$  virtausnopeus sekä  $g$  putoamiskiihtyvyyden. Darcyn kitkakertoimen  $f_D$  yhteydessä täytyy ensin määrittää Reynoldsin luku, jotta kitkakerroin saadaan määritettyä. [22, 23, 24]

Korrelaatiota (3.2.3) voidaan käyttää sekä laminaarin että turbulentin virtauksen painehäviön laskentaan. Kaava voidaan myös kirjoittaa tutummin paine-eron  $\Delta p$  avulla

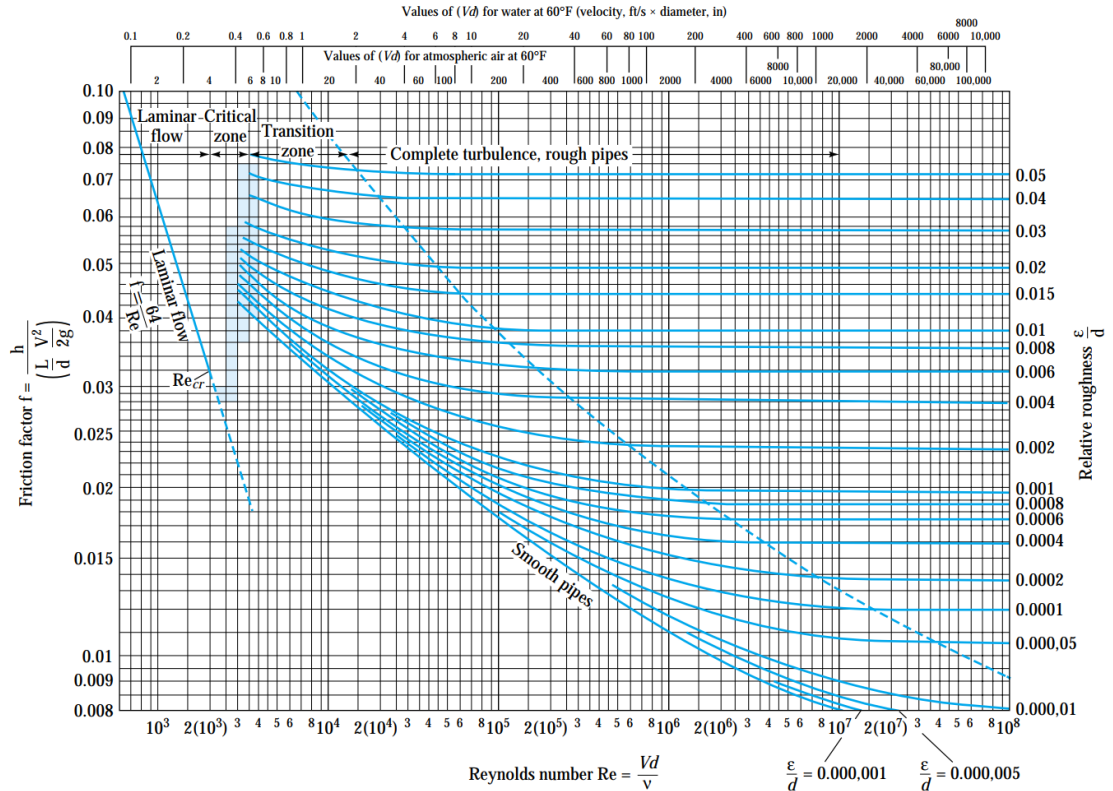
$$\Delta p = \rho * f_D * \frac{L}{d} * \frac{U^2}{2} \quad (3.2.4)$$

jossa  $\rho$  tiheys sekä  $g$  putoamiskiihtyvyyden [23].

Kitkakertoimen määrittäminen on yksi painehäviöön vaikuttava osa etenkin turbulentin virtauksen tapauksessa. Kitkakertoimien yhteydessä voi helposti sekaantua, koska käytettäviä kitkakertoimia ovat ainakin Darcy-Weisbachin kitkakerroin  $f_D$  ja Fanningin kitkakerroin  $f_f$ , jonka suuruus on neljäsosa Darcyn kitkakertoimen suuruudesta. Laminaarissa, täysin kehittyneessä virtauksessa Darcyn kitkakertoimen suuruus määritetään Kauranne et al. mukaan yleisimmin yhtälöstä:

$$f_D = \frac{64}{Re}, \quad (3.2.5)$$

jossa  $Re$  on Reynoldsin luku.



**Kuva 3.2 Moodyn käyrästä [23]**

Turbulenttisen, täysin kehittyneen virtauksen tapauksessa kitkakerroin voidaan määrittää kuvassa 3.2 olevan Moodyn käyrästä avulla. Turbulenttisen virtauksen kitkakertoimelle on useita kokeelliseen tutkimukseen perustuvia kaavoja, joista yksi on C.F. Colebrookin mukaan nimetty:

$$\frac{1}{\sqrt{f_D}} = -2,0 \log \left( \frac{\epsilon}{3,7d} + \frac{2,51}{Re\sqrt{f_D}} \right), \quad (3.2.6)$$

jossa  $\epsilon$  putken pinnan karheus. Moodyn käyrästä pohjautuu Colebrookin kaavaan (3.2.6), jonka hän johti sileän ja karhean putken korrelaatioista turbulentille virtaukselle. Korrelaation (3.2.6) avulla voidaan määrittää iteratiivisesti Darcyn kitkakerroin  $f_D$  tutkitavalle putkelle. White et al. mukaan transitoalueella ei Moodyn käyrästä voida luotettavasti määrittää kitkakerrointa, kun Reynoldsin luku on välillä  $2000 < Re < 4000$ . [23]

Tässä työssä teoreettista näkökulmaa edustaa Churchillin korrelaatio, jota painehäviölaskennan tuloksissa on hyödynnetty. Vertailukohtaksi Churchillin korrelaatiolle käytetään Colebrookin mukaan nimettyä korrelaatiota (3.2.6) kitkakertoimen suuruudelle. Kitkakerroin määritetään Churchillin [25] kaavan mukaan

$$f_D = 8 \left[ \left( \frac{8}{Re} \right)^{12} + \frac{1}{(A+B)^{\frac{3}{2}}} \right]^{\frac{1}{12}}, \quad (3.2.7)$$

jossa  $A$  on määritelty seuraavasti:

$$A = \left[ 2,457 \ln \left( \frac{1}{\left( \frac{7}{Re} \right)^{0,9} + \frac{0,27\epsilon}{d}} \right) \right]^{16}, \quad (3.2.8)$$

jossa  $\epsilon$  on putken pinnan karheus. Kaavassa (3.2.7) oleva termi  $B$  määritellään seuraavasti:

$$B = \left( \frac{37530}{Re} \right)^{16} \quad (3.2.9)$$

Kitkakertoimen (3.2.7) määrittämisen jälkeen saadaan painehäviö putkimetriä kohti laskettua Darcy-Weisbachin kaavasta:

$$\frac{\Delta P}{L} = \frac{f_D}{d} * \frac{8 * \rho * Q^2}{\pi^2 * d^4}, \quad (3.2.10)$$

joka on johdettu kaavasta (3.2.4) sijoittamalla kaavasta (3.1.2) ratkaistu virtausnopeus kaavaan (3.2.4). Putken pinta-ala on ratkaistu kaavasta:

$$A = \frac{\pi}{4} d^2, \quad (3.2.11)$$

joka edelleen sijoitettuna kaavaan (3.2.10) yhdessä kaavan (3.1.2) kanssa on muodostanut kyseisen yhtälön.

### 3.3 Kertavastushäviöt

Maalämpökaivokentän putkistoissa on erilaisia kulmia, venttiilejä, t-haaroja, supistuksia ja laajennuksia, joissa muodostuu häviöitä. Suurin osa painehäviöstä tulee yleensä suorilla putkiosuuksilla, mutta kertavastushäviöiden osuus tulee myös huomioida koko järjestelmän painehäviötä tarkastellessa. Kertavastuksen aiheuttama painehäviö määritetään yhtälöstä:

$$\Delta p = \varphi * \frac{\rho * U^2}{2}, \quad (3.3.1)$$

jossa  $\varphi$  on kertavastuserroin. Erilaisille putkiosille ja venttiileille on määritetty kertavastuskertoimia teorian pohjalta, mutta tarkkojen arvojen saamiseksi tulisi tehdä kokeellisia mittauksia juuri käytössä oleville ja tietyn tyyppisille putkiosille. Suurimmat kertavastushäviöt aiheutuvat yleensä venttiileistä, koska niillä pystytään kuristamaan virtausta oleellisesti ja siten saamaan suuriakin painehäviöitä aikaiseksi. Yleensä venttiilivalmistajilta löytyykin omat painehäviökäyrät venttiileilleen, jolloin niiden aiheuttamia kertavastushäviöitä ei tarvitse etsiä yleisistä taulukoista. [21]

Kertavastushäviöt ovat Kauranne et al. [21] mukaan suuntaa antavia, koska erilaisten putkiosien kertoimet riippuvat mm. putken käyrästyskulmasta ja käyrästyssäteestä sekä putken halkaisijan välisestä suhteesta. Alla olevassa Taulukko 1:ssä on esitetty eräitä putkiston osien kertavastuskertoimia.

**Taulukko 1 Kertavastushäviöitä erilaisille putkiosille [21]**

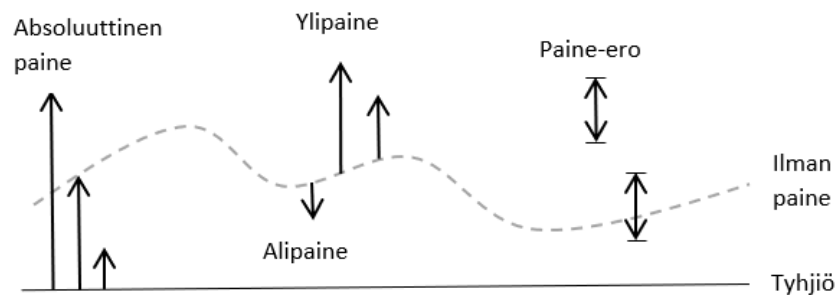
Putkiston osa	$\varphi$
Suora putkiliitos	0,5
Kulmaliitos	1,0
Putkimutka	0,4
T-haara	1,0
Venttiilit	3-6
Putken laajennus	0,5

Venttiilien kertavastuskertoimet voivat kuitenkin vaihdella paljonkin taulukkoarvosta, sillä venttiiliä ruuvatessa kiinni ei taulukkoarvo riitä kuvaamaan esimerkiksi lähes kiinni olevaa venttiiliä.



### 3.4 Paineen mittaustekniikka

Painehäviön mittauksessa mitataan sovelluskohteen alku- ja loppupisteen välistä paine-eroa. Paineen mittaus onkin aina paine-eron mittausta. Paineen vertailuarvo vain muuttuu halutun paineen arvon mukaan. Paineen mittauksen yhteydessä on tarpeellista mainita paineeseen liittyvää termistöä kuten ylipaine, alipaine sekä absoluuttinen paine, jotka on havainnollistettu kuvassa 3.3.



**Kuva 3.3 Paineeseen liittyviä termejä [26]**

Kuvasta 3.3 huomataan, että paine-ero tarkoittaa mitattavan alku- ja loppupisteen välisten paineiden erotusta, eikä sen suuruus ole riippuvainen ilmanpaineeseen verrattuna. Yli- ja alipaine tarkoittavat painetta, jota verrataan ympäröivään ilman paineeseen. Esimerkki ylipaineesta on esimerkiksi paine vaahtosammuttimessa tai kaasupullossa. Toisaalta taas absoluuttinen paine on ilman paineen ja ylipaineen tai alipaineen summa. Huomioitavaa kuitenkin on se, että alipaine on negatiivista ylipainetta, jolloin se tulee vähentää ilman paineesta absoluuttista painetta laskiessa.

Paineen perusyhtälö on hyvin yksinkertainen:

$$p = \frac{F}{A}, \quad (3.4.1)$$

jossa  $F$  on voima ja  $A$  pinta-ala, johon voima kohdistuu [26]. Paineen yksikkö SI-järjestelmässä on Blaise Pascalin mukaan nimetty Pascal (Pa).

Saxholm et. al [27] mukaan paineen mittaus on yksi eniten mitatuista prosessisuureista teollisuudessa ja se on tavalliselle kansalaisellekin tuttu muun muassa verenpaineen ja rengaspaineiden mittausten osalta. Ihmisen verisuonisto kuvaakin erittäin hyvin järjestelmää, jonka kuntoa voidaan seurata mittaamalla verenpainetta. Yleensä erityisesti korkean verenpaineen vallitessa pyritään tutkimaan syytä, mistä se johtuu, koska sitä ei

yleisesti pidetä normaalina. Prosessiteollisuuden järjestelmissä seurataan painetta vastaavasti paineantureiden- ja mittareiden avulla ja tutkitaan, mistä tavallista korkeampi tai matalampi paine johtuu. Tavanomaista korkeampi paine voi johtua esimerkiksi tukokista järjestelmässä, kun taas normaalia alhaisempi paine voi kertoa järjestelmän vuotoista. Järjestelmän jatkuvalla paineen seurannalla pystytään seuraamaan järjestelmän tilaa ja toimintaa sekä tarvittaessa puuttumaan ongelma-kohtiin nopeasti. Ilman jatkuvaa seuranta- toimivissa järjestelmissä ilmeneviä vikoja voidaan erillisillä painemittauksilla etsiä ja todentaa sekä sitä kautta poissulkea mahdollisia ongelman aiheuttajia.

Painetta voidaan mitata muutamalla erityyppiseen tekniikkaan perustuvalla laitteella. Yksi perinteinen paineen mittaustilaite on nestepatsasmanometri. Saxholm et al. mukaan nestepatsasmanometrin käyttöalue kattaa paineen arvot aina muutamasta pascalista noin 1 megapascaliiin. Nestepatsasmanometrin mittaama paine-ero kaavassa (3.4.2) on:

$$p = (\rho_m - \rho_{ilma}) * g_l * h_n , \quad (3.4.2)$$

jossa  $\rho_m$  on manometrin täyttönesteen tiheys,  $\rho_{ilma}$  ympäröivän ilman tiheys,  $g_l$  paikallinen putoamiskiihtyvyy- ja  $h_n$  nestepintojen välinen pystysuora etäisyys. Nestepatsasmanometrin painemittaukseen voi käyttää myös painevaakaa, jonka käyttöalue ulottuu n. 1 kPa:sta yli 10000 bariin. Painevaa'an sovellutus perustuu suoraan paineen laskentakaavaan, jossa voiman tilalla on massan aiheuttama paino:

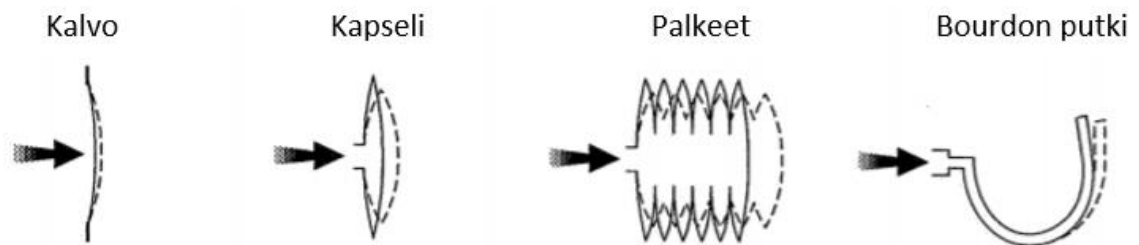
$$p = \frac{m * g}{A_v} , \quad (3.4.3)$$

jossa  $m$  on painevaa'alla oleva massa,  $g$  putoamiskiihtyvyy- ja  $A_v$  painevaa'an tehollinen ala. Ilman nosteen, lämpötilariippuvuuden, paineen ja öljyn pintajännityksen ottaminen huomioon tekee kuitenkin yhtälöstä huomattavasti monimutkaisemman. Painevaaka toimii siten, että vaa'an tasapainotilanteessa mäntä-sylinteriyhdistelmään kohdistuva paine on sama kuin punnusten ja männän painosta aiheutuvat voimat. Mittausta suorittaessa mäntä pyörii sylinterissä kitkan minimoimiseksi. [27]

Paineenmittauslaitteista erilaista toimintaperiaatetta edustavat mekaaniseen muodonmuutokseen perustuvat mittarit. Mekaaniseen muodonmuutokseen perustuvassa laitteessa on tuntopää, joka liikkuu, kun siihen kohdistuu paine. Erityisesti mekaaniseen muodonmuutokseen perustuviin mittauslaitteisiin liittyy hystereesi, joka kuvaa mittaustu-

loksen virheen vaihtelua paineen mittauksen nousu- ja laskusuunnassa. Elastinen muodonmuutos mittauslaitteen tuntopäässä aiheuttaa sen, että mittaustuloksen virhe ei ole välttämättä sama painemittauksen nousu- ja laskusuunnassa. Tämä tulee huomioida mittauksia tehdessä ja epävarmuuden laskennassa. Mittauslaitteen kalibrointitodistuksesta voi löytää nousevan ja laskevan suunnan virheiden keskiarvon sekä niihin sisältyvän epävarmuuden, mutta kaikissa mittalaitteissa siitä ei välttämättä ole mainintaa.

Mittauslaitteen toiminta edellyttää sitä, että ollaan oikealla painealueella, jolloin mittauslaitteen tuntopää kykenee palautumaan muodonmuutoksesta jälleen alkutilaansa. On kuitenkin huomattava, että muodonmuutos tulee olla niin suuri, että tuntopää kykenee havainnoimaan paineen aiheuttaman muutoksen.



**Kuva 3.4 Erilaisia mekaanisen muodonmuutoksen tekniikoita [26]**

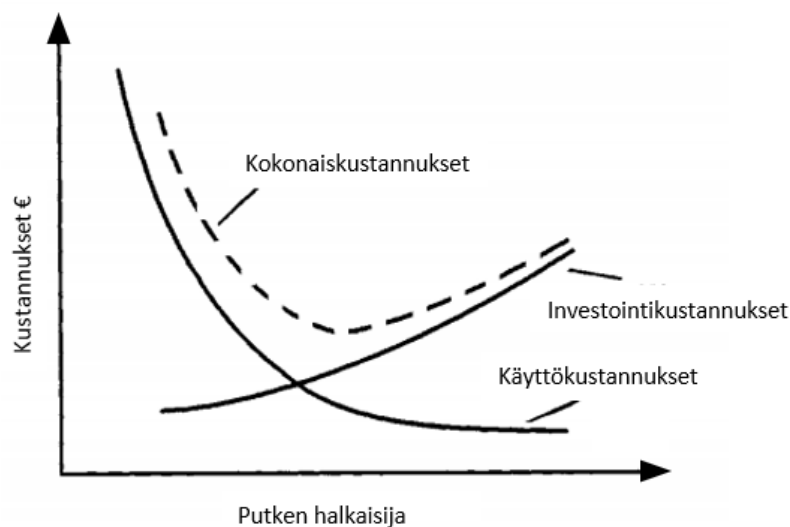
Kuvassa 3.4 on esitelty erilaisia tuntopäitä, joita on mekaaniseen muodonmuutokseen perustuvissa mittareissa. Mekaaniseen muodonmuutokseen perustuvista tuntopäistä voidaan saada dataa eri tavoilla. Dataa voidaan saada tuntopäistä mm. perinteisellä analogisella painemittarilla, jossa toimintaperiaatteena voi olla joko taipuva Bourdon putki tai venyvä kalvo. Edellä mainittujen lisäksi dataa voidaan saada sähköisenä esimerkiksi kapasitanssin tai värähtelyn vaihtelun pohjalta, joita muodonmuutokset mittarin tuntopäässä aiheuttaa. [26]

Mittalaitteiden näyttämässä esiintyy virhettä, joita pyritään kartoittamaan kalibroinnilla. Mittalaitteen virhe voidaan Saxholm et al. mukaan todentaa mittalaitteen kalibroinnilla, jossa mittalaitteen näyttämiä arvoja verrataan mittanormaalien arvoihin. Kalibroinnin avulla saadaan selville mittalaitteen toimintakunto sekä näyttämän virhe, joka voidaan ottaa mittalaitteella saaduissa tuloksissa huomioon. Tarvittaessa mittalaitetta voidaan myös virittää, jolloin itse mittalaitteeseen tehdään muutoksia joko fyysisesti tai ohjelmallisesti, jotta mittalaite saadaan näyttämään tuloksia kyseisen mittalaitteen sallittujen virherajojen sisällä. Mittalaitteen virittämistarpeeseen vaikuttaa oleellisesti mittalaitteen virheen suuruus, joka on mittarin näyttämän paineen ja mittanormaalien paineen erotus.

Paineen mittauksessa tulee huomioida useita asioita, jotta mittaustulokset olisivat mahdollisimman uskottavia. Mittauksissa huomioitavia asioita ovat mm. mittausepävarmuus sekä mittauksen epävarmuus. Mittausepävarmuus on parametri, joka kuvaa mittaustulosten odotettua vaihtelua [26]. Saxholm et al. mukaan mittalaitteen kalibrointitodistuksessa mainittu epävarmuus ei välttämättä ole sama asia kuin tehtävän mittauksen epävarmuus. Tämä johtuu siitä, että itse mittausta tehdessä eri tekijät voivat lisätä mittauksen epävarmuutta. Painemittarin käytössä ei yksistään riitä se, että mittari on asianmukaisesti kalibroitu, jotta oikeaan mittaustulokseen päädytään. Paineen mittauksessa virhettä voi muodostua Saxholm et al. mukaan muun muassa lämpötilan poikkeavuudesta suhteessa kalibrointilämpötilaan, putkien tukkeumista, virtauksesta johtuvasta paineen muutoksesta, tärinästä tai paineiskuista, hydrostaattisesta paineesta, vääränlaisesta mittalaitteesta, väärästä vertailupaineesta ja mittaajasta. [27]

### 3.5 Painehäviön kustannusvaikutukset

Kiertovesipumppu kierrättää keruunestettä maalämpöjärjestelmän lämmönkeruupiirissä. Keruupiiristä aiheutuu painehäviötä, kuten jo edellä todettiin. Painehäviöllä on myös oma vaikutuksensa pumppauskustannuksiin, sillä yhdessä virtaaman ja pumppaushyötysuhteen kanssa ne vaikuttavat pumppaustehon suuruuteen kaavan (2.5.3) mukaan. Painehäviön suuruuteen ja samalla myös pumppauskustannuksiin vaikuttaa yhtenä tekijänä putkilinjojen halkaisijat. Pumppauskustannukset jakautuvat putkilinjojen investointikustannuksiin ja käytön aikaisiin energiakustannuksiin. Investointikustannusten sekä putkilinjojen halkaisijoiden kasvaessa käytön aikaiset kustannukset taas päinvastoin pienevät alhaisemman painehäviön vuoksi. [28]



**Kuva 3.5 Kustannusten jakautuminen putkihankinnassa [28]**

Kuvasta 3.5 huomataan, että investointikustannus dominoi suuren halkaisijan omaavissa putkissa, kun taas käyttökustannukset ovat suuremmat pienillä putkihalkaisijoilla. Lähellä käyrien leikkauspistettä kustannus on matalimmillaan ja toisaalta ääripäissä putkikokoa investointikustannukset tai käyttökustannukset ovat suurimmillaan. Pumppauskustannukset koostuvat eri osista järjestelmän elinkaaren aikana. Painehäviön aiheuttama vuotuinen kustannus on yksi osa pumpun käytön aikaisista kustannuksista, joka määritellään seuraavasti:

$$K_E = K_e * E, \quad (3.5.1)$$

jossa  $K_e$  on energian hinta ja  $E$  vuotuinen energian kulutus [28]. Energian hintana voidaan maalämpöjärjestelmän yhteydessä pitää vallitsevaa sähkön hintaa. Toinen vuotuisen kustannukseen vaikuttava osa eli energian kulutus koostuu kaavan (3.5.2) mukaan seuraavista:

$$E = P_t * t, \quad (3.5.2)$$

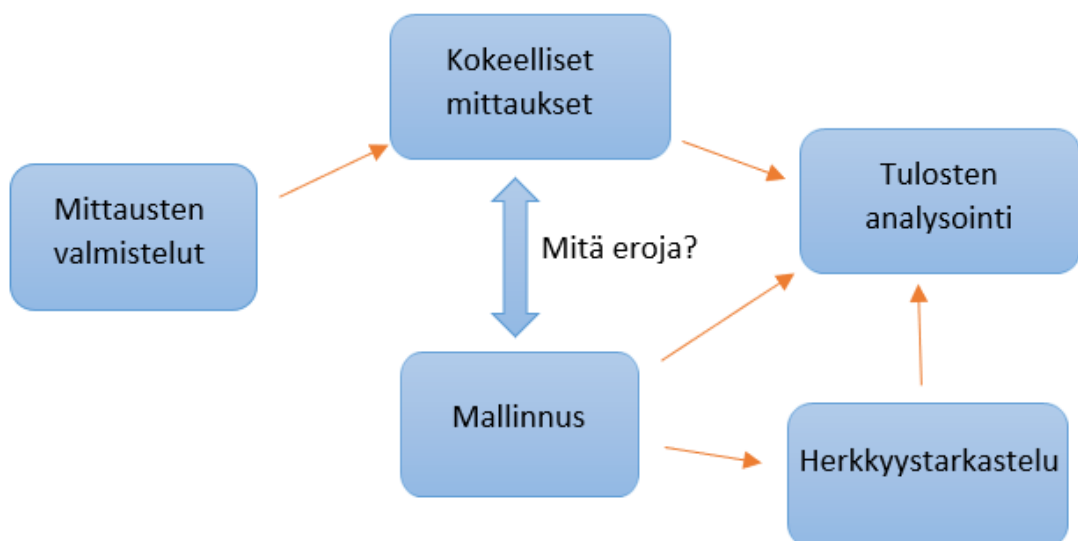
jossa  $P_t$  on todellinen pumppausteho ja  $t$  aika. Pumpun käyttöajalla- ja tavalla onkin suuri merkitys pumppaukseen käytetyn energian osalta. Jos kiertovesipumppua käytetään optimaalisen käyttöalueen ulkopuolella, hyötysuhde on huonompi ja energiakustannukset suhteessa pumppaustehoon kasvavat. Vuotuisen energian kulutukseen liittyvä todellinen pumppausteho  $P_t$  määritellään luvussa 2.5 pumpulle kaavan (2.5.3) mukaan.

## 4. AINEISTO JA MENETELMÄT

### 4.1 Tutkimuksen tavoite ja rakenne

Tutkimuksen tarkoituksena on tehdä kokeellisia painehäviömittauksia erilaisten keruuputkien välillä ja tutkia laskennallisen painehäviön ja kokeellisissa mittauksissa mitatun painehäviön mahdollisia eroavaisuuksia. On mielenkiintoista nähdä sileän ja rihlatun keruuputken erot ja siten rihlojen vaikutus painehäviöön ja olemassa oleviin korrelaatioihin. Keruuputkien painehäviötä aiemmin on tutkinut Acuna et al. [6], joka mittasi painehäviötä 40 mm:n halkaisijan omaavassa keruuputkissa. Hän sai yllätyksekseen tuloksia, joissa rihlatulle putkelle saatiin pienempi painehäviö kuin sileälle putkelle. Osittain tästä syystä on kiinnostava nähdä, toistuuko sama tulos uudelleen.

Painehäviömittaukset on tarkoitus tehdä yhdessä maalämpökaivossa, johon eri keruuputkia vaihdetaan. Testattavia keruuputkia ovat 40 mm x 2,4 mm sileä keruuputki, 40 mm x 2,4 mm rihlattu keruuputki sekä 45 mm x 2,6 mm rihlattu keruuputki. Jokaiselle keruuputkelle tehdään painehäviömittaukset. Painehäviömittausten jälkeen tuloksia verrataan laskennallisiin tuloksiin ja katsotaan, löytyykö tuloksista eroavaisuuksia. Mittausten ja tulosten analysoinnin jälkeen tehdään johtopäätökset ja pohditaan, onko tarpeen tehdä lisää mittauksia painehäviölaskennan validointia varten vai riittävätkö nämä mittaukset antamaan tarpeeksi tietoa. Erityisesti siinä tapauksessa tulee mittauksia tarkastella uudelleen, jos ilmenee merkittäviä poikkeamia suhteessa laskennallisiin arvoihin, koska eroavaisuuksien ei pitäisi olla kovin merkittäviä.



**Kuva 4.1 Tutkimuksen vaiheet**

Tutkimus koostuu kuvan 4.1 mukaan mittausten suorittamisesta mittauskohteessa sekä painehäviön teoreettisesta mallinnuksesta keruuputkissa. Mallinnuksen yhteydessä tehdään herkkyytarkastelu, jossa tarkastellaan lämmönsiirtonesteen lämpötilan ja vesietanoli liuoksen massaosuuksien muutosten aiheuttamia vaikutuksia painehäviön suuruuteen.

## 4.2 Kuvaus kohteesta

Mittauspaikka sijaitsee kohdeyrityksen pääkonttorin pihalla, jonne on porattu maalämpökaivo erilaisia testimittauksia varten. Maalämpökaivo on porattu pystysuoraan ja sen syvyys on 220 metriä. Maalämpökaivoa ei ole käytetty lämmityskäyttöön, vaan satunnaiseen testikäyttöön. Painehäviömittausten aikana maalämpökaivoon ei siirretä, eikä sieltä oteta lämpöä, joten olosuhteet maalämpökaivossa ovat siltä osin vakiot. Maalämpökaivon keskimääräinen lämpötila on kuitenkin mitattu jokaisena mittauspäivänä, jolloin muutokset voidaan ottaa huomioon mittaustuloksissa.

Maalämpökaivoa käytetään mittauksissa niin, että kukin keruuputkista asennetaan vuorollaan kaivoon, jonka jälkeen mittaukset suoritetaan. Mittauksen jälkeen keruuputki nostetaan maalämpökaivosta pois, jotta seuraava keruuputki voidaan asentaa maalämpökaivoon seuraavaa mittausta varten. Mittausten ajankohta on osittain työn aloitusajan kohdan takia syksyllä sekä talvea vasten, joten olosuhteet ulkona voivat olla mittausten kannalta haastavat. Olosuhteita vakioidaan kohteessa siten, että maalämpökaivon päälle lasketaan työmaakontti, jonka sisällä mittaukset suoritetaan. Työmaakontti saadaan keruuputken vaihtoa varten nostettua trukilla ylös ja siirrettyä toiseen paikkaan, jotta vaihto saadaan helposti tehtyä. Vaihdon jälkeen kontti siirretään jälleen maalämpökaivon päälle, jolloin mittauksia voidaan taas jatkaa ulkona olevista sääolosuhteista välittämättä.



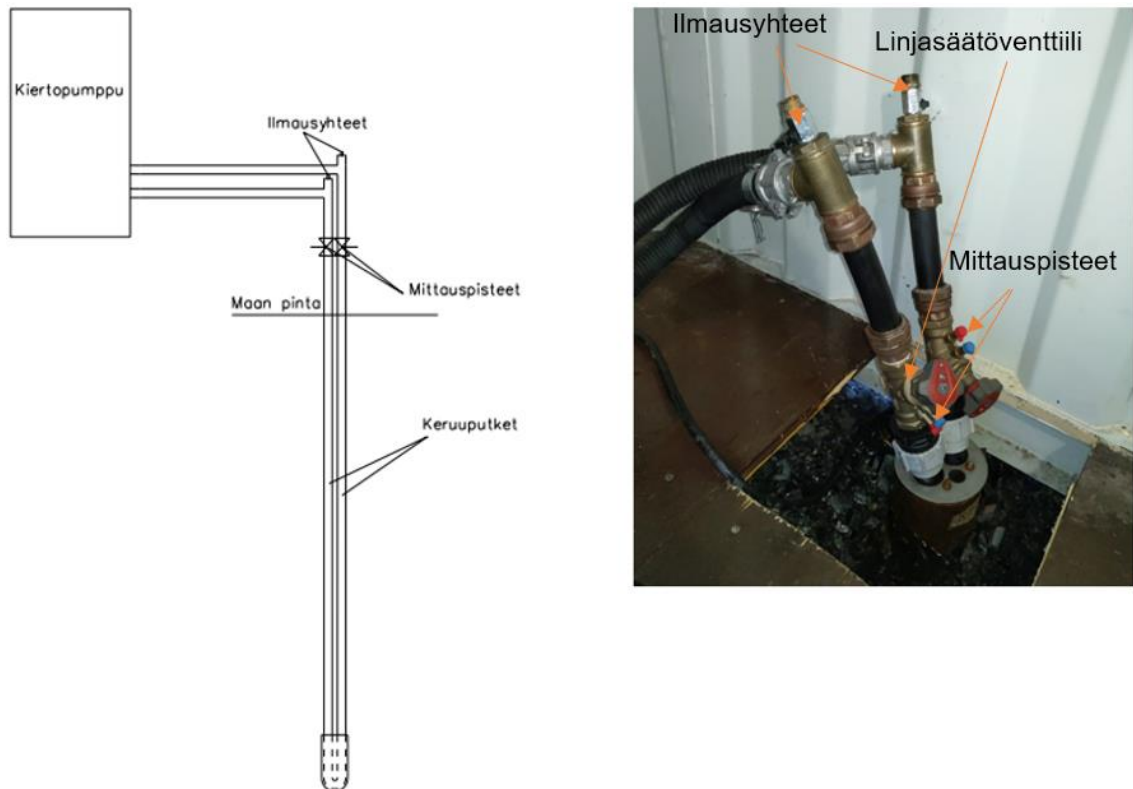
**Kuva 4.2 Mittausten suorituspaikka**

Kuvassa 4.2 on mittausten suorituspaikka, joka on pieni työmaakontti. Kontissa on lämmityspuhallin, jotta lämpötila saadaan kontin sisällä inhimilliseksi mittausten aikana. Kontin oikeassa nurkassa on 10 litran painesäiliö, jolla kiertopumppu saadaan täytettyä vesietanoli liuksella. Painesäiliöllä saadaan myös korotettua painetta järjestelmässä, jotta ilmaus saadaan tehtyä järjestelmään. Iso metallinen laatikko sisältää kiertopumpun, jolla vesietanoli liuosta kierrätetään maalämpökaivossa. Kiertopumpussa olevien lämpötilantureiden avulla voidaan tarvittaessa seurata maalämpökaivossa kiertävän liuoksen lämpötilaa.



### 4.3 Mittausjärjestely

Mittausten suorituspaikkana toimivassa työmaakontissa on tehty reikä kontin pohjaan, josta keruuputket on tuotu konttiin sisälle. Vesietanoli liuosta kierrättää maalämpökai-  
vossa kiertopumppu. Ennen kiertopumppua on sekä meno- että paluulinjoissa ilmaus-  
yhteet ilmausta varten. Kiertopumpussa on myös omat ilmausyhteet, jotta myös pum-  
pun sisäisten putkilinjojen korkeimmista kohdista saadaan ilmaus suoritettua.



**Kuva 4.3 Mittausjärjestelmä**

Kuvan 4.3 vasemmalla puolella on yksinkertaistettu kuva koko mittausjärjestelmästä. Oikealla puolella sen sijaan on kuva todellisesta mittausjärjestelmästä, jota hyödyntäen mittaukset suoritettiin.

Paine-eron sekä virtaaman mittauksessa käytetään Ta Scope mittalaitetta. Ta Scopea käytetään yleisesti lämmitys- ja jäähdytysverkostojen virtaamien, paine-erojen sekä lämpötilojen mittaamiseen [29].



#### Mitta-alue:

Kokonaispaine:

TA-SCOPE maks. 1 600 kPa

Paine-ero:

TA-SCOPE 0 - 500 kPa

Virtausnäytön vaatima suositeltu paine-ero:

TA-SCOPE 1 - 500 kPa

#### Mittavirhe:

Paine:

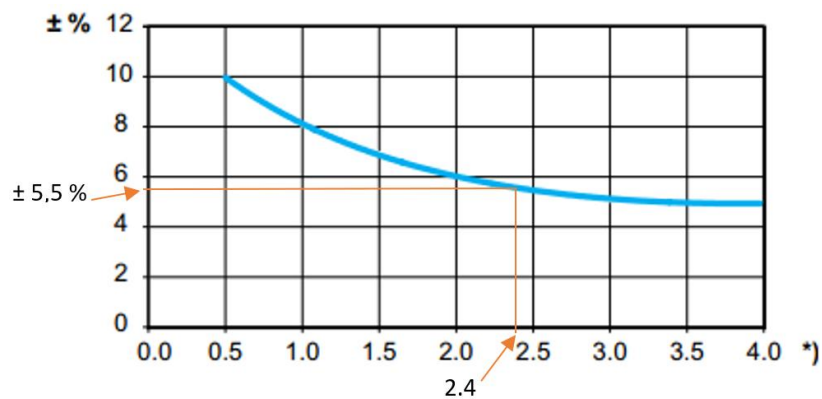
TA-SCOPE 0,1 kPa tai 1 % näyttöarvosta sen mukaan, kumpi on suurempi.

Virtaama: Kuten paine, lisätynä venttiilin poikkeamalla.

**Kuva 4.4 Ta Scope näyttöyksikkö, DpS Visio paine-eroanturi sekä teknisiä tietoja [29]**

Kuvassa 4.4 on mittauksissa käytetty Ta Scope mittalaite, johon sisältyy näyttöyksikkö ja erillinen paine-eroanturi. Paine-eroanturi lähettää reaaliaikaista mittausdataa näyttöyksikölle, josta mittaustuloksen voi lukea. Paine-eroanturista voi myös lukea painehäviön arvot näyttöyksikön tapaan.

Linjasäätöventtiilin esisäätöarvona on käytetty tämän työn mittauksissa arvoa 2.4. Mittauksista tehdään mahdollisimman vertailukelpoisia siten, että esisäätökierrosten lukumäärä pidetään kaikkien mittausten aikana vakiona, jotta esisäätökierrosten säädöstä ei aiheutuisi muutoksia mittaustuloksiin. Linjasäätöventtiilin esisäätökierrokset kertovat, kuinka monta kierrosta venttiili on auki.

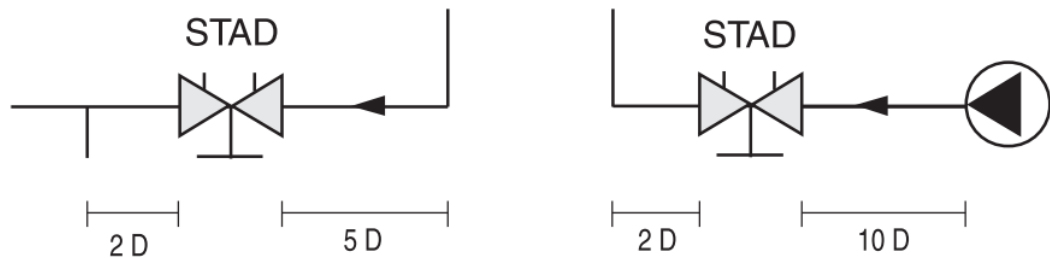


\*) Esisäätökierrosten lukumäärä.

**Kuva 4.5 Virtausmittauksen tarkkuus venttiilin esisäätökierrosten funktiona [30]**

Kuvan 4.5 mukaan venttiin esisäätökierrosten perusteella virtaaman mittavirheeksi tulee  $n. \pm 5,5 \%$ , johon lisätään paineen mittauksen virhe  $1 \%$ , joten kokonaismittavirheeksi saadaan  $n. \pm 6,5 \%$ . Paineen mittauksen virhe lisätään virtaaman mittausvirheeseen virtausmittausmenetelmän takia, joka perustuu paine-eron mittaukseen venttiin yli.

Paine-eron ja virtaaman mittauksessa hyödynnetään stad- linjasäätöventtiileitä, joiden mittausyhteistä mittaukset tehdään. Jotta mittaustarkkuus saadaan mahdollisimman hyväksi, noudatettiin valmistajan ohjeita linjasäätöventtiin asennuksesta. Mittausjärjestyksessä onkin huomioitu suora putkiosuus ennen linjasäätöventtiiliä menolinjassa ja paluulinjassa linjasäätöventtiin jälkeen. Suora putkiosuus mitoitetaan kuvan 4.6 ohjeistuksen mukaan siten, että suoraa putkiosuutta on kuvan mukaisesti sekä ennen linjasäätöventtiiliä että paluulinjan linjasäätöventtiin jälkeen.



**Kuva 4.6 Stad linjasäätöventtiin asennussuositus [30]**

Linjasäätöventtien asennus on suoritettu kuvassa 4.6 olevan vasemmanpuoleisen järjestelyn mukaan. Pumpun jälkeinen putkietäisyys täyttyy kiertopumpun sisäisten linjojen sekä kaivon päästä lähtevien putkien pituuden vuoksi hyvin.

#### 4.4 Mittausten suorittaminen

Ennen mittausten suorittamista maalämpökaivoon laitettiin ensimmäinen testattava keruuputki. Ennen keruuputken asennusta maalämpökaivosta tuli nostaa vanha testikäytössä ollut keruuputki ylös. Keruuputken nosto ei kuitenkaan meinannut onnistua ja se uhkasikin koko mittausten onnistumista kyseisessä maalämpökaivossa. Keruuputki kuitenkin saatiin ylös maalämpökaivosta kovan työn jälkeen. Maalämpökaivo tulikin puhdistaa käyttämällä poravaunua maalämpökaivon päällä ja puhdistamalla maalämpökaivo mahdollisten tukosten varalta. Muiden keruuputkien kohdalla ei vastaavaa ongelmaa havaittu, joten keruuputkien nostot ja laskut sujuivat yhtä nostoa lukuun ottamatta hyvin.

Ensimmäinen mitattava keruuputki oli 40 mm:n rihlattu keruuputki. Keruuputki täytettiin vesietanoli liuoksella ennen laskemista maalämpökaivoon. Koko mittausjärjestelmän

täytössä käytetystä vesietanoli liuoksesta otettiin näyte, jotta saatiin tarkasti etanolin ja veden massaosuudet käytetyssä liuoksessa. Keruuputken täytön jälkeen keruuputken päihin kytkettiin linjasäätöventtiilit mittauksia varten. Tämän jälkeen sekä keruuputken meno- että paluupuolet yhdistettiin kiertopumppuun maalämpökaivon pään ja kiertopumpun välisillä putkilla.

Keruuputkien kytkentöjen jälkeen oli vuorossa kiertopumpun täyttö ja ilmaus. Täytön ja ilmauksen suorittamiseksi kiertopumpun täyttöletkuun kytkettiin painesäiliö. Painesäiliön avulla järjestelmä täytettiin siten, että paine nostettiin n. 1,5 barin tasolle. Paineen korotuksen jälkeen tutkittiin, pitävätkö maalämpökaivon päässä kaikki liitokset ja ettei minikäänlaista vuotoa näy. Tämän jälkeen ilmausyhteet avattiin kiertopumpusta sekä maalämpökaivon yläpäästä. Ilman poistuessa järjestelmästä paine laski, jolloin painetta edelleen korotettiin painesäiliöllä tarvittaessa useammankin kerran, jotta ilma saatiin mahdollisimman hyvin pois. Kun ilmaa ei enää tullut kiertopumpusta tai maalämpökaivon päästä, käynnistettiin kiertopumppu. Ennen jokaista mittausta kiertopumppua pidettiin päällä n. 2 tuntia, jotta maalämpökaivossa kiertävän keruunesteen meno- ja paluulämpötila tasoittuisivat. Kiertopumpun lämpötila-antureiden avulla keruuputkien meno- ja paluunesteen lämpötiloja pystyttiin helposti seuraamaan. Lämpötila-eron tasoituttua todettiin, että nestettä on kierrätetty riittävän kauan maalämpökaivossa. Nesteen kierrätyksen jälkeen kokeiltiin vielä, onko ilmausyhteisiin mahdollisesti kerääntynyt ilmaa. Jos ilmaa ei enää havaittu voitiin mittaukset aloittaa.

Mittaukset suoritettiin siten, että kiertopumppua ajettiin erilaisilla kuormitusasteilla. Kiertopumppua pystyi käyttämään välillä 0-100 %:n. Toinen tapa virtauksen säätämiseen olisi ollut kuristaa virtausta linjasäätöventtiilillä, mutta tällöin erityisesti virtaaman mittamiseen olisi tullut yksi ylimääräinen muuttuja lisää venttiilin esisäätöarvon muuttuessa. Mittaukset etenivät siten, että kiertopumppu säädettiin mittauksen aluksi 50 %:n teholle, josta edettiin 5 %:n portailta aina 100 %:n asti. Tämän jälkeen mittausneulat kytkettiin keruuputken paluulinjan linjasäätöventtiiliin. Mittausneulojen kytkennän jälkeen virtaaman tasoittumista seurattiin mittauslaitteen näytöltä. Virtaama tasoittui mittauslaitteen lukeman perusteella n. 30-60 sekunnin aikana kiertopumpun tehomuutoksen jälkeen. Virtaaman arvoja mitatessa odotettiin kuitenkin varmuuden vuoksi n. 5 minuuttia ennen kuin virtaaman arvo otettiin ylös, jotta virtaamassa ei esiintyisi lukemaa kirjatessa heilailua.

Virtaaman arvon luennan jälkeen mittausneulat kytkettiin paine-eron mittauksia varten putkilinjan yli siten, että toinen mittausneula kytkettiin keruuputken menolinjaan ja toinen

paluulinjaan. Tämän jälkeen paine-eron arvo luettiin mittauslaitteen näytöltä. Mittauksissa sama kaava toistui keruupumpun tehosäädön, virtaaman mittauksen ja paineen mittauksen kohdalla keruuputki ja mittaus kerrallaan. Keruuputkea vaihdettaessa tuli jälleen tehdä ilmaustoimenpiteet ja jos mittauksia tehtiin eri päivinä, keruunestettä täytyi kierrättää aina ennen mittausta, jotta lämpötila keruuputkien välillä tasoittui.

## 4.5 Teoreettinen mallinnus

Painehäviön suuruuden määrittämiseen käytetään yleensä laskennallisia korrelaatioita. Tässä työssä on painehäviön laskennassa käytetty korrelaatioita, jotka on esitelty korrelaatioissa (3.2.7) - (3.2.10). Vaihtoehtoinen laskenta on suoritettu siten, että painehäviö on laskettu samaa korrelaatiota (3.2.10) käyttäen, mutta laskemalla Colebrookin kitkakerroimen (3.2.6) avulla painehäviön suuruus. Painehäviön laskennallisissa tuloksissa ei ole huomioitu keruuputken pohjalla olevan u-kappaleesta aiheutuvaa painehäviötä, joten siltä osin laskennallinen painehäviö on todellista mittaustulosta pienempi.

**Taulukko 2 Alkuarvot laskennallisen painehäviön määrittämiseen**

Lämpötilan vaihteluväli	-5 – (+ 7)	°C
Etanolipitoisuuden vaihteluväli	27 - 33	p-%
Maalämpökaivon syvyys	220	m
40 mm keruuputken sisähalkaisija	35,29	mm
45 mm keruuputken sisähalkaisija	39,71	mm
Käytetty putken pinnan karheus	0,002	mm
Keruuputken kokonaispituus	440	m

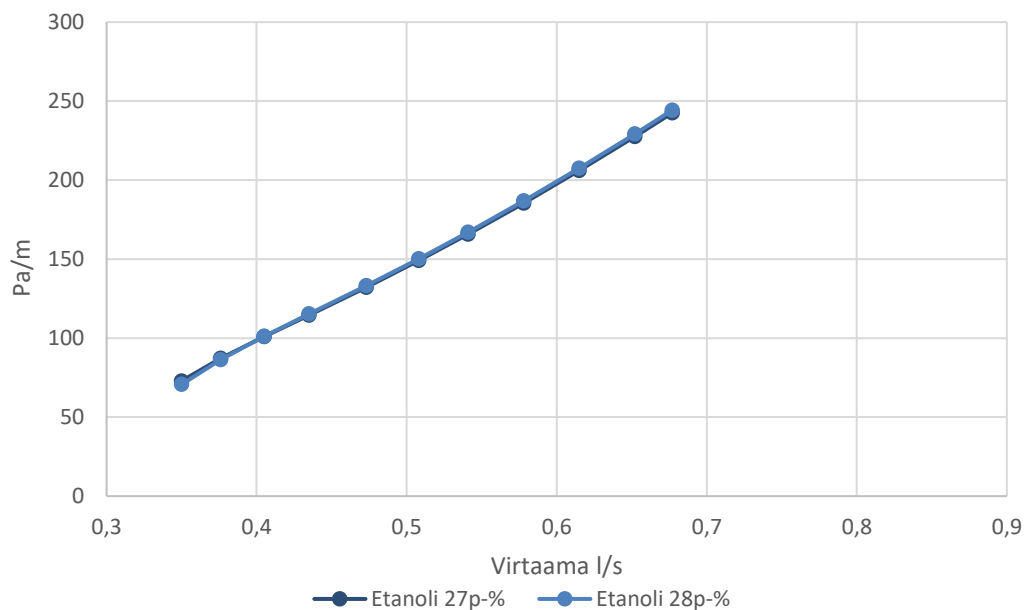
Taulukko 2:ssa on alkuarvot laskennallisen painehäviön määrittämiseen. Huomioitavaa painehäviölaskennassa on se, että puhuttaessa maalämpökaivon syvyydestä ei tarkoiteta samaa dimensiota kuin painehäviölaskennassa käytettyä keruuputken pituutta. Maalämpökaivon syvyys tulee siis kertoa kahdella, jotta saadaan oikea pituus painehäviölaskentaa varten.

## 4.6 Herkkyystarkastelut

Tässä diplomityössä mitattiin keruuputkille painehäviöt maalämpökaivon häiriöttömässä lämpötilassa. Häiriötön lämpötila maalämpökaivossa on ollut mittausten aikana 6,8-7,0 °C eli lämpötilavaihtelu on ollut hyvin pientä. Herkkyystarkastelussa on tarkoitus tutkia, millainen vaikutus keruuputkessa kiertävän lämmönsiirtonesteen lämpötilalla on painehäviön suuruuteen. Toisaalta taas vesietanoli liuosta käytettäessä on hyvä tietää, mi-

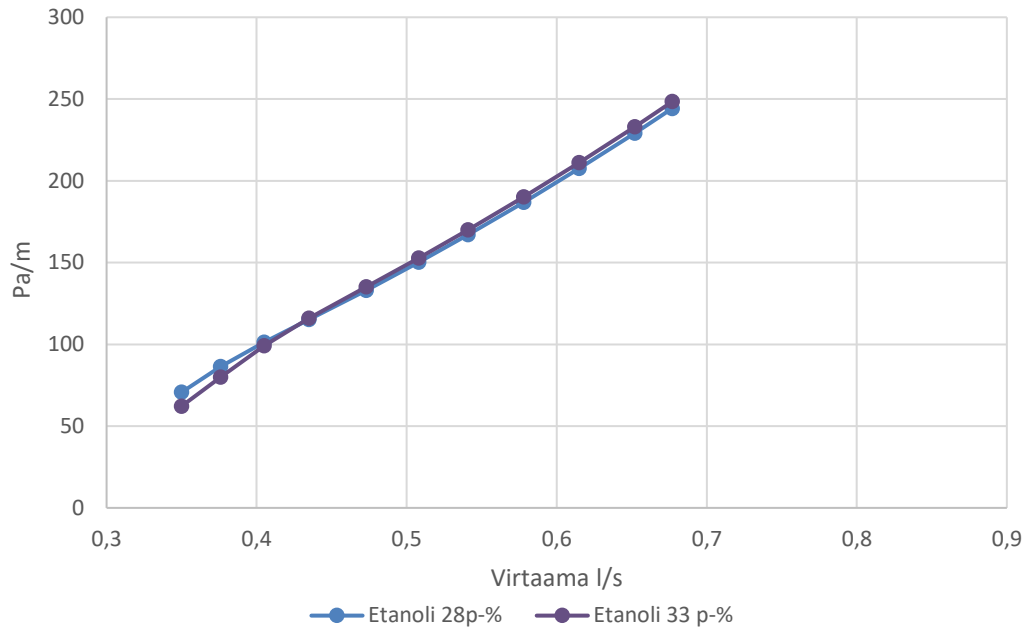
ten etanolin määrän vaihtelu keruunesteessä vaikuttaa painehäviöön. Herkkyystarkastelussa tutkitaan myös, miten painehäviö vaikuttaa pumppauskustannuksiin kahta eri keruuputkikokoa verrattaessa toisiinsa. Mittauksien aikana ei ollut aikaa tutkia painehäviöitä eri lämpötiloissa, joten tarkastelu tehdään laskennallisesti painehäviökorrelaation avulla.

Painehäviömittauksia tehdessä keruunesteen etanolipitoisuus mitattiin järjestelmän täytön jälkeen, kuitenkin niin, että keruunestettä kierrätettiin ensin useita tunteja keruupii-rissä. Mittauksissa käytetyn keruunesteen etanolipitoisuus vaihteli erinäisien syiden takia 27– 33,0 painoprosentin välillä. Keruuputkista 40 mm:n rihlatun putken mittauksissa etanolipitoisuus oli 33 p-%, kun taas sekä 40 mm:n sileän ja 45 mm:n rihlatun keruuputken mittauksissa etanolipitoisuus oli 27 p-%. Maalämpöjärjestelmissä käytetään yhtenä yleisenä pitoisuutena 28 p-%:n etanolivesi liuosta. Tässä herkkyystarkastelussa käytetäänkin 28 p-%:n liuosta referenssipisteenä, kun verrataan mittauksissa käytettyjä etanolipitoisuuksia.



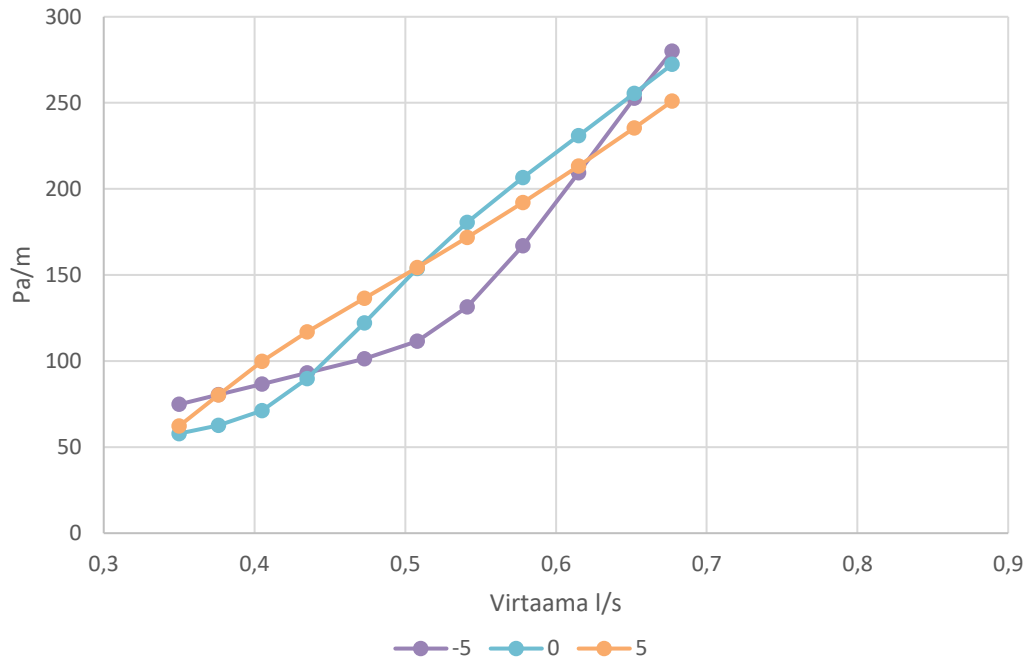
**Kuva 4.7 Painehäviö virtaaman funktiona etanolipitoisuuden muuttuessa**

Kuvassa 4.7 on vertailtu 27 p-%:n ja 28 p-%:n vesietanoli liuoksen vaikutuksia painehäviöön. Ero vertailtavien liuosten välillä on niin pieni, että sitä on vaikea havaita kuvajasta. Keskimäärin painehäviö oli 27 p-%:n tapauksessa 0,2 % pienempi verrattuna referenssipitoisuuteen.



**Kuva 4.8 Painehäviö virtaaman funktiona etanolipitoisuuden muuttuessa**

Kuvassa 4.8 on vertailtu 28 p-%:n ja 33 p-%:n etanolivesi liuoksia. Kyseisten liuosten välillä tulee jo hieman eroa, kuten kuvaajasta huomataan. Keskimäärin 33 p-%:lla liuoksella laskettu painehäviö on 0,8 % pienempi kuin 28 p-%:lla laskettu painehäviö. Tulokseen vaikuttaa se, että kuvan 4.8 kahden ensimmäisen arvon kohdalla poikkeama on jonkin verran keskimääräistä poikkeamaa suurempi ja päinvastaiseen suuntaan kuin suurin osa muista arvoista. Jos kaksi ensimmäistä alkupään arvoa jätetään keskiarvosta huomioimatta, 33 p-%:n etanolivesi liuoksella laskettu painehäviö on 1,2 % suurempi kuin 28 p-%:n etanolivedellä laskettu, joten tilanne kääntyy päinvastaiseksi.



**Kuva 4.9 Painehäviö virtaaman funktiona lämpötilan muuttuessa**

Kuvasta 4.9 huomataan lämpötilojen vaikutukset painehäviöön erityisesti suorien ja käyrien muotojen perusteella. Kuvaajan käyristä 0 °C:n ja -5 °C:n käyrissä virtaus on aluksi laminaarilla alueella. Virtaaman sekä toisaalta Reynoldsin luvun kasvaessa virtauksen tila lähestyy transiioaluetta ja samaan aikaan painehäviön suuruus alkaa kasvaa ja käyrän muoto jyrkkenee. Käyristä +5 °C:n kohdalla virtaus on alusta asti transiioalueella, jolloin suoran kulmakerroin pysyy aika lailla vakiona koko tutkittavalla alueella.

## 4.7 Painehäviön kustannuslaskenta

Painehäviön kustannusvaikutusta käsiteltiin aikaisemmin työssä luvussa 3.5. Kokonaiskustannukset painehäviön tai toisaalta pumppauksen kohdalla muodostuu putkien investointikustannuksista, pumppauskustannuksesta sekä mahdollisesta piiskapumpun investointikustannuksesta. Painehäviön kustannuslaskenta on tehty siten, että kokonaiskustannus on jo ensimmäisenä vuotena investoinnin ja ensimmäisen vuoden pumppauskustannuksen summa, jolloin pumppauskustannus näkyy heti alusta alkaen. Vuosittainen kustannus tarkoittaaakin kokonaiskustannusta vuoden lopussa.

Erilaisille keruuputkille laskettujen kustannusten erot tulevat itse keruuputken lisäksi myös porattavan maalämpökaivon koosta sekä putkiosista, jotka vaihtuvat keruuputken halkaisijan vaihtuessa. Laskelma on tehty siksi näin, koska ei ole realistista verrata pelkän keruuputken hintaa toiseen, sillä todelliset kustannukset voivat poiketa oleellisesti



keruuputkien hintaerosta, jos on tarve porata esimerkiksi isompi maalämpökaivo. Eri keruuputkien investointikustannukset ovatkin vertailukelpoisia lähinnä toisten keruuputkien kesken. Laskennan tarkoitus ei ole niinkään antaa tarkkoja hintoja, koska oleellisinta ei ole täsmällinen hinta kullekin vaihtoehdolle vaan erilaisten muutosten vaikutus kokonaisuuteen keruuputkien välillä. Piiskapumpun investointikustannus on laskettu muutaman eri kokoluokan kiertovesipumpun hinnan keskiarvona siten, että keskiarvohinnan pohjana olevat hinnat on jaettu aina kyseisen kiertovesipumpun tuottaman tilavuusvirran määrällä. Näin saadaan skaalattua investointi muuttuvan tilavuusvirran suhteen. Luonnollisesti hinta ei päde kaikkiin tapauksiin täydellisesti, mutta toiminee riittävän hyvin tässä laskelmassa. Excel-pohjaisessa kustannuslaskurissa on käytetty taulukoiden 3-6 tietoja lähtötietoina. Painehäviön kustannuslaskennassa on myös oletettu kiertovesipumpun käyvän käyntiaikansa vakioteholla eli mahdollista säädettävyyttä ei ole huomioitu näissä laskelmissa.

**Taulukko 3 Painehäviön kustannuslaskelman lähtötiedot CASE 1**

Maalämpökaivojen lukumäärä	10	kpl
Virtaama/maalämpökaivo	0,65	l/s
Kokonaisvirtaama	6,5	l/s
Maalämpökaivojen syvyys	300	m
Kiertopumpun kokonaishyötysuhde	0,6	-
Huipunkäyttöaika	3500	h
Sähkön hinta	0,14	€/kWh
Piiskapumpun investointikustannus	660	€/l/s)
40 mm keruuputki, keruupiirin $\Delta P$	174	kPa
45 mm keruuputki, keruupiirin $\Delta P$	107	kPa

Taulukko 3:ssa on tiedot kustannuslaskelman CASE 1:sta. Kustannuslaskelmissa käytetyt painehäviön arvot on laskettu kymmenen kaivon maalämpökaivokentälle eli painehäviö ei koostu pelkästään keruuputken painehäviöstä, kuten painehäviömittauksissa.

**Taulukko 4 Painehäviön kustannuslaskelman lähtötiedot CASE 2**

Maalämpökaivojen lukumäärä	10	kpl
Virtaama/maalämpökaivo	0,5	l/s
Kokonaisvirtaama	5	l/s
Maalämpökaivojen syvyys	300	m
Kiertopumpun kokonaishyötysuhde	0,6	-
Huipunkäyttöaika	3500	h
Sähkön hinta	0,14	€/kWh
40 mm keruuputki/keruupiirin $\Delta P$	100	kPa
45 mm keruuputki/keruupiirin $\Delta P$	52	kPa

Taulukko 4:ssä on tiedot kustannuslaskelman CASE 2:sta. CASE 1:n verrattuna CASE 2:ssa on pienennetty yksittäisen maalämpökaivoon menevää virtaamaa ja samalla myös kokonaisvirtaaman suuruus pienenee.

**Taulukko 5 Painehäviön kustannuslaskelman lähtötiedot CASE 3**

Maalämpökaivojen lukumäärä	10	kpl
Virtaama/maalämpökaivo	0,65	l/s
Kokonaisvirtaama	6,5	l/s
Maalämpökaivojen syvyys	300	m
Kiertopumpun kokonaishyötysuhde	0,5	-
Huipunkäyttöaika	3500	h
Sähkön hinta	0,14	€/kWh
Piiskapumpun investointikustannus	660	€/(l/s)
40 mm keruuputki, keruupiirin $\Delta P$	174	kPa
45 mm keruuputki, keruupiirin $\Delta P$	107	kPa

Taulukko 5 sisältää muuten samat alkuarvot kuin taulukko 3, mutta hyötysuhteen luku-arvoa on pienennetty. Vastaavasti taulukko 6 vastaa alkuarvoiltaan taulukko 4:n arvoja lukuun ottamatta hyötysuhdetta, joka on samansuuruinen kuin taulukko 5:ssä. Hyötysuhteen vaikutusta pumppauskustannukseen tutkitaan, jotta voidaan hahmottaa melko radikaalisti väärin mitoitettun kiertovesipumpun aiheuttamaa kustannusta heikentyneen hyötysuhteen kautta.

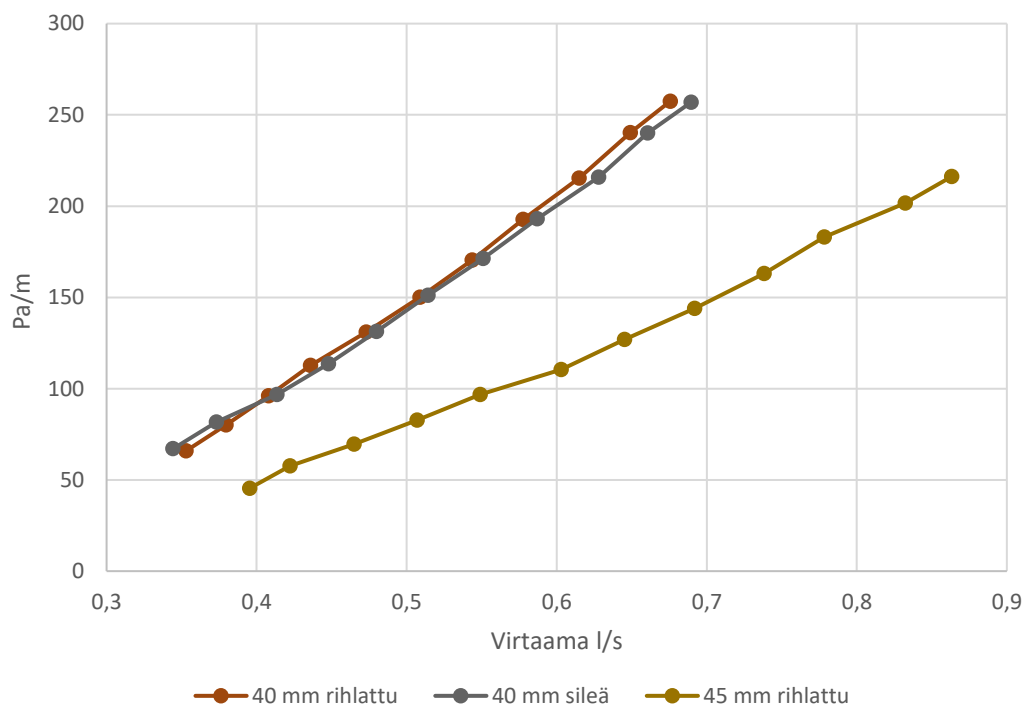
**Taulukko 6 Painehäviön kustannuslaskelman lähtötiedot CASE 4**

Maalämpökaivojen lukumäärä	10	kpl
Virtaama/maalämpökaivo	0,5	l/s
Kokonaisvirtaama	5	l/s
Maalämpökaivojen syvyys	300	m
Kiertopumpun kokonaishyötysuhde	0,5	-
Huipunkäyttöaika	3500	h
Sähkön hinta	0,14	€/kWh
40 mm keruuputki/keruupiirin $\Delta P$	100	kPa
45 mm keruuputki/keruupiirin $\Delta P$	52	kPa

## 5. TULOKSET JA NIIDEN ANALYYSINTI

### 5.1 Mittaustulokset

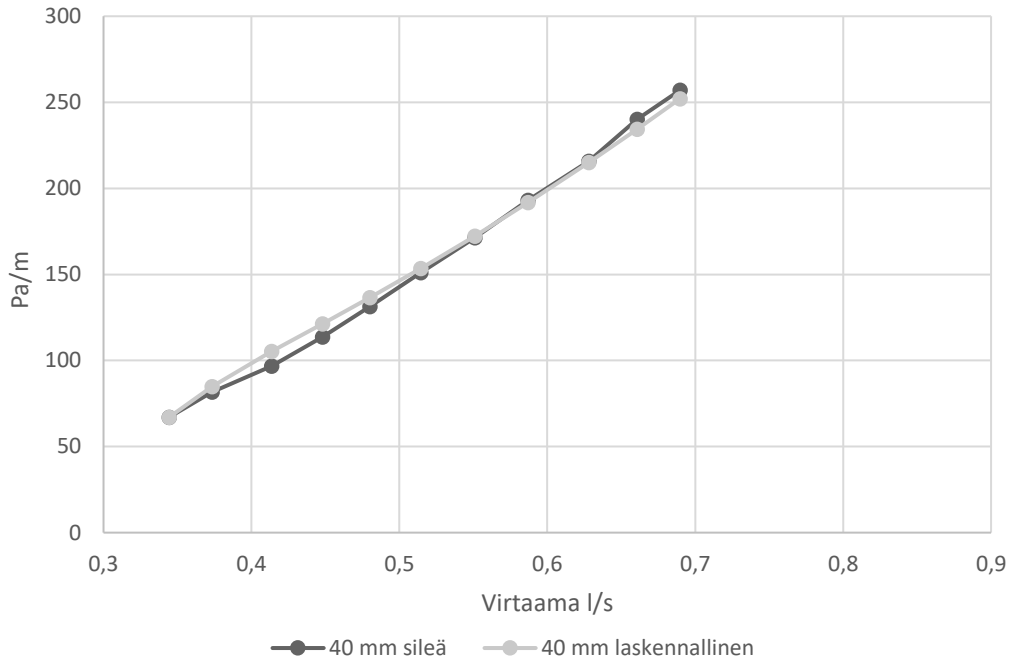
Keruuputkien painehäviöiden mittaustulokset olivat toisaalta odotettuja, mutta myös hieman yllättäviä. Yllätyin hieman siitä, miten hyvin laskennallinen painehäviö vastasi mittaustuloksia, eikä merkittäviä eroja tullut. Toisaalta painehäviölaskennan edellytys on se, että laskennalliset korrelaatiot ovat lähellä mittaustuloksia, jotta niitä voidaan käyttää todellisten projektien suunnittelussa.



**Kuva 5.1 Painehäviö virtaaman funktiona, 40 mm rihlattu, 40 mm sileä sekä 45 mm rihlattu mitattu**

Kuvan 5.1 mittaustulosten mukaan, erot sileän ja rihlatun keruuputken painehäviöissä on kohtalaisen pieniä. Rihlatulla keruuputkella on isompi painehäviö virtaaman arvon yläpäässä, jolloin myös keruuneste on turbulenttisinta. Putken halkaisijan kasvu vaikuttaa kuvan 5.1 mukaan selkeästi painehäviön suuruuteen. Vertailtaessa 40 mm:n keruuputken ja 45 mm:n keruuputken mittaustuloksia virtaaman arvolla n. 0,6 l/s painehäviön suuruus on lähes tuplaantunut 40 mm:n rihlatussa keruuputkessa verrattuna 45 mm:n keruuputken painehäviöön. Tulos kertoo hyvin siitä, kuinka vähän putkihalkaisijan tulee kasvaa, jotta painehäviötä saadaan merkittävästi pienemmäksi.

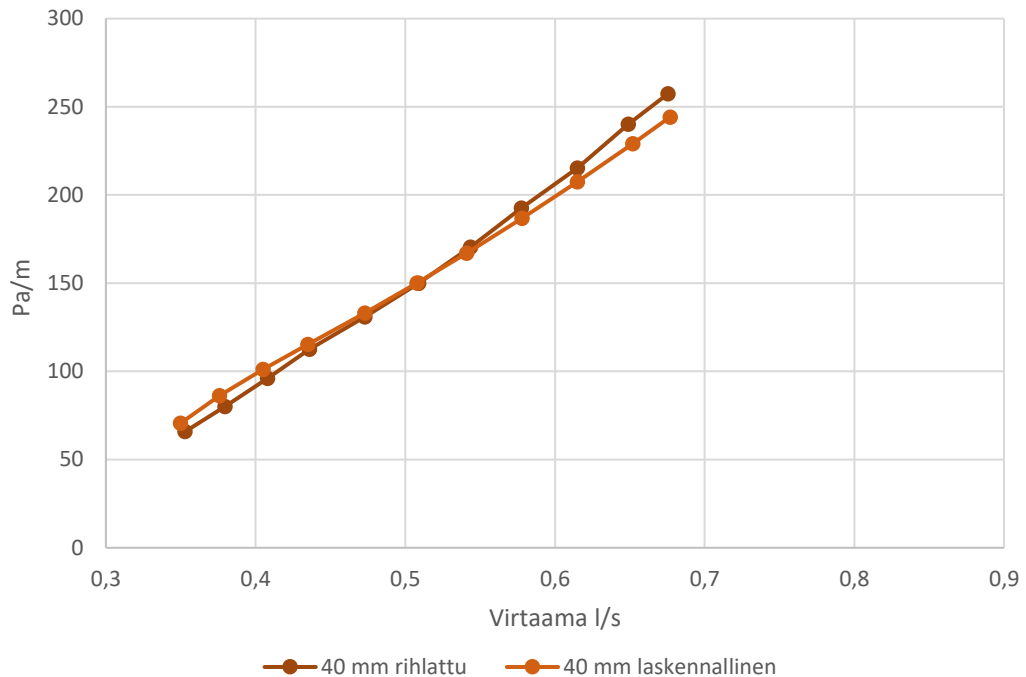
Sileän keruuputken mittaustulosten tulisi vastata laskennallista painehäviötä paremmin verrattuna rihlatuun keruuputkeen. Laskennalliset korrelaatiot eivät huomioi erikseen rihlausta, vaan niissä on oletettu sileä putki.



**Kuva 5.2 Painehäviö virtaaman funktiona, 40 mm sileä mitattu sekä 40 mm laskennallinen**

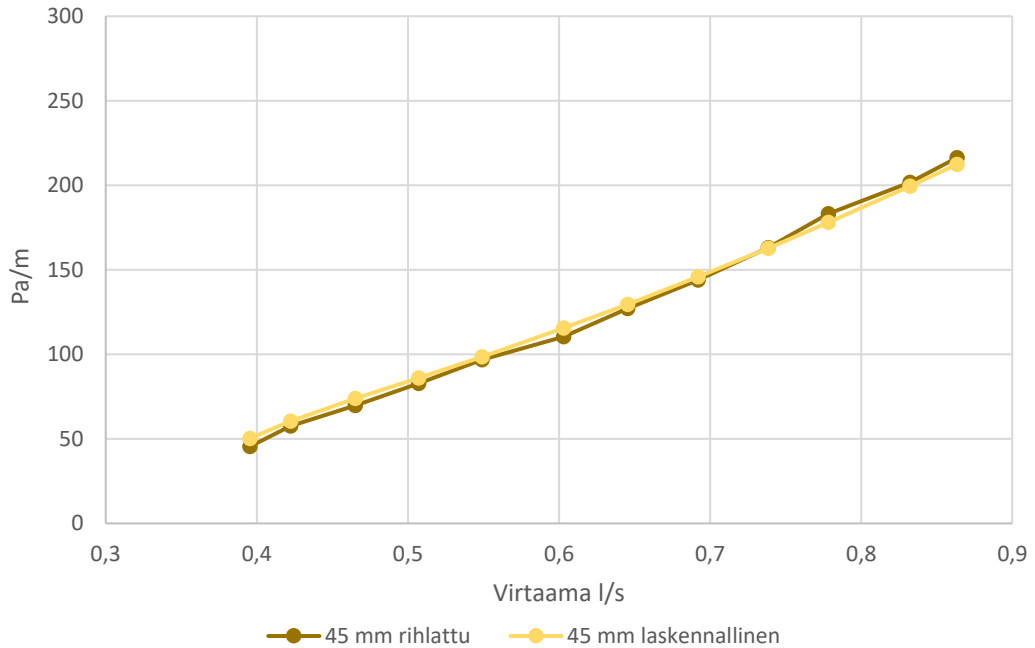
Sileän keruuputken kohdalla kuvassa 5.2 painehäviö oli alkupään virtaamilla pienempi kuin laskennallinen painehäviö lukuun ottamatta ensimmäistä laskennallista arvoa. Kuitenkin virtaaman kasvaessa ero tasoittui ja tulokset vastasivat toisiaan melko hyvin. Huomioitavaa on se, että mitä suuremmaksi virtaama kasvoi, sitä turbulenttisempaa virtaus oli, jolloin myös laskennallisen ja mitatun painehäviön ero pieneni.

Rihlatun ja laskennallisen painehäviön välillä huomataan selkeämpi ero kuin sileän keruuputken ja laskennallisen tuloksen välillä. Suurin ero mittaustuloksia verratessa laskennallisiin tuloksiin oli kuvassa 5.3 40 mm:n rihlatun ja laskennallisen painehäviön välillä.



**Kuva 5.3 Painehäviö virtaaman funktiona, 40 mm rihlattu mitattu sekä 40 mm laskennallinen**

Kyseistä eroa selittää osin se, että 40 mm:n rihlatun keruuputken mittauksessa käytetty etanolipitoisuus oli 33 p-%, kun laskennallinen arvo on laskettu 28 p-%:n vesietanoli liuoksella. Toisaalta eroa voi selittää myös putkessa olevan rihlauksen aiheuttama turbulentsisuus, joskaan 45 mm:n keruuputken tapauksessa eroa eri juurikaan tullut laskennalliseen tulokseen verrattuna. Laskennalliset arvot on laskettu herkkyystarkastelua lukuun ottamatta 28 p-%:n vesietanoli liuoksella, jotta laskennallinen referenssipiste pysyy samana kaikille mittaustuloksille. Herkkyystarkastelussa käsiteltiin tarkemmin etanolipitoisuuden vaihtelun vaikutusta painehäviön suuruuteen, jonka vaikutuksen todettiin olevan 28 p-%:n ja 33 p-%:n liuoksen välillä keskimäärin 1,2 % väkevämmän liuoksen hyväksi.

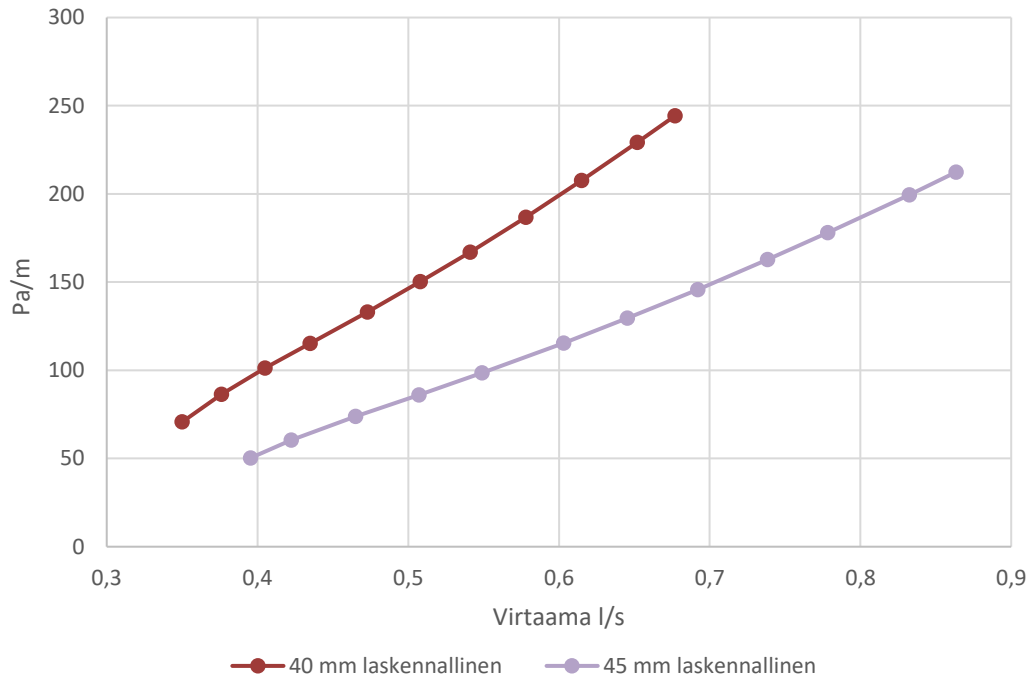


**Kuva 5.4 Painehäviö virtaaman funktiona, 45 mm rihlattu mitattu sekä 45 mm laskennallinen**

Huomion arvoista erityisesti 45 mm:n keruuputken mittaustuloksessa kuvassa 5.4 on se, että mittauksissa käytetyillä virtaaman arvoilla rihlaus ei näytä juurikaan vaikuttavan painehäviöön suurentavasti. Keruuputkista 40 mm:n rihlatun putken kohdalla havaittiin selkeämpi ero rihlatun ja laskennallisen painehäviön välillä, joskin etanolipitoisuudesta aiheutuva ero vaikutti osaltaan siihen.

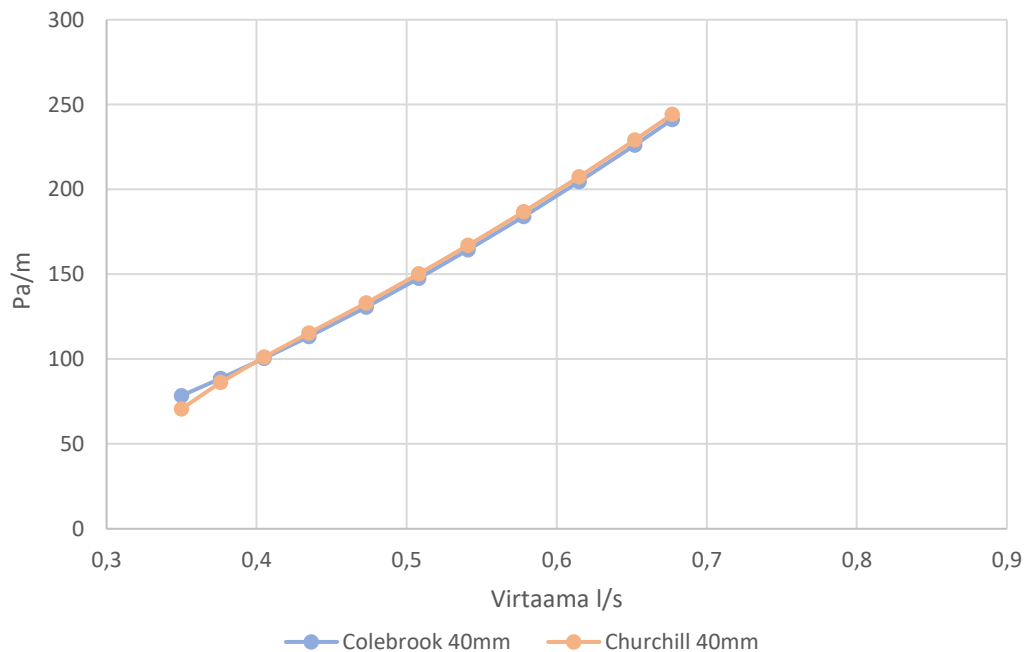
## 5.2 Mallinnustulokset

Mallinnustuloksissa on koottu laskennalliset painehäviöt mittauksissa käytetyille erikoisille keruuputkille, joita on käytetty vertailussa mitattujen painehäviöiden arvoihin. Painehäviö on määritetty myös kahta eri kitkakerrointa hyödyntäen, jolloin on saatu vertailupohjaa eri kitkakertoimen vaikutuksesta laskennallisen painehäviön suuruuteen. Painehäviön mallinnustulosten jälkeen esitetään painehäviön kustannuslaskelmien tulokset neljästä eri CASE:sta, joissa muutamaa parametriä vaihdetaan.



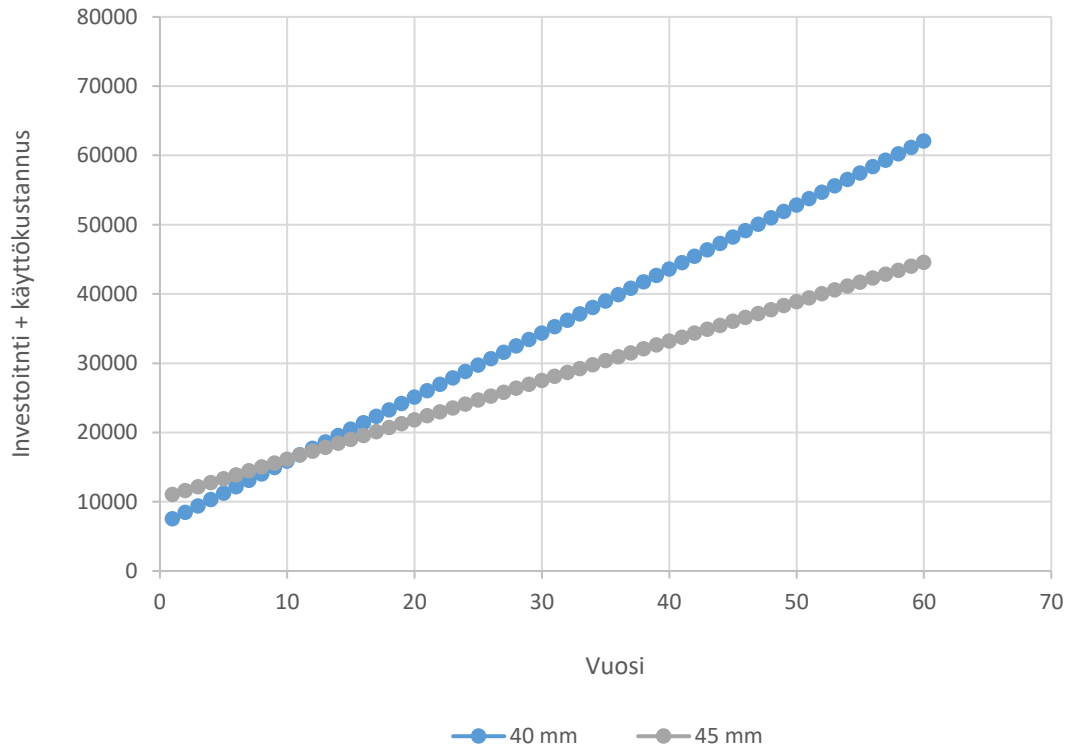
**Kuva 5.5 Painehäviö virtaaman funktiona, 40 mm ja 45 mm laskennallinen**

Laskennallisten painehäviöiden suuruudet kuvassa 5.5 40 mm:n ja 45 mm:n keruuputkien osalta eivät oleellisesti poikkea mitatuista arvoista, vaan niiden välinen ero kasvaa tasaisesti virtaaman kasvaessa. Laskennallisen painehäviön määrittämisessä kyseisillä virtaaman arvoilla ei näy eksponentiaalista kasvua, vaan painehäviö suhteessa virtaamaan näkyy olevan hyvin lineaarinen koko mittausalueella.



**Kuva 5.6 Painehäviö virtaaman funktiona, Colebrookin ja Churchillin kitkaker-toimilla laskettuna**

Colebrookin ja Churchillin kitkakertoimilla kuvassa 5.6 määritetyt painehäviöt vastaavat hyvin toisiaan eikä niiden välillä ilmene huomattavia eroja. Colebrookin kitkakertoimen määrittäminen sen sijaan on huomattavasti työläämpää, koska se tulee iteroida, jolloin sen käyttö ei ole niin kätevää verrattuna Churchillin kitkakertoimeen.

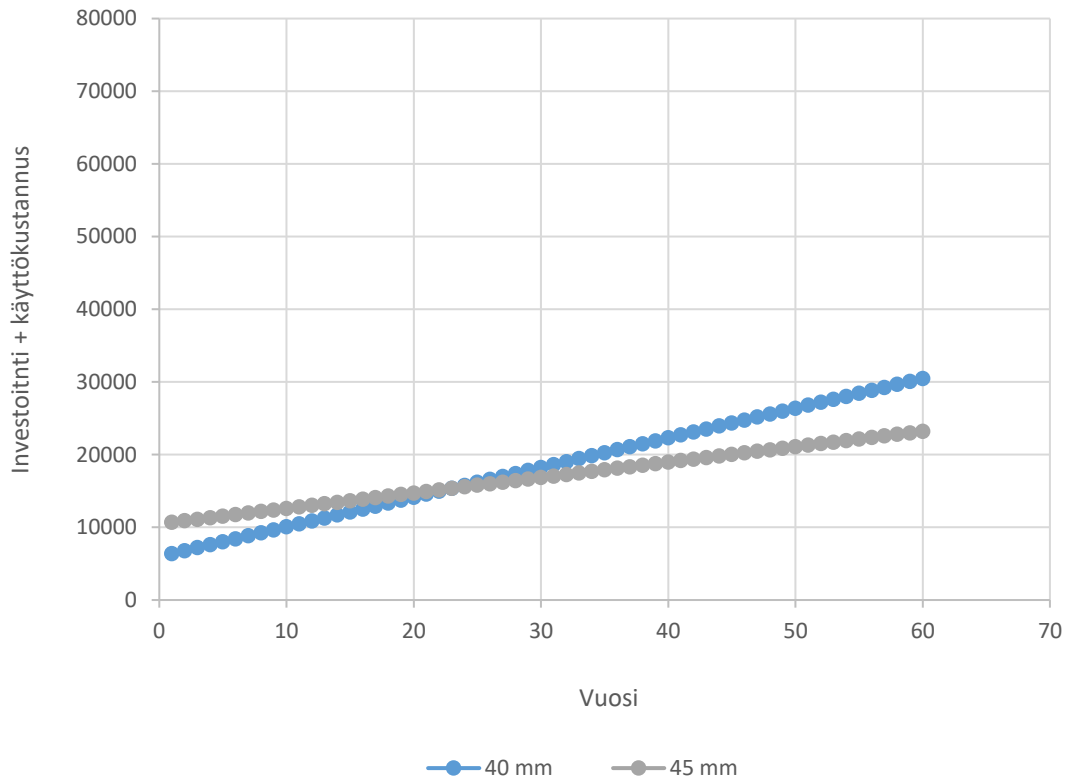


**Kuva 5.7 Keruuputkien investointi- ja käyttökustannus CASE 1**

Taulukko 3:n lähtötietojen pohjalta laskettiin kokonaiskustannukset sekä 40 mm:n että 45 mm:n keruuputkille. Piiskapumpun investointikustannus on laskettu vain 40 mm:n keruuputken tapauksessa, koska painehäviön suuruus on valtaosalle vakiokiertopumpuista liian suuri. CASE 1:n kohdalla kalliimman 45 mm:n keruuputken kokonaiskustannukset kohtaavat 40 mm:n keruuputken kokonaiskustannukset 10 vuoden kuluttua järjestelmän käynnistyksestä, jonka jälkeen 45 mm:n keruuputken pienempien käyttökustannusten takia sen käyttö tulee edullisemmaksi.



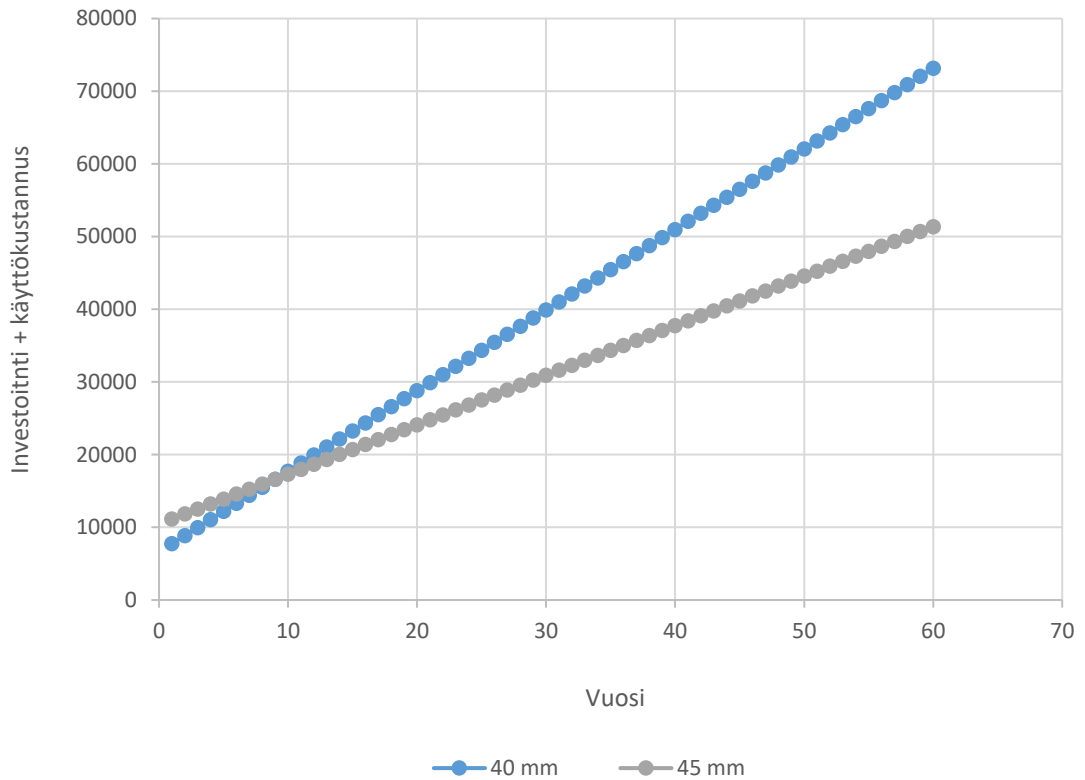
Painehäviön suuruutta voidaan keruuputken halkaisijaa kasvattamalla pienentää, mutta painehäviöön voidaan vaikuttaa myös maalämpökaivojen lukumäärää kasvattamalla etenkin suuremmissa kohteissa. Virtaaman suuruus maalämpökaivoa kohti pienenee useamman kaivon tapauksessa, jolloin kaivokohtainen painehäviökin pienenee.



**Kuva 5.8 Keruuputkien investointi- ja käyttökustannus CASE 2**

Kustannuskäyrien erot ovat CASE 1:n ja CASE 2:n kohdalla hyvin merkittävät, joka aiheutuu CASE 1:n suuremmasta painehäviöstä. Käyttökustannusten osuus nousee CASE 1:ssä isompaan rooliin, jolloin suurempi halkaisijainen keruuputken investointi tulee kannattavaksi jo 10 vuoden jälkeen ja edelleen siitä eteenpäin järjestelmän käyttöiän loppuun asti. Suuremman keruuputken takaisinmaksuaika kasvaa CASE 2:ssa huomattavasti verrattuna CASE 1:een, sillä muutosta tulee 12 vuotta takaisinmaksuajan yltäessä CASE 2:ssa 22 vuoteen.

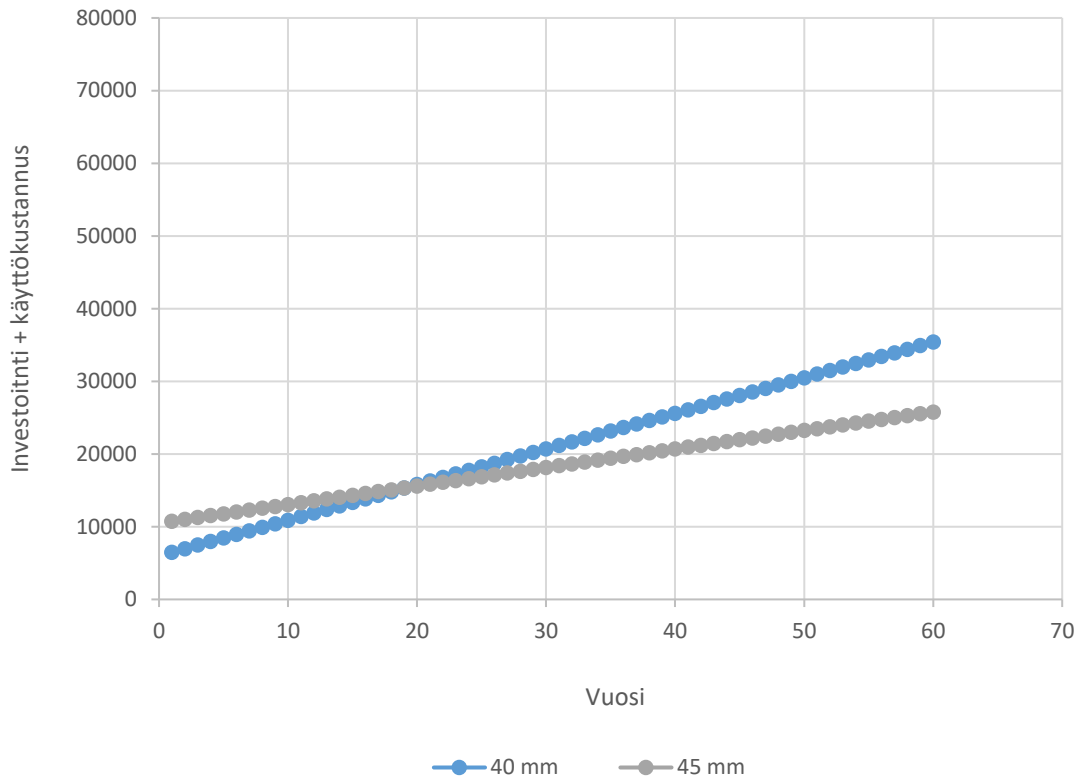
CASE 1:n ja CASE 2:n verrattuna kokonaishyötysuhteen suuruutta muutettiin CASE 3:n ja 4:n kohdalla. Alkuarvot pysyivät muutoin samoina. Hyötysuhteen heiketyssä huomataan, että pumppauskustannus nousee CASE 3:ssa ja CASE 4:ssä verrattuna CASE 1:n ja CASE 2:n.



**Kuva 5.9 Keruuputkien investointi- ja käyttökustannus CASE 3**

Pumppaushyötysuhteen heikentyminen vaikuttaa kuvan 5.9 mukaan kustannuksiin siten, että CASE 3:ssa 40 mm:n ja 45 mm:n keruuputkien kokonaiskustannukset kohtaavat jo 8 vuoden kohdalla. Keruuputkista 40 mm:n kohdalla suurempiin pumppauskustannuksiin vaikuttaa isompi painehäviö, jolloin hyötysuhteen huonontuessa pumppauskustannuksen vaikutus on suurempi verrattuna 45 mm:n keruuputkeen.

CASE 1:n ja CASE 2:n verrattuna havaitaan CASE 3:n ja CASE 4:n kohdalla, että 40 mm:n keruuputken kokonaiskustannus kasvaa enemmän suhteessa 45 mm:n keruuputkeen. Ero aiheutuu siitä, että painehäviö on 40 mm:n keruuputken tapauksessa isompi, jolloin hyötysuhteen vaikutus on pumppauskustannukseen suurempi.



**Kuva 5.10 Keruuputkien investointi- ja käyttökustannus CASE 4**

CASE 4:ssä kuvan 5.10 mukaan 45 mm:n keruuputki kohtaa 40 mm:n keruuputken kustannukset 19 vuodessa eli 3 vuotta aikaisemmin kuin CASE 2:ssa. Hyötysuhteen pudotus 0,1:llä vaikuttaa siis CASE 2:n ja CASE 4:n välillä siten, että huonomman hyötysuhteen tapauksessa 45 mm:n keruuputken kokonaiskustannukset kohtaavat 40 mm:n keruuputken kokonaiskustannukset 3 vuotta aiemmin.

### 5.3 Pohdinta mittaus- ja mallinnustulosten pohjalta

Mittausten ja mallinnuksen yksi tarkoitus oli tutkia laskennallisen ja mitatun painehäviön mahdollisia eroavaisuuksia. Painehäviön mallinnuksessa hyödynnettiin korrelaatioita (3.2.6) - (3.2.10), joilla laskennallisen painehäviön suuruudet laskettiin. Mallinnukseen vertailukohtaa haettiin vaihtoehtoisesta Colebrookin kitkakertoimesta (3.2.6) Churchillin kitkakertoimen (3.2.7) lisäksi. Kuvassa 5.6 on laskettu painehäviö sekä Colebrookin että Churchillin korrelaatioilla ja tulokset vastaavat hyvin pitkälti toisiaan. Kyseisen vertailun pohjalta ei vaikuta olevan suurta merkitystä, kumpaa kitkakerrointa käyttää painehäviötä laskiessa, sillä kumpikin kitkakertoimista näyttää toimivan kyseisellä alueella hyvin samankaltaisesti. Colebrookin kitkakerroin täytyy tosin ratkaista iteroimalla, joten siinä mielessä se on hieman työlämpi vaihtoehto käytännön kannalta.

Tuloksista löytyi eroja laskennallisen ja mitatun painehäviön välillä, mutta kuten kuvajista huomattiin, erot eivät olleet kovin merkittäviä. Rihlatun ja sileän keruuputken mitatun painehäviön pientä eroavaisuutta voi selittää osin se, että rihlatussa keruuputkessa rihla on niin loiva ja pieni, ettei sen vaikutus painehäviöön mittauksissa käytetyillä virtaamilla ole merkittävä. Lisäksi rihla ei kierrä keruuputkessa ympäri asti vaan tekee edes takaista liikettä keruuputken sisäpinnalla, jolla voi olla oma vaikutuksensa maltilliseen painehäviön kasvuun. Rihlatun keruuputken suunnittelussa on todennäköisesti pyritty siihen, että painehäviötä ei kasvatettaisi liikaa lämmönsiirron kustannuksella, jotta painehäviö ei asettaisi rajoituksia keruuputken käytölle erilaisissa sovelluskohteissa.

Painehäviön kustannusvaikutus on sitä suurempi, mitä korkeampi painehäviö on. Aina ei välttämättä ole kuitenkaan järkevää laittaa varmuuden vuoksi isompaa keruuputkea sen korkeampien investointikustannusten vuoksi. Suunnittelussa on tärkeä huomioida kiertopumpun oikea mitoitus, jotta pumppaushyötysuhde ei heikkenisi ja toisaalta mahdollinen käyttöikä lyhenisi sen vuoksi. Isompi halkaisijaisen keruuputken kohdalla hyötysuhteen heikkenemisellä on pienempi vaikutus pumppauskustannukseen alhaisemman painehäviön vuoksi. Painehäviön vaikutusta kokonaiskustannuksiin ei kannata väheksyä, vaikka sen suuruus ei vuositasolla olisikaan iso. Maalämpöjärjestelmän elinkaaren kokonaiskustannuksissa voi säästää tuhansia euroja, jos suunnitteluvaiheessa kiinnitetään riittävästi huomiota oikean kokoisen keruuputken ja toisaalta kiertovesipumpun mitoitukseen.

## 5.4 Tulevaisuuden parannusehdotukset ja tutkimuskohteet

Mittausten teko on hyvin paljon aikaa ja resursseja vaativaa työtä, joka vaatii melko runsaasti valmisteluja. Muun muassa tästä syystä mittaukset rajattiin työssä tehtäväksi vakiolämpötilassa sekä mahdollisimman vakioissa olosuhteissa, jotta mittauksiin käytetty aika pysyy työn aikaraameihin suhteutettuna kohtuullisena.

Aiheeseen liittyviä tutkimuskohteita olisi jatkossa painehäviön mittaukset herkkyystarkeudessa tehtyjen lämpötilavaihtelujen sekä vesietanoli liuoksen etanoliosuuden vaihteluiden vaikutuksista. Mittauksien aikana maalämpökaivon keruunesteen lämpötila pysyi n. 7 °C lämpötilassa, joka on kuitenkin harvinaisempi lämpötila maalämpökaivon keruunesteelle maalämpöjärjestelmää käytettäessä. Maalämpöpumpulle palaavan keruunesteen lämpötila on useimmiten erityisesti talviaikaan lähempänä 0 °C, toki kohteesta ja sovelluksesta riippuen. Tästä syystä mittaukset vaihtelevissa lämpötiloissa, aina pakkasen puolelle asti voisivat olla hyödyllisiä, jotta mittauksia ja laskennallisia arvoja saataisiin verrattua toisiinsa myös kyseisen parametrin muuttuessa. Parempaa vertailtavuutta varten mittauksissa tulisi olla valmiiksi sekoitettu ja täsmälleen saman vahvuinen liuos, jotta vertailu tehtävien mittausten kesken helpottuisi. Painehäviömittausten lisäksi rihlatun keruuputken ja sileän keruuputken vertailua voisi jatkaa siten, että niiden eroja lämmönsiirron osalta tutkittaisiin esimerkiksi TRT-testillä samassa energiakäytössä.

Jatkossa tulisi tehdä lisää painehäviömittauksia ja analyysiä mittaustulosten pohjalta, jotta olisi mahdollista saada edelleen vahvempaa selkänöjää mittaustulosten ja laskennallisten tulosten vastaavuudesta. Edelleen vaihtoehtoisia painehäviökorrelaatioita tulisi verrata mitattuihin tuloksiin ja sitä kautta analysoida niiden käyttökelpoisuutta painehäviöiden laskennassa.

## 6. YHTEENVETO

Maalämmön osuus kiinteistöjen lämmitystapana tulee kasvamaan tiukentuvien päästövähennystavoitteiden, kilpailukykyisten kustannusten sekä osittain myös poliittisen tahotilan myötä. Energia-avustuksia tullaan jakamaan ympäristöministeriön tiedotteen mukaan [5] ensin 20 miljoonaa euroa vuonna 2020 sekä 40 miljoonaa euroa vuodessa vuosina 2021-2022. Energia-avustusta voi hakea korjaushankkeisiin, joissa asuinrakennusten energiatehokkuutta parannetaan selkeästi.

Maalämpökaivokentän ja toisaalta koko maalämpöjärjestelmän oikea toiminta edellyttää huolellisesti tehtyä suunnittelua. Painehäviö on yksi maalämpökaivokentän suunnitteluun vaikuttavista asioista, jonka huomiointi on oleellista toimivan järjestelmän suunnittelussa. Maalämpökaivokenttään tulee saada riittävä virtaama, jotta suunniteltu energia- ja tehomäärä saadaan maalämpökaivokentästä. Tästä syystä painehäviön suuruuden tulisi olla huomioituna jo suunnitteluvaiheessa, jotta esimerkiksi putkikoot osataan mitoittaa oikein, jolloin maalämpökaivokentän oikea toiminta on mahdollista.

Laskennallisen painehäviön määrittäminen olemassa olevilla korrelaatioilla on tavanomainen tapa määrittää painehäviö suunnitteluvaiheessa. Tässä työssä tehtiin painehäviömittauksia, jotta voitaisiin verrata laskennallisen ja mitatun painehäviön mahdollisia eroavaisuuksia. Mittauksissa löytyi eroja laskennallisen painehäviön sekä mitatun painehäviön väliltä, mutta erot eivät olleet kovin merkittäviä. Mittausten tärkein tulos oli se, että painehäviölaskenta vastasi mittaustuloksia melko hyvin. Pienillä virtaaman arvoilla laskennallinen painehäviö oli yksittäisiä mittauspisteitä lukuun ottamatta mitattua painehäviötä pienempi, mutta ero tasoittui virtaaman kasvaessa. Laskennallisen ja mitatun painehäviön vertailun lisäksi vertailtiin 40 mm:n sileän ja 40 mm:n rihlatun keruuputken eroja painehäviön osalta. Erityisesti rihlatun ja sileän keruuputken väliset eroavaisuudet kiinnostivat mittauksissa. Ero sileän ja rihlatun keruuputken välillä oli yllättävän pieni. Sileän ja rihlatun keruuputken pientä eroa voi selittää osaltaan se, että rihlatussa keruuputkessa rihla on maltillisen kokoinen sekä rihlan kulma on kohtalaisen loiva. Lisäksi maalämpökaivoissa käytetyt virtaaman arvot ja toisaalta Reynoldsin luvut olivat niin alhaisia, ettei keruuputken sisällä olevilla rihloilla ollut kovin suurta vaikutusta painehäviöön.

Yksi maalämpökaivokentän käytön aikaisten kustannusten aiheuttaja on painehäviö. Painehäviöstä aiheutuvaa kustannusta ja toisaalta keruuputken investointikustannusta vertailtiin painehäviön kustannuslaskennassa, jotta voitiin hahmottaa eri halkaisijan omaavien keruuputkien vaikutuksia investointi- ja käyttökustannuksiin. Kustannuslaskelma jaettiin neljään eri CASE:n, jotka erosivat toisistaan virtaaman sekä pumppaushyötysuhteen osalta sekä nk. piiskapumpun investoinnin osalta.

Painehäviön kustannusvaikutus on sitä suurempi, mitä isompi painehäviön arvo on. Huolimatta pienemmästä painehäviöstä ei isompaa keruuputkea kannata aina hankkia sen korkeampien investointikustannusten vuoksi. Keruuputkien takaisinmaksuaikaa toisiinsa nähden voi verrata tässä työssä esitetyllä laskennalla, jolloin saa viitteitä erikokoisten keruuputkien investoinnin järkevyydestä suhteessa toisiinsa. Suunnittelussa on tärkeä huomioida kiertopumpun oikea mitoitus, jotta pumppaushyötysuhde ei heikkenisi ja toisaalta pumpun mahdollinen käyttöikä ei lyhenisi sen vuoksi. Kiertopumpun mahdollinen rikkoutuminen väärän mitoituksen vuoksi tuo kokonaiskustannuksiin ylimääräisen kustannuksen uuden kiertopumpun hankinnasta. Huomioitavaa onkin se, että maalämpöjärjestelmän elinkaaren kokonaiskustannuksissa voi säästää tuhansia euroja, jos suunnitteluvaiheessa kiinnitetään riittävästi huomiota oikean kokoisen keruuputken ja toisaalta kiertovesipumpun mitoitukseen.

Tässä työssä tutkittiin kolmen erilaisen keruuputken painehäviötä kokeellisella mittauksella sekä mallintamalla painehäviötä laskennallisilla korrelaatioilla. Mittauksen ja mallinnuksen lisäksi kohdeyritys Rototec Oy:lle tehtiin Excel-laskentatyökalu, jolla voidaan verrata erilaisten keruuputkien investointi- sekä käyttökustannuksia muuttuvilla lähtötiedoilla.

# LÄHTEET

- [1] National Research Council, (2010). Advancing the science of climate change.
- [2] IPCC, (2013). Climate Change - The Physical Science Basis.
- [3] Heikki Nevanlinna, (2008). Muutamme ilmastoa. Ilmatieteen laitoksen tutkijoiden katsaus ilmastonmuutokseen.
- [4] IPCC, (2018). Global Warming of 1.5°C.
- [5] Ympäristöministeriö, (2019). Energia-avustus asuinrakennuksille. Saatavissa: [https://www.ymparisto.fi/FI/Ajankohtaista/Asuinrakennuksille\\_myonnnettavissa\\_yhtein\(53549\)](https://www.ymparisto.fi/FI/Ajankohtaista/Asuinrakennuksille_myonnnettavissa_yhtein(53549)) [viitattu 15.2.2020]
- [6] Acuña J, Palm B, (2008). Experimental Comparison of Four Borehole Heat Exchangers.
- [7] Jalaluddin, Miyara A, (2015). Thermal performance and pressure drop of spiral-tube ground heat exchangers for ground-source heat pump
- [8] Zarrella A, Capozza A, De Carli M, (2013). Analysis of short helical and double U-tube borehole heat exchangers.
- [9] Cvetkovski CG, Reitsma S, Bolisetti T, Ting DS, (2014). Ground source heat pumps: Should we use single U-bend or coaxial ground exchanger loops?
- [10] Suomen virallinen tilasto (SVT): Rakennus- ja asuntotuotanto. Saatavissa: <http://www.stat.fi/til/ras/index.html> [viitattu 25.2.2020].
- [11] Tilastokeskus. Pientalojen lämpöpumput. Saatavissa: [https://pxhopea2.stat.fi/sahkoiset\\_julkaisut/energia2018/html/suom0001.htm](https://pxhopea2.stat.fi/sahkoiset_julkaisut/energia2018/html/suom0001.htm)
- [12] J. Rodrigo-Illarri, S. Jin, P. Blum, P. Bayer and P. Grathwohl, (2010). Geostatistical characterisation of heterogeneous aquifers for the application of open shallow geothermal systems.
- [13] Borgnakke C, Sonntag RE, (2013). Fundamentals of thermodynamics
- [14] Juvonen J. & Lapinlampi T, Energiakaivo. (2013) Maalämmön hyödyntäminen pientaloissa, Ympäristöministeriö, <http://julkaisut.valtioneuvosto.fi/handle/10138/40953>.
- [15] Pipelife maalämpöputket. Saatavissa: <https://www.pipelife.fi/fi/tuotteet/talotekniikka/maalampoputki.php>. [viitattu 12.2.2020]
- [16] Muovitech turbokollektori. Saatavissa: <https://www.muovitech.com/?page=products&category=GSHEX&id=1669>. [viitattu: 11.2.2020]
- [17] Acuña J, (2010). Improvements of U-pipe Borehole Heat Exchangers



- [18] Maankamara GTK, karttapalvelu. Saatavissa: <http://www.gtk.fi/tietopalvelut/palvelukuvaukset/maankamara.html>. [viitattu 3.1.2020].
- [19] EED-ohjekirja, (2015). Earth Energy Designer. Saatavissa: <http://www.building-physics.com/manuals/EED3.pdf> [viitattu 4.1.2020]
- [20] Bachus L, Custodio AA, (2003). Know and understand centrifugal pumps
- [21] Kauranne H, Kajaste J, Vilenius M, (2008). Hydrauliteknikka
- [22] Yamaguchi H, (2008). Engineering Fluid Mechanics
- [23] White FM, (2011). Fluid Mechanics
- [24] Benedict Robert P, (1980). Fundamentals of pipe flow
- [25] Churchill SW, (1977). Friction Factor Equations Spans All Fluid-Flow Regimes
- [26] The institute of Measurement and Control, (1998). Guide to the measurement of Pressure and Vacuum
- [27] Saxholm S, Rantanen M, (2011). Paineen mittaus
- [28] Nesbitt, Brian, (2006). Handbook of pumps and pumping
- [29] IMI Hydronic engineering, Ta Scope tuotetiedot. Saatavissa: <https://www2.imi-hydronic.com/fi/tuotteet-ja-ratkaisut/ta-balancing-and-control/mittausvalineet/mitalaitteet/> [viitattu 10.3.2020]
- [30] IMI Hydronic Engineering, (2019). Stad dn 10-50 linjasäätöventtiilit. Saatavissa: <https://www2.imi-hydronic.com/fi/tuotteet-ja-ratkaisut/ta-balancing-and-control/linjasaatoventtiilit/linjasaatoventtiilit/STAD--PN-25/> [Viitattu 12.3.2020]
- [31] Rototec Oy, (2019). Koulutusmateriaalit
- [32] RT LVI 11-10624, (2018). Maalämpöpumput. Kiinteistöjärjestelmät. Rakennustieto