



Osaamista  
ja oivallusta  
tulevaisuuden  
tekemiseen

Jussi Häkkinen

# Glykolipitoisuuden vaikutus Comfort-jäähdytyslaitoksen energiatehokkuuteen

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Talotekniikka

Insinöörityö

18.4.2019

Tekijä Otsikko	Jussi Häkkinen Glykolipitoisuuden vaikutus Comfort-jäähdytyslaitoksen energiatehokkuuteen
Sivumäärä Aika	66 sivua + 6 liitettä 18.4.2019
Tutkinto	insinööri (AMK)
Tutkinto-ohjelma	talotekniikka
Ammatillinen pääaine	LVI-suunnittelu
Ohjaajat	yliopettaja Aki Valkeapää LVI-insinööri Juha-Petteri Muukkonen
<p>Tässä Insinööriyössä tutkittiin glykolipitoisuuden vaikutusta Comfort-jäähdytyslaitoksen energiatehokkuuteen. Liuoksen lämmönsiirtokyky paranee glykolipitoisuuden laskiessa, joten tarkoituksena oli selvittää alhaisin mahdollinen pitoisuus, laskea saadaanko investoinnilla aikaan säästöä ja saataisiinko investoinnille järkevä takaisinmaksuaika.</p> <p>Työssä käydään läpi Comfort-laitoksen toimintaprosessi sekä energialaskelmat putken painehäviölaskennasta lähtien. Säästölaskenta suoritettiin excel-pohjaisella laskentaohjelmalla, joka laadittiin tämän insinööriyön yhteydessä. Laskentaohjelmalla laskettiin pumpausenergian kulutus viidellä eri tavalla vertaillen neljää eri säästötoimenpidettä. Vaihtoehdot olivat juoksupyörän vaihto, pumpun vaihto, glykolipitoisuuden laimennus ja viimeisenä glykolipitoisuuden laimennuksen sekä pumpun vaihdon yhdistelmä.</p> <p>Tämän insinööriyön perusteella todettiin, että kaikki tässä työssä käsitellyt säästötoimenpiteet ovat kannattavia. Kuitenkin paras vaihtoehto on glykolipitoisuuden laimennus 30 %:sta 15 %:iin yhdistettynä pumpun vaihtoon. Tämä toimenpide maksaa investointikulut takaisin neljässä vuodessa ja tuottaa noin 11 000 € säästöä vuosittain.</p> <p>Vastaavanlaisissa järjestelmissä, joissa pumpun mitoitus on lähtökohtaisesti tehty oikein, glykolipitoisuuden laimentamisen yhteydessä riittää todennäköisesti pelkkä juoksupyörän vaihto. Kuitenkin takaisinmaksuajaksi tulisi noin 10 vuotta, koska Comfort-jäähdytyslaitoksen nopea takaisinmaksuaika ja vuosittainen säästö muodostuvat pääasiassa pumpun hyötysuhteen merkittävästä noususta.</p>	
Avainsanat	aineominaisuudet, pumppausenergia, hyötysuhdekäyrä

Author Title	Jussi Häkkinen Effects of Glycol Concentration on Energy Efficiency of Comfort Cooling Systems
Number of Pages Date	66 pages + 6 appendices 18 April 2019
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Building Services Engineering
Professional Major	HVAC Design
Instructors	Aki Valkeapää, Principal Lecturer Juha-Petteri Muukkonen, Bachelor of Engineering
<p>The purpose of this final year project was to find out how glycol concentration effects on the energy efficiency of a comfort cooling system. The main goals were to determine the lowest possible glycol concentration for the system and to calculate whether it would be profitable to decrease the current concentration.</p> <p>The project studied the physical properties that affect the energy consumption. A calculation tool was created to calculate the pumping energy consumption of any cooling system by using five different glycol concentrations simultaneously.</p> <p>Energy consumption calculations were made for the system by changing pump impeller, changing the pump, decreasing glycol concentration from 30 percent to 15 percent and combinations of decreasing the concentration and changing the pump. The study showed, unexpectedly, that it is more profitable to change the centrifugal pumps of the system instead of decreasing the glycol concentration. However, the best solution was to decrease the glycol concentration and change the pumps for smaller ones for better efficiency.</p> <p>In conclusion, the study showed that decreasing the glycol concentration in an oversized Comfort cooling system is reasonable, but if the pump sizing is done properly from the beginning, the payback period for investment would be much longer.</p>	
Keywords	physical properties, pumping energy, efficiency curve

## Sisällys

1	Johdanto	1
2	Comfort-jäähdytyslaitos	2
2.1	Järjestelmän toimintakuvaus pähkinänkuoressa	2
2.2	Prosessikuvaus	3
2.2.1	Prosessikulku talviolosuhteissa	5
2.2.2	Prosessikulku kesäolosuhteissa	6
2.3	Pääkomponentit	10
2.3.1	Lämmönsiirtoneste	10
2.3.2	Lämmönsiirtimet	11
2.3.3	Lämpöpumput	14
2.3.4	Keskipakoispumput	15
2.4	Valvomo	16
3	Säästölaskenta	17
3.1	Putken painehäviöt	21
3.2	Putkiosien painehäviöt	27
3.3	Komponenttien painehäviöt	32
3.4	Pumppausenergian laskeminen	33
4	Energiansäästöön vaikuttavat tekijät	35
4.1	Glykolipitoisuus	35
4.2	Tilavuusvirta ja nostokorkeus	36
4.3	Pumpun hyötysuhde	36
4.4	Aineominaisuudet	37
4.4.1	Tiheys	37
4.4.2	Ominaislämpökapasiteetti	38
4.4.3	Lämmönjohtavuus	39
4.4.4	Viskositeetti	39
5	Energiansäästön laskentaohjelma	40
5.1	Laskentaohjelman ideointi	40
5.2	Least square method -välilehti	41
5.3	Aineominaisuudet-välilehti	42
5.4	Painehäviöt-välilehti	46
5.4.1	Putken painehäviöt	46
5.4.2	Putkiosien painehäviöt	47

5.5	Laskenta-välilehti	47
5.6	Säästö-välilehti	48
5.7	Pikalaskuri-välilehti	50
6	Epäkohdat ja säästöratkaisut	51
6.1	Lähtötietojen merkitys säästöön.	51
6.2	Geo-piirin lämmönsiirtonesteen laimentaminen	51
6.2.1	Korroosiosuoja-aineen lisäys	52
6.2.2	Ylijäämäglykoli	52
6.3	Kiertopumpun vaihtaminen	53
7	Taloudellinen kannattavuus	54
7.1	Takaisinmaksuajan laskeminen	54
7.2	Investointien takaisinmaksuaika	56
7.3	Glykolipitoisuuden laimennuksen kannattavuus muissa kohteissa	61
8	Yhteenveto	63
	Lähteet	65
	Liitteet	
	Liite 1. ASHRAE:n tiheystaulukko	
	Liite 2. Putkiston painehäviötaulukko	
	Liite 3. Putkiosien painehäviötaulukko	
	Liite 4. Laskenta-välilehti	
	Liite 5. Säästö-välilehti	
	Liite 6. Pikalaskuri-välilehti	

## 1 Johdanto

Tämän insinööriyön tarkoituksena oli tutkia, miten glykolipitoisuus vaikuttaa jäähdytysjärjestelmän energiatehokkuuteen.

Jäähdytysjärjestelmä, jota tässä työssä tutkittiin, ei toiminut energiatehokkaasti. Konejäähdytyksen ensiöpiiriin oli ajettu liuos, jonka glykolipitoisuus oli todettu vasta jälkeensä liian suureksi.

Järjestelmän suunnitteluvaiheessa ei ollut varmaa tietoa, minkälaisia lämpötiloja laitoksessa tulisi esiintymään. Normaalin toimintatavan mukaan jäähdytysverkoston ensiöpuolelle oli ajettu 30 %:n etyleeniglykoliliuos. Kiinteistön ympärivuotisen trendiseuran ansiosta oli havaittu, että jäähdytyksen ensiöpuolen lämpötilat eivät juurikaan laskeutuneet nollan alapuolelle ulkolämpötilasta huolimatta. 30 %:n etyleeniglykoliliuoksen jäämispiste on noin  $-15,8\text{ °C}$  eli teoriassa glykolipitoisuutta voitaisiin laskea reilusti.

Tätä insinööriyötä ehdotettaessa epäiltiin lämmönsiirtonesteen laimentamisella olevan vaikutus jäähdytysjärjestelmien energiatehokkuuteen. Työn tavoitteena oli tämän esimerkkikohteen avulla selvittää, vaikuttaako geo-piirin lämmönsiirtonesteen laimentaminen energiatehokkuuteen. Lisäksi selvitettiin energiatehokkuuteen vaikuttavat tekijät ja laskettiin, minkälainen säästö jäähdytysjärjestelmälle voitaisiin saada rahassa, jos lämmönsiirtonesteen pitoisuus laskee.

Järjestelmän toimintaa tutkittiin paikan päällä kiinteistön tiloissa ja prosessia seurattiin valvomon näytöiltä. Laskennoissa käytetyt lukuarvot saatiin tarkasti valvomon trendiseurannasta vastaamaan järjestelmän todellisia toiminta-arvoja. Laitoksen kaikki alkuperäiset suunnitelmat ja dokumentit saatiin kätevästi projektipankista, joten järjestelmään perehtyminen oli helpompaa.

Jäähdytysjärjestelmien energiankulutuksesta on tehty aikaisemminkin opinnäytetöitä, mutta laskelmaa glykolipitoisuuden vaikutuksesta jäähdytysjärjestelmiin tai kannattavuuslaskelmaa lämmönsiirtonesteen laimennuksesta ei ole vastaan tullut. Tästä syystä tähän aiheeseen päätettiin tarttua.

Opinnäytetyön rajauksesta huolimatta työ laajeni laskentaohjelman laatimiseen, jolla voidaan laskea jäähdytysjärjestelmän pumppausenergian kulutus vertaillen viittä eri glykolipitoisuutta. Laskentaohjelma laskee valituille glykolipitoisuuksille aineominaisuuksien arvot ja laskee pumppausenergian kulutuksen käyttäen valittuja pitoisuuksia.

Idea tämän opinnäytetyön aiheelle tuli käyttäjältä, mutta työ tehtiin Granlund Oy:n LVI2-osaston palveluksessa.

## 2 Comfort-jäähdytyslaitos

Tässä luvussa esitellään Comfort-jäähdytyslaitoksen pelkistetty toimintakuvaus, minkä jälkeen seuraavissa alaluvuissa paneudutaan yksityiskohtaisemmin laitoksen toimintavaiheisiin lämmitys- ja jäähdytyskauden aikana sekä esitellään laitoksen pääkomponentit ja esitellään niiden toiminta.

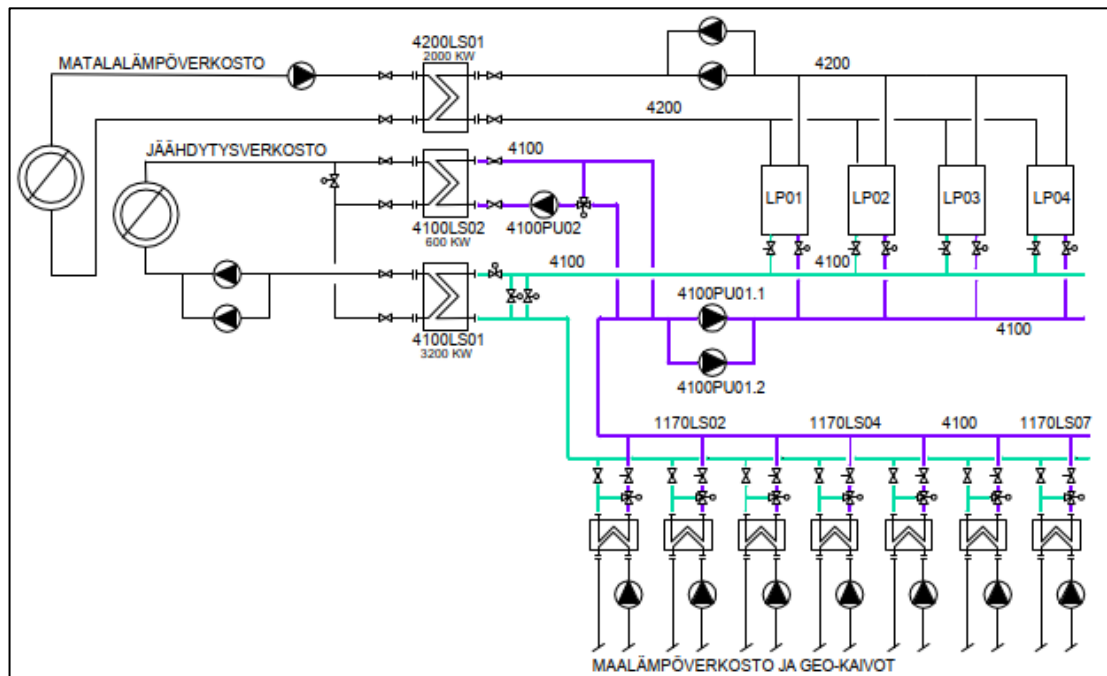
### 2.1 Järjestelmän toimintakuvaus pähkinänkuoressa

Comfort-jäähdytyslaitos tuottaa erääseen kiinteistöön jäähdytys- ja lämmitysenergiaa. Jäähdytyskaudella laitoksen lämpöpumput toimivat vedenjäähdytyskoneina ja tuottavat jäähdytysenergiaa jäähdytysverkostoon. Talvella lämmityskauden aikana asetusarvoja muuttamalla koneet toimivat lämpöpumppuina ja tuottavat lämmitysenergiaa kiinteistön matalalämpöverkostoon. Järjestelmä hyödyntää maaperästä saatua geo-energiaa.

Talvella lämmityskauden aikana Comfort-laitos toimii samalla periaatteella kuin omakotitalon maalämpöjärjestelmä. Maaperään porattujen energiakaivojen keruupiireihin varastoitunut lämpöenergia siirretään putkistoa pitkin järjestelmän lämpöpumpuille. Tämä maalämpöpiiristä saatu lämpö nostetaan korkeampaan lämpötilaan lämpöpumppujen kylmäprosessia hyödyntäen ja siirretään sitten kiinteistön matalalämpöjärjestelmään. Talvella tilojen jäähdytykseen tarkoitettu konejäähdytyksen lämmönsiirrin on ohitettu, mutta tarvittaessa jäähdytysenergiaa saadaan suoraan geo-piiristä ns. ryöstökytkennällä vapaajäähdytykseen tarkoitetun pienemmän lämmönsiirtimen kautta. Vapaajäähdytys tarkoittaa sitä, että jäähdyttämiseen ei käytetä kompressorijäähdytystä, vaan jäähdytysenergia saadaan ympäristöstä. Ryöstökytkentä on otettu ennen lämpöpumppuja, joten vapaajäähdytyksellä tiloista poistettu lämpö nostaa geo-piirin lämpötilaa eli toisin sanoen vähentää lämpöpumppujen työmäärää halutun lämpötilan saavuttamiseksi.

Kesällä järjestelmä toimii jäähdytystoiminnolla. Geo-piirissä kiertävästä nesteestä siirretään lämpöä pois siten, että lämpöpumput ottavat lämpöä pois geo-piiristä ja siirtävät lämpöenergian lauhdutuspiiriin välityksellä kiinteistön katolle nestejäähdyttimille. Tämän prosessin seurauksena geo-piiri viilenee, ja sen jäähdytysenergiaa voidaan käyttää tilojen jäähdytykseen. Lauhdutuspiiriin lämpöenergia menee hukkalämmöksi ulkoilmaan, koska lämmitystarvetta ei ole kesällä. Joissain tapauksissa hukkalämpö voitaisiin hyödyntää käyttöveden lämmitykseen, mutta tässä tapauksessa on todettu, että hukkalämmön lämpötilataso ei ole siihen riittävä.

Kuvassa 1 näkyvät pelkistettynä laitoksen kaikki jäähdytyspuolen oleelliset komponentit ja verkostot. Geo-piirin havainnollistamista varten verkoston kiertoreitti näkyy väritettynä.



Kuva 1. Comfort-jäähdytyslaitoksen pelkistetty PI-kaavio.

## 2.2 Prosessikuvaus

Comfort-jäähdytyslaitos on laaja kokonaisuus, joka koostuu erillisestä valvomosta, yhdestä konehuoneesta, seitsemästä geo-kellarista, maalämpökentästä ja koko rakennuksen kauttaaltaan kulkevista jäähdytys- ja lämmitysverkostoista. Konehuoneessa sijaitsevat kaikki laitoksen pääkomponentit, lämpöpumput, isoimmat lämmönsiirtimet, keskipaikoispumput ja säätöventtiilit. Geo-kaivojen jakotukit ja niihin liittyvät lämmönsiirtimet

sekä geo-kellareihin liittyvä laitteisto on keskitetty rakennuksen kellariin ja jaettu seitsemään eri kokonaisuuteen, jotka ovat kaikki samanlaisia keskenään.

Comfort-jäähdytyslaitos kerää lämpöenergiaa kiinteistön alapuoliseen maaperään poraistuista energiakaivoista (maalämpökenttä). Kaivot ovat 140 mm halkaisijaltaan ja 300 metriä syviä. Kaivoihin asennetut keruupiirit ovat taipuisaa 40 mm paksua PELM-putkea. Jokaisessa kellarissa on ruostumattomasta teräksestä valmistetut 200 mm halkaisijaltaan olevat jakotukit, joihin on liitetty 22 kaivon keruuputkistot eli kaivoja on siis kaiken kaikkiaan 154 kappaletta.

Energiakaivojen lämmönsiirtonesteenä on erillinen 28 %:n etanoliseos, joka ei ole sisäisessä yhteydessä muiden verkostojen kanssa. Maaperästä saatava lämpöenergia siirretään lämmönsiirtimien välityksellä jokaisen geo-kellarin kautta kulkevaan geo-piiriin (lämpöpumpun höyrystinpiiri), joka menee konehuoneeseen lämpöpumpuille. Kuvassa 2 on yksi kiinteistön geo-kellareista. Huoneen seinustalla näkyvät keruupiirin jakotukit ja oikealla näkyy maalämpöpiirin lämmönsiirrin 1170LS01 sekä energiakaivojen latauslämmönvaihdin. Kuvan vasemmanpuoleinen lumensulatuksen lämmönvaihdin ei liity tähän järjestelmään.



Kuva 2. Comfort-jäähdytyslaitoksen geo-kellari.

Geo-piirin liuos kulkee lämpöpumppujen höyrystimien läpi. Lämpöpumppujen höyrystimet sitovat geo-piiristä saatavan lämmön lämpöpumpuissa olevaan kylmäaineeseen. Lämpöpumppujen kompressorikoneet puristavat kylmäaineen korkeampaan paineeseen, ja näin kylmäaine lämpenee noin 2 °C:n lämpötilasta noin 53 °C:seen. Kylmäaine lauhtuu lämpöpumppujen lauhduttimissa ja luovuttaa lämpöenergiaa järjestelmän lauhdutuspiiriin. Lauhtumisen jälkeen kylmäaine kulkee paineenalennusventtiilin läpi, ja kylmäaineen paine palaa takaisin samalle tasolle kuin se oli ennen kompressorin tekemää puristustyötä. Tämä kiertoprosessi on lämpöpumpun kylmäprosessi, ja se toistuu lämpöpumpun sisällä aina samanlaisena kiertokulkuna.

Lämpöpumppujen tekemän työn ansiosta geo-piiri luovuttaa lämpöä kylmäaineelle eli geo-piirin lämpötila laskee. Geo-piirin lämpötila laskee höyrystimien jälkeen 3–6 °C riippuen siitä, onko järjestelmä jäähdytys- vai lämmityskäytössä. Kesällä jäähdytyskaudella geo-piirin liuos on jäähtynyt noin 7 °C:seen ja luovuttaa kylmäenergiaa kiinteistön jäähdytysverkostolle lämmönsiirtimen välityksellä. Lämmönsiirtimen jälkeen lämmennyt geo-piirin liuos palaa takaisin geo-kellareihin jäähtymään.

### 2.2.1 Prosessikulku talviolosuhteissa

Talvella energiakaivoille menevän maalämpöpiirin 1170 menolämpötila on noin –1 °C. Energiakaivoissa neste lämpenee noin 3 °C, minkä jälkeen lämpö siirretään lämpöpumpun höyrystinpiirille 4100 lämmönsiirtimien välityksellä. Höyrystinpiirin noin –3 °C:n neste lämpenee lämmönsiirtimessä 1170LS01–1170LS07 noin 5 °C, minkä jälkeen neste siirretään putkistoa pitkin konehuoneeseen lämpöpumpuille (kuva 3).

Ennen höyrystimiä geo-piirin 4100 menoputkesta on otettu ryöstökytkentä vapaajäähdytykseen. Vapaajäähdytyksen lämmönsiirrin 4100LS02 siirtää lämpökuormaa jäähdytysverkostosta 4101 höyrystinpiiriin, mikäli jäähdytystä on tarvittu. Vapaajäähdytyksellä tiloista poistettu lämpöenergia lämmittää höyrystinpiiriä ja lämpö voidaan hyödyntää lämpöpumppujen prosessiin.

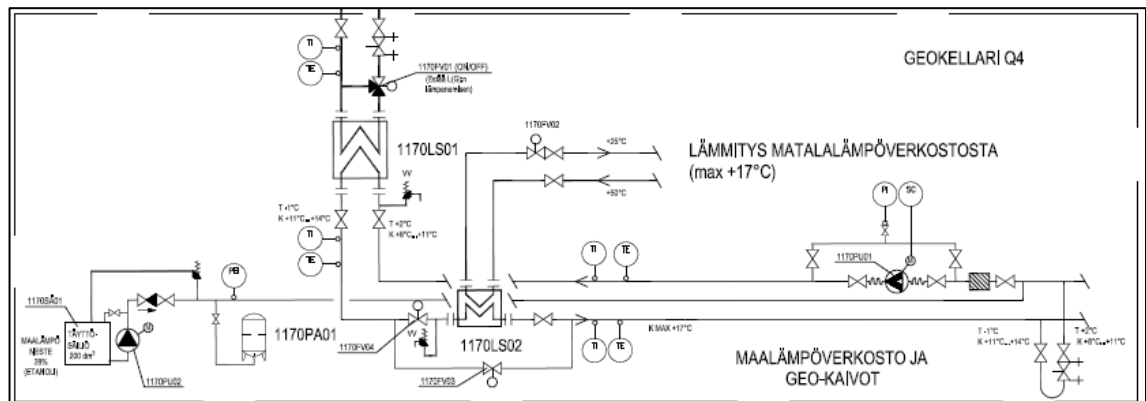
Geo-piirin keskipakoispumppuja 4100PU01.1 ja 4100PU01.2 ohjataan ylläpitäen vakio-paine-ero lämpöpumppujen höyrystimien yli. Asetusarvo tälle paine-erolle on talvella 1,5 bar. Höyrystimissä lämpöpumppujen LP1–LP4 kylmäaineet sitovat höyrystinpiiriin luovuttaman lämmön itseensä. Lämpöpumppujen kompressorit nostavat kylmäaineen

korkeampaan paineeseen ja kylmäaine lämpenee. Lämpöpumppujen lauhduttimissa kylmäaine luovuttaa lämpöä lauhdutuspiirille 4200. Lämmönsiirtimen 4200LS01 välityksellä lauhdepiirin lämpö siirretään kiinteistön matalalämpöverkoston 1172. Talvella lämpöpumppujen asetusarvot ovat säädetty matalalämpöverkoston menolämpötilan mukaan.

Lämmityskäytössä lämpöpumppujen höyrystimiltä palaava neste on noin  $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$ :n lämpöistä. Talvella moottoriventtiileiden 4100FV02.1 ja 4100FV02.2 ohjauksella ohitetaan jäähdytyksen lämmönsiirrin 4100LS01, minkä jälkeen neste kulkeutuu takaisin geo-kellareille lämpenemään.

### 2.2.2 Prosessikulku kesäolosuhteissa

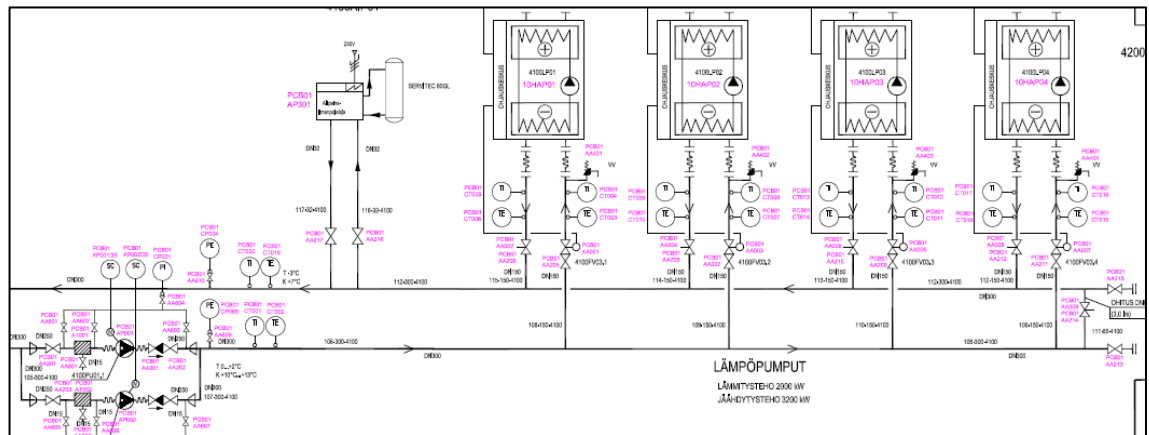
Kesällä energiakaivoilta palaavan maalämpöpiirin 1170 nesteen lämpötila on noin  $+11\text{--}14\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Taajuusmuuttajilla ohjatut keskipakoispumput kierrättävät maalämpöverkoston nesteen lämmönsiirtimille 1170LS01–1170LS07. Lämmönsiirtimissä maalämpöpiiri 1170 jäähdyttää geo-piiriä 4100. Lämmönsiirtimissä geo-piiri jäähtyy noin  $3\text{ }^{\circ}\text{C}$ , minkä jälkeen liuos kulkee putkia pitkin konehuoneeseen lämpöpumppujen höyrystimille. Kuvassa 3 on ote laitoksen PI-kaaviosta. Kuvassa näkyvät yhden geo-kellarin komponentit ja siihen liittyvät mittaus- ja säätölaitteet.



Kuva 3. Geo-kellarin komponentit PI-kaaviossa.

Geo-piirissä keskipakoispumppuja 4100PU01.1 ja 4100PU01.2 ohjataan taajuusmuuttajilla siten, että lämpöpumppujen LP01–LP04 yli vallitsee koko ajan vakio paine-ero. Asetusarvo tälle paine-erolle on kesällä  $1,9\text{ bar}$ . Pumput pyöriivät vuorotellen yksi kerrallaan. Kesällä lämpöpumppujen höyrystimille menevän nesteen lämpötila on noin  $+10\text{--}13\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Höyrystimissä lämpöpumppujen LP1–LP4 kylmäaineet sitovat höyrystinpiiriin luovuttaman lämmön itseensä. Lämpöpumppujen kompressorit nostavat kylmäaineen korkeampaan paineeseen ja kylmäaine lämpenee noin 50–55 °C:seen. Kesällä lämpöpumppuja ohjataan kiinteistön jäähdytysverkoston menolämpötilan mukaan. Lämpöpumppujen lauhduttimissa kylmäaine luovuttaa lämpöä lauhdutuspiirille 4200. Kuvassa 4 on ote laitoksen PI-kaaviosta. Kuvassa näkyvät geo-piiriin keskipakoispumpput 4100PU01.1 ja 4100PU01.2 sekä lämpöpumput LP01–LP04.

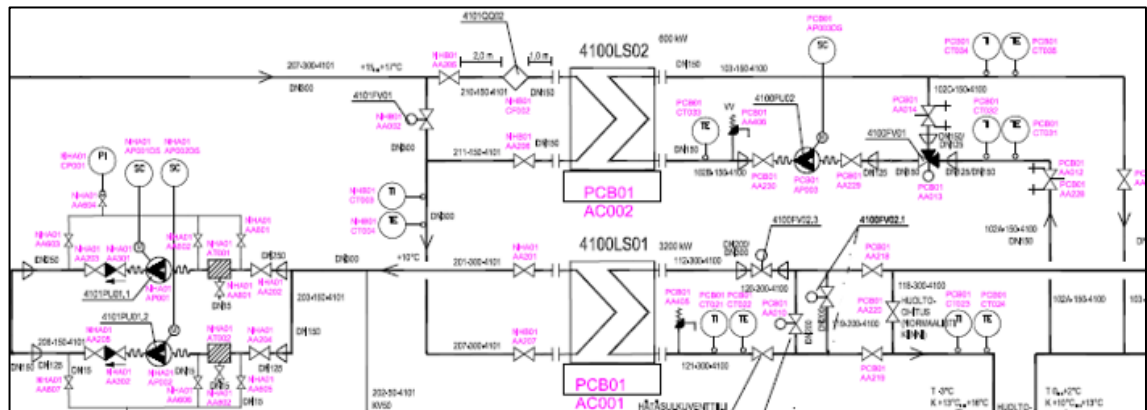


Kuva 4. Ote laitoksen PI-kaaviosta.

Kesällä kiinteistöä ei tarvitse lämmittää, joten kylmäprosessissa tuotettu lämpö siirretään kiinteistön katolle nestejäähdyttimille NJ01–NJ05, jotka luovuttavat lämpöenergian ulkoilmaan. Joissain tapauksissa lämpöenergia voitaisiin käyttää esimerkiksi käyttöveden lämmittämiseen, mutta tässä tapauksessa lauhdelämpö ei siihen riitä. Lämpöenergiaa voidaan siirtää matalalämpöverkostosta maalämpöpiiriin lämmönsiirtimen 1170LS02 välityksellä (kuva 3). Maalämpöpiiriä voidaan siis ladata, mutta kuitenkin siten, että kaivoille menevän liuoksen lämpötila on maksimissaan 17 °C. Maalämpöpiiriin lataus toteutetaan tarpeen mukaan manuaalisesti. Normaalisti latauksen lämmönsiirrin on ohitettu moottoriventtiin 1170FV03 kautta (kuva 3).

Jäähdytyskäytössä lämpöpumppujen höyrystimiltä palaava neste on jäähtynyt lämpöpumppujen kylmäprosessin ansiosta noin 5 °C. Höyrystimiltä palaava 7 °C:n lämpöinen neste jäähdyttää jäähdytysverkostoa 4101 konejäähdytyksen lämmönsiirtimen 4100LS01 välityksellä. Moottoriventtiilillä 4100FV02.3 säädetään lämmönsiirtimen läpi menevää virtausta. Moottoriventtiili avautuu, kun jäähdytysverkoston tehontarve kasvaa ja vastaavasti sulkenee tehontarpeen vähentyessä. Moottoriventtiileillä 4100FV02.1 ja

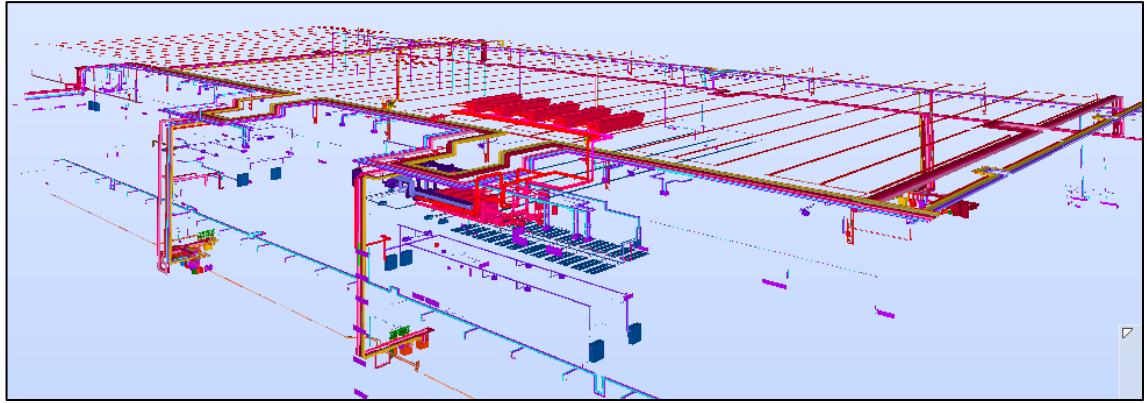
4100FV02.2 ohitetaan jäähdytyksen lämmönsiirrin, jos jäähdytystehoa ei tarvita. Kuvassa 5 on ote laitoksen PI-kaaviosta. Kuvassa näkyvät jäähdytysverkoston lämmönsiirtimek. Konejäähdytyksen lämmönsiirrin on 4100LS01 ja vapaajäähdytyksen lämmönsiirrin 4100LS02. Lämmönsiirtimien vasemmalla puolella näkyy kiinteistön jäähdytysverkosto 4101 ja jäähdytyksen kiertovesipumput. Jäähdytysverkoston nesteen lämpötila ennen lämmönsiirtimiä on noin 15 °C. Geo-piirin kylmäenergia jäähdyttää jäähdytysverkoston menolämpötilan 10 °C:seen.



Kuva 5. Ote laitoksen PI-kaaviosta.

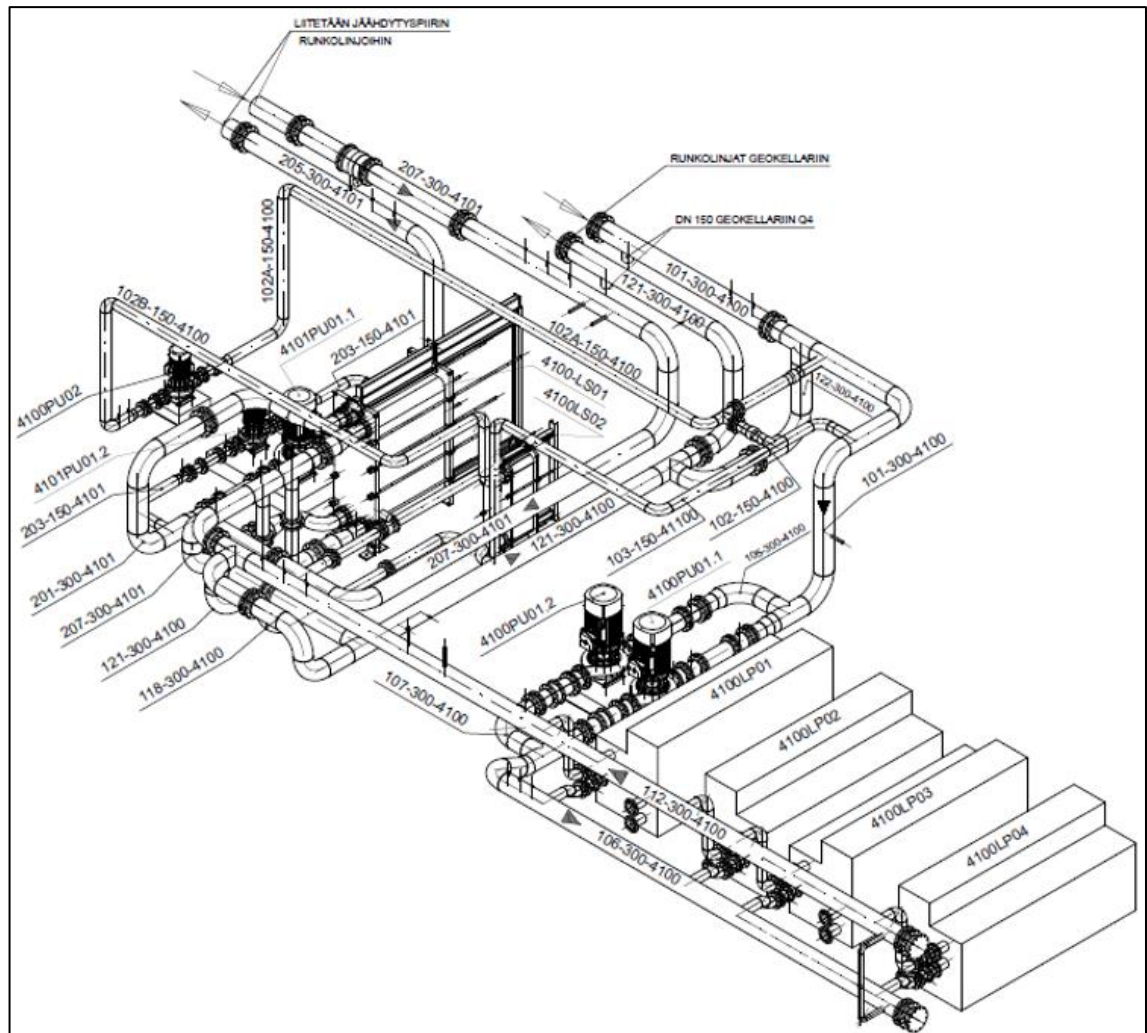
Konejäähdytyksen lämmönsiirtimen jälkeen kiinteistöstä poistettu lämpökuorma siirtyy geo-piiriin. Lämmönsiirtimen jälkeen geo-piirin neste palaa geo-kellareihin takaisin jäähdytymään.

Kuvassa 6 on ote Comfort-jäähdytyslaitoksen LVI-tietomallista. Kuvassa näkyy suurin osa verkostoista, jotka ovat kytköksissä Comfort-jäähdytyslaitokseen. Kuva havainnollistaa, kuinka laajalle alueelle jäähdytyslaitos on hajautettu. Keskellä kuvaa näkyy viisi nestejäähdytintä ja sen alapuolella näkyy laitoksen konehuone. Myös kaksi geo-kellareista näkyy tietomallissa alhaalla vasemmalla. Poikittain kulkevat punaiset viivat ovat säteilypaneelleita, jotka viilentävät rakennuksen tiloja.



Kuva 6. Comfort-jäähdytyslaitoksen tietomalli.

Kuvassa 7 on 3d-piirroskuva Comfort-jäähdytyslaitoksen konehuoneesta. Piirroksessa näkyvät laitoksen geo-piirin keskipakoispumput 4100PU01.1 ja 4100PU01.2, lämpöpumput LP01-LP04 sekä jäähdytysverkoston konejäähdytyksen lämmönsiirrin 4100LS01 ja vapaajäähdytyksen lämmönsiirrin 4100LS02.



Kuva 7. 3d-piirros Comfort-jäähdytyslaitoksen konehuoneesta.

## 2.3 Pääkomponentit

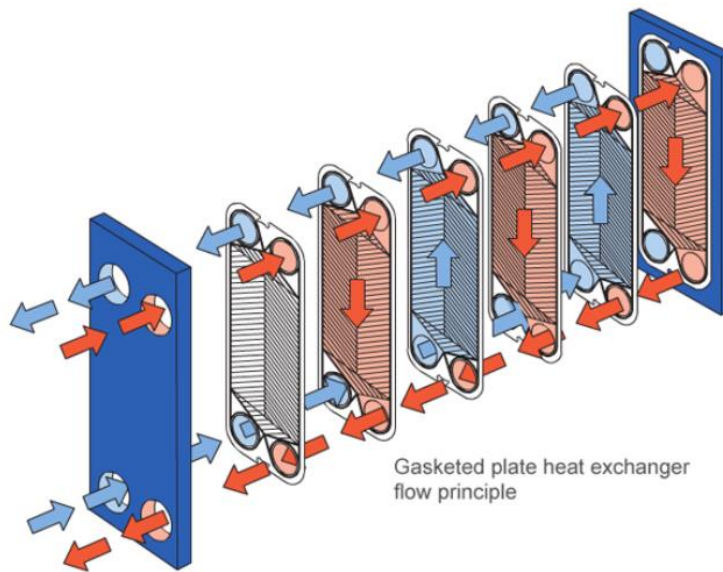
Tässä alaluvussa esitellään geo-piiriin liittyvät pääkomponentit.

### 2.3.1 Lämmönsiirtoneste

Geo-piirin lämmönsiirtonesteenä on 30 %:n etyleeniglykoliliuos. Etyleeniglykoli on paljon käytetty alkoholi jäähdytysjärjestelmissä, joissa tarvitaan pakkaskestävyyttä. Se liukenee helposti veteen. Etyleeniglykolia käytetään silloin, kun lämmönsiirtonesteelle ei ole asetettu vaatimuksia myrkyllisyyden suhteen. Etyleeniglykoli on makean makuinen, hajuton ja kirkas neste. Makealle maistuva neste saattaa vaikuttaa harmittomalta, mutta etyleeniglykoli on myrkyllistä. Jo 50 ml:n annos nieltynä riittää tappamaan aikuisen ihmisen. [1]

### 2.3.2 Lämmönsiirtimet

Lämmönsiirtimien avulla siirretään lämpöä toisesta järjestelmästä ilman, että väliaineet sekoittuvat. Lämpö siirtyy aina lämpimästä kylmempään eli aina jompikumpi nesteistä lämpenee ja toinen jäähtyy. Päätylevyjen sisällä on satoja ohuita levyjä, jotka on nidottu siten, että jokaisen levyn molemmin puolin kulkee eri neste. Suuren lämmönsiirtopinta-alan vuoksi lämpö saadaan siirtymään toiseen nesteeseen todella tehokkaasti. Yleensä lämmönsiirtimet ovat vastavirtaisia lämmönsiirtimiä. Tämä tarkoittaa sitä, että nesteet kulkevat lämmönsiirtimessä vastakkain kuvan 8 periaatteen mukaisesti.



Kuva 8. Levylämmönsiirtimen virtausperiaate [2].

Geo-piirin lämmönsiirtimet ovat tiivisteellisiä levylämmönsiirtimiä. Jokaisessa geo-kellarissa on yksi geo-piirin lämmönsiirrin. Nämä lämmönsiirtimet siirtävät lämpöenergiaa geo-piirin ja maalämpökaivojen keruuputkistojen välillä. Näistä lämmönsiirtimistä jokainen on teholtaan 265 kW.

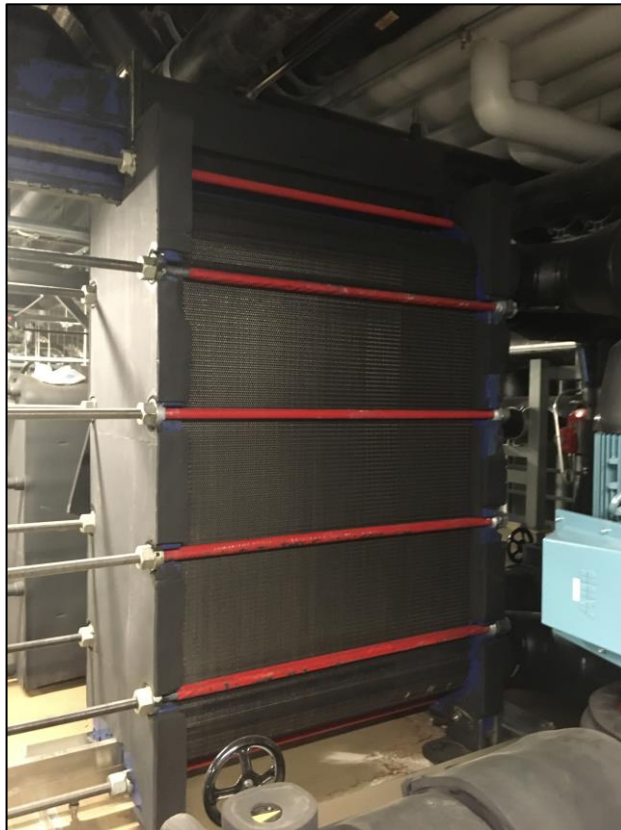
Jäähdytyksen isoin lämmönsiirrin on teholtaan 3 200 kW. Tämä massiivinen lämmönsiirrin on yli kolme metriä korkea ja noin metrin levyinen. Tehoa tällaisella lämmönsiirtimellä riittäisi noin 530 omakotitalon jäähdyttämiseen.

Taulukossa 1 on esitetty suunnitelman mukaiset mitoitusarvot konejäähdytyksen lämmönsiirtimelle.

Taulukko 1. Konejäähdytyksen lämmönsiirtimen mitoitusarvot.

Lämmönsiirrin	4100LS01	
Teho	3200	kW
Ensiö-virtaama	130	dm <sup>3</sup> /s
Tulovesi	7	°C
Paluuvesi	17	°C
Painehäviö	15	kPa
Toisiovirtaama	127	dm <sup>3</sup> /s
Tulo	10	°C
Paluu	16	°C
Nesteen painehäviö	15	kPa

Kuvassa 9 näkyy konejäähdytyksen lämmönsiirrin.



Kuva 9. Konejäähdytyksen lämmönsiirrin 4100LS01.

Taulukossa 2 on esitetty suunnitelman mukaiset mitoitusarvot vapaajäähdytyksen lämmönsiirtimelle.

Taulukko 2. Vapaajäähdytyksen lämmönsiirtimen mitoitusarvot.

Lämmönsiirrin	4100LS02	
Teho	600	kW
Ensiö-virtaama	26,3	dm <sup>3</sup> /s
Tulovesi	+5	°C
Paluuvesi	+11	°C
Painehäviö	15	kPa
Toisiovirtaama	24	dm <sup>3</sup> /s
Tulo	+10	°C
Paluu	+16	°C
Nesteen painehäviö	15	kPa

Vapaajäähdytyksen lämmönsiirrin on teholtaan 600 kW. Tällä lämmönsiirtimellä jäähdytetään tiloja talvella, jos jäähdytystä tarvitaan. Kuvassa 10 näkyy vapaajäähdytyksen lämmönsiirrin. Lämmönsiirrin on eristetty solukumilla lämpöhäviön ja kondensoitumisen estämiseksi.



Kuva 10. Vapaajäähdytyksen lämmönsiirrin.

### 2.3.3 Lämpöpumput

Lämpöpumppu koostuu höyrystimestä, kompressorista, lauhduttimesta ja paineenalennusventtiilistä. Näiden pääkomponenttien kautta lämpöpumpun kylmäaine kulkee. Höyrystimessä kylmäaine sitoo lämpöä itseensä. Sen jälkeen tämä höyrystynyt kylmäaine puristetaan korkeampaan paineeseen, ja kylmäaineen lämpötila nousee. Lauhduttimessa kylmäaine luovuttaa lämpöenergiansa lauhdepiiriin, minkä jälkeen kylmäaineen paine laskee sen virratessa paineenalennusventtiilin läpi. Tämä sama kiertoprosessi tapahtuu lämpöpumpun sisällä samanlaisena kiertokulkuna.

Taulukossa 3 on esitetty suunnitelman mukaiset lämpöpumppujen mitoitusarvot.

Taulukko 3. Lämpöpumppujen mitoitusarvot.

Lämpöpumput	4100LP01–4100LP04	
Kylmäaine	R134a	
Cop lämmityksessä	2,91	
Lämmitysteho (talvi)	864	kW
Jäähdytysteho (kesä)	850	kW
Liuoksen lämpötila (kesä)	+15/ +55	°C
Liuoksen lämpötila (talvi)	+2/–3	°C
Jäähdytysliuoksen virtaama (kesä)	38,2	dm <sup>3</sup> /s
Jäähdytysliuoksen virtaama (Talvi)	30,6	dm <sup>3</sup> /s
Lauhd.liuos lämpötila (kesä)	+38/+44	°C
Lauhd.liuos lämpötila (Talvi)	+55/+46	°C
Lauhd.liuos virtaama (kesä)	48,4	dm <sup>3</sup> /s
Lauhd.liuos virtaama (Talvi)	25,3	dm <sup>3</sup> /s
Liitosteho	296	kW
Höyrystimen Max painehäviö (kesä)	82	kPa
Höyrystimen Max painehäviö (Kesä)	64	kPa

Kuvassa 11 on Comfort-jäähdytyslaitoksen yksi lämpöpumpuista. Laitoksen kaikki lämpöpumput ovat puolihhermeettisiä ruuvikompressoreita. Jokaista lämpöpumppua ohjataan manuaalisesti. Lämpöpumpun asetukset lämmitys- tai jäähdytyskäytölle muutetaan manuaalisesti lämpöpumppujen ohjauspaneelista.



Kuva 11. Comfort-jäähdytyslaitoksen lämpöpumppu.

#### 2.3.4 Keskipakoispumput

Keskipakoispumppu on LVI-tekniikassa eniten käytetty pumpputyyppe. Keskipakoispumppu imee nesteen pumpun sisään keskiosasta, ja juoksupyörän pyöriessä neste siirtyy ulos ulkokehän kautta eteenpäin. Keskipakoispumput 4100PU01.1 ja 4100PU01.2 ovat geo-piirin keskipakoispumput. Nämä pumput pumppaavat geo-piirin nesteen geokellareista lämpöpumppujen höyrystimille. Pumput näkyvät kuvassa 12.



Kuva 12. Geo-piirin keskipakoispumput 4100PU01.1 ja 4100PU01.2.

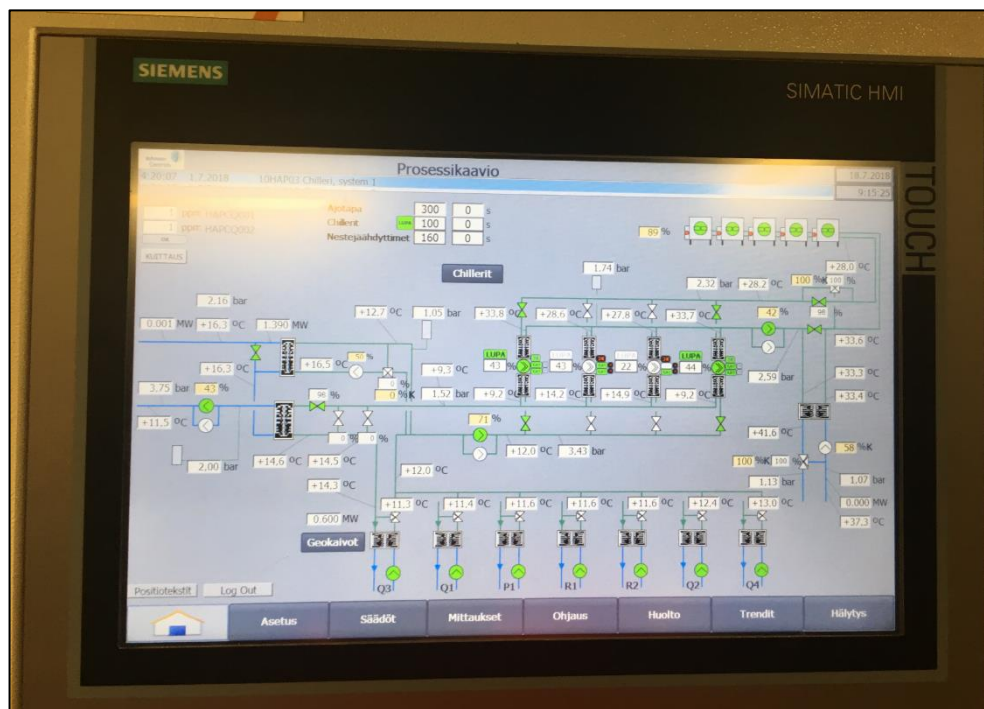
## 2.4 Valvomo

Laitoksen toimintaprosessia seurataan valvomosta. Kuvassa 13 näkyvät valvomon näytöt, joista seurataan prosessia. Prosessien seurantaohjelmalla toimii Citect-valvomo-ohjelmisto.



Kuva 13. Kuva laitoksen valvomosta.

Kuvassa 14 on Comfort-jäähdytyslaitoksen kosketusnäyttöllinen ohjauspaneeli. Paneelista nähdään prosessissa käynnissä olevat laitteet ja laitteiden toiminta-aste.



Kuva 14. Siemens-ohjauslogiikan kosketusnäyttöpaneeli konehuoneessa.

### 3 Säätölaskenta

Laitoksen valmistuttua huomattiin, että maalämpöpiirin lämmönsiirtonesteen lämpötila ei laske juurikaan nollan alapuolelle. Geo-piiriin on ajettu 30 %:n etyleeniglykoli, jonka pakaskestävyys on  $-15,8\text{ °C}$ . Verkostoon ajettun nesteen pitoisuus on siis liian suuri. Laimemman nesteen aineominaisuudet ovat paremmat, ja tämä alentaisi pumppausenergian kulutusta. Nesteen vaihto verkostoon on kuitenkin kallista, joten on tutkittava, onko nesteen vaihto kannattavaa. Tämän työn tarkoituksena oli laskea, kuinka paljon pumppauskustannukset laskisivat, onko nesteen laimentaminen tai vaihtaminen kannattavaa ja saadaanko operaatiolle järkevä takaisinmaksuaika.

Tässä luvussa esitellään pumppausenergian laskentayhtälöt.

Jäähdytysjärjestelmän teho riippuu jäähdytettävien tilojen jäähdytystarpeesta. Tehot mitoitetaan Suomen rakentamismääräyskokoelman osan D2 mukaan siten, että huoneiden lämpötila ei ylitä  $+23\text{ °C}$  [3, s. 6]. Kun jäähdytyksen mitoitettava teho tiedetään, saadaan

siitä laskettua tarvittava nesteen virtaus yhtälöllä 1 [4]. Mitoituksessa meno- ja paluuvien lämpötilaerona käytetään yleensä 5 °C siten, että menolämpötila on 10 °C ja paluulämpötila 15°C.

$$q_v = \frac{\Phi}{\rho \cdot c_p \cdot (t_2 - t_1)} \quad (1)$$

$q_v$	on tilavuusvirta, dm <sup>3</sup> /s
$\Phi$	on teho, kW
$\rho$	on virtaavan aineen tiheys, kg/dm <sup>3</sup>
$c_p$	on ominaislämpökapasiteetti, kJ/(kg·°C)
$t_1$	on menoveden lämpötila, °C
$t_2$	on paluuvien lämpötila, °C

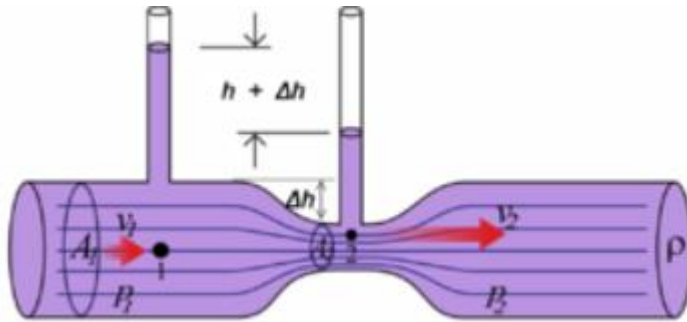
Toisiopiiriin (jäähdytysverkosto) jäähdytysenergia siirtyy ensiöpiiristä (geo-piiri) konvektion avulla lämmönsiirtimessä ilman, että fluidit sekoittuvat keskenään (kuva 8). Ensiö- ja toisiopiirien fluideilla on eri aineominaisuudet ja lämpötilat. Tämän vuoksi niillä on myös eri tilavuusvirrat. Koska lämmönsiirtimen teho on aina yhtä suuri fluideille molemmin puolin lämmönsiirintä, voidaan ajatella, että teho  $\Phi_1 = \Phi_2$ . Lämmönsiirtimessä tapahtuu lämpöhäviötä, mutta se on niin pientä, että se voidaan jättää huomioimatta. Ensiöpiirin tilavuusvirta voidaan myös johtaa yhtälöstä 1. Tämä laskettu ensiöpiiriin virtaama on laskennallinen maksimivirtaama, joka kiertopumppujen täytyy tuottaa. Pumppujen paineenkorotus lasketaan tämän maksimivirtaaman mukaan. Jotta neste kiertäisi putkiston jokaisessa osassa, on pumppujen paineenkorotus oltava sellainen, että se voittaa kaikki verkostossa esiintyvät virtausvastukset. Tämä tarkoittaa käytännössä sitä, että pumpun paineenkorotuksen on oltava yhtä suuri kuin verkoston vaikeimman reitin aiheuttama painehäviö. Vaikein reitti on se reitti, jossa tapahtuu eniten painehäviötä.

Virtaukseen pätee Bernoullin laki

$$p_1 + \rho g h_1 + \frac{1}{2} \rho v_1^2 = p_2 + \rho g h_2 + \frac{1}{2} \rho v_2^2, \quad (2)$$

jossa  $p$  on paine (Pa),  $\rho$  on virtaavan nesteen tiheys (kg/m<sup>3</sup>),  $h$  on hydrostaattinen korkeus (m) ja  $v$  on nesteen virtausnopeus (m/s) [5].

Bernoullin laki esiintyy esimerkiksi virtausmittarina toimivan venturiputken toiminnassa (kuva 15). Venturiputkessa virtausnopeus kasvaa keskiosassa, ja paine pienenee. Mittausyhteistä mitattavan paine-eron avulla saadaan erittäin tarkasti mitattua virtaavan nesteen nopeus.



Kuva 15. Venturiputki [6].

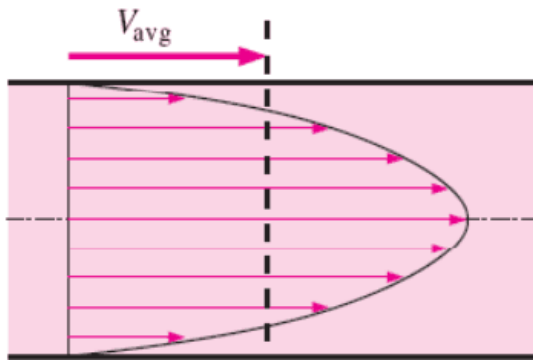
Todellisessa virtauksessa putken kokonaispaine ei pysy vakiona, vaan vähenee koko ajan nesteen virratessa putkistossa. Yhtälöön 2 täytyy lisätä putkistossa syntyvä painehäviö  $\Delta p$  (Pa), eli yhtälö muuttuu yhtälön 3 mukaiseksi [5].

$$p_1 + \rho g h_1 + \frac{1}{2} \rho v_1^2 = p_2 + \rho g h_2 + \frac{1}{2} \rho v_2^2 + \Delta p \quad (3)$$

Painehäviötä aiheuttaa kitka, joka syntyy kulkevan nesteen hangatessa putken seinämiä vasten. Aivan putken sisäseinämässä kiinni olevan nesteen virtausnopeus on likimain 0 m/s, ja suurin nopeus on aina putken keskikohdassa. Kuvasta 16 huomataan, että kitkan aiheuttama nopeuden muutos saa aikaan paraabelin muotoisen virtauksen. Painehäviölaskelmissa käytetään virtauksen keskinopeutta. Virtauksen keskinopeus saadaan yhtälöllä 4.

$$v_k = q_v / A, \quad (4)$$

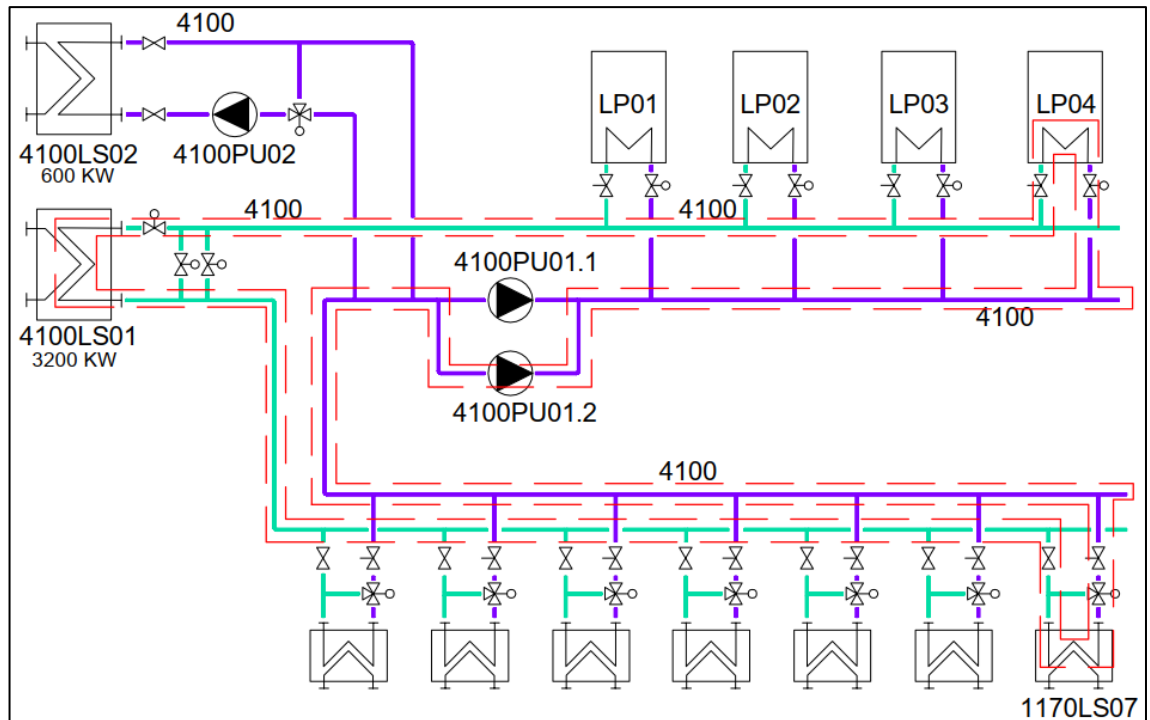
jossa  $v_k$  on virtauksen keskinopeus (m/s),  $q_v$  on tilavuusvirta ( $\text{m}^3/\text{s}$ ) ja  $A$  on putken poikkipinta-ala ( $\text{m}^2$ ).



Kuva 16. Virtauksen profiili putkessa [7].

Putkistossa esiintyy erikokoisia putkia, eri nopeuksia ja tilavuusvirtoja. Jotta painehäviöt pystytään laskemaan, verkosto täytyy jakaa yhtenäisiin putkiosuuksiin, joilla on sama putkihalkaisija ja sama tilavuusvirta. Käytännössä tämä tarkoittaa sitä, putkiosuus alkaa aina haarautuvasta osasta ja päättyy juuri ennen kuin putki haarautuu seuraavan kerran. Tällöin kyseisellä putkiosuudella on aina sama halkaisija, nopeus ja tilavuusvirta.

Pumpun paineenkorotuksen saamiseksi kaikkia verkoston putkiosuuksia ei lasketa yhteen, vaan ainoastaan sen virtausreitit, jonka virtausreitti on vaikein (suurin painehäviö). Muut verkoston virtausreitit tasapainotetaan aina vaikeimman reitin mukaan siten, että painehäviö on yhtä suuri kaikkien virtausreittien kautta. Muiden virtausreitteihin painehäviötä lisätään kertosäätöventtiileiden avulla siten, että venttiili aiheuttaa painehäviötä sen verran, että haarakohdassa painehäviötä on yhtä paljon haaran molempien virtausreittien kautta. Tässä opinnäytetyössä ei kuitenkaan keskitytä verkoston tasapainottamiseen liittyviin tekijöihin tämän enempää. Kuvassa 17 on havainnollistettu esimerkki vaikeimmasta virtausreitistä. Vaikein virtausreitti on esitetty kuvassa punaisella katkoviivalla.



Kuva 17. Verkoston vaikein virtausreitti rajattu punaisella katkoviivalla.

Verkoston kokonaispainehäviö lasketaan yhtälöllä 5, jossa on huomioitu suoran putken ja kertavastusten aiheuttamat painehäviöt [5]. Näihin painehäviöihin perehdytään tarkemmin seuraavissa alaluvuissa.

$$\Delta p = \Delta p_{\lambda} + \Delta p_{\zeta} = \left( \frac{\lambda \cdot l}{d_s} + \sum \zeta \right) \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \quad (5)$$

### 3.1 Putken painehäviöt

Suoran putken painehäviöt lasketaan Darcy–Weisbachin yhtälöllä (yhtälö 6).

$$H = \lambda \cdot \frac{l}{d_s} \cdot \frac{v^2}{2g} \quad (6)$$

Yhtälön painehäviö on ilmoitettu hydrostaattisena paineena vesipatsaan muodossa (m) [8]. Yhtälössä  $\lambda$  on kitkakerroin,  $l$  on putken pituus (m),  $d_s$  on putken sisähalkaisija (m),  $v$  on nesteen virtausnopeus (m/s),  $g$  on putoamiskiihtyvyys (m/s<sup>2</sup>). Nesteen tiheys on huomioitu jo valmiina veden hydrostaattisessa korkeudessa. Comfort-jäähdytyslaitoksen maalämpöpiirissä lämmönsiirtonesteena on etyleeniglykoli. Glykolin tiheys on suurempi

kuin vedellä, joten on helpompi huomioida tiheys yhtälössä (yhtälö 7).

$$\Delta p_{\lambda} = \lambda \cdot \frac{l}{d_s} \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \quad (7)$$

$\Delta p_{\lambda}$	on painehäviö, Pa
$\lambda$	on kitkakerroin
$l$	on putken pituus
$d_s$	on putken halkaisija, m
$\rho$	on virtaavan nesteen tiheys, kg/m <sup>3</sup>
$v$	on virtaavan nesteen nopeus, m/s

Virtaavalle nesteelle pitää laskea virtausnopeus. Virtausnopeus kasvattaa painehäviötä ja liian suuri nopeus aiheuttaa liiallisia runkoääniä verkostossa. Lämmitys- tai jäähdytysverkoston putkikokojen mitoituksessa 50 Pa/m on hyvä mitoituskriteeri, tällöin virtaus ei aiheuta ääniongelmia ja näin verkostolle saadaan riittävän pitkä elinkaari. Virtausnopeus putkessa lasketaan yhtälöllä 8. [9]

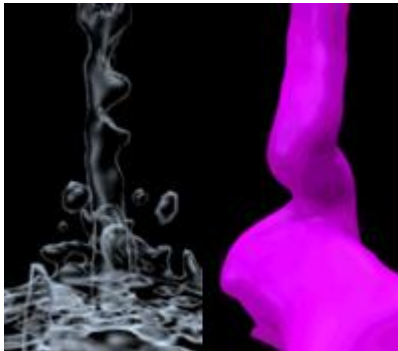
$$v = \frac{4 \cdot q_v}{\pi \cdot d^2} \quad (8)$$

$v$	on aineen virtausnopeus, m/s
$q_v$	on tilavuusvirta, m <sup>3</sup> /s
$d$	on putken sisähalkaisija, m

Darcy Weisbachin kitkakerroin ( $\lambda$ ) tai pelkkä kitkakerroin on dimensioton suure.

Kitkakerrointa ei voida laskea vain yhdellä yhtälöllä, vaan sitä täytyy tarkastella eri tavalla eri virtauslajeissa. Kitkakerroin riippuu virtauslajista, jonka määrittää Reynoldsin luku ja putken suhteellinen karheus ( $k/d$ ). Suhteellinen karheus on karheuskertoimen ja putken halkaisijan suhdeluku. [5]

Reynoldsin luku on dimensioton suhdeluku, joka kertoo virtaavan aineen virtauslajin. Reynoldsin luku riippuu aineen nopeudesta ja viskositeetistä suhteutettuna putkihalkaisijaan. Esimerkiksi samankokoisessa putkessa kulkevalla juoksevalla vedellä on huomattavasti pienempi Reynoldsin luku kuin notkealla öljyllä. Viskositeetti kertoo fluidin kyvystä vastustaa virtausta. Toisin sanoen viskositeetti kertoo siitä, kuinka juoksevaa aine on. Kuvassa 18 on havainnekuva kahden eri aineen käyttäytymisestä, kun aineita kaadetaan astiaan. Kirkas aine on juoksevaa vettä, ja violetti aine on notkeaa geeliä, jolla on todella korkea viskositeetti.



Kuva 18. Vertauskuva. Vedellä alhainen viskositeetti ja geelillä korkea viskositeetti [10].

Reynoldsin luku saadaan laskettua yhtälöllä 9 [5].

$$Re = \frac{d_h \cdot v}{\nu} \quad (9)$$

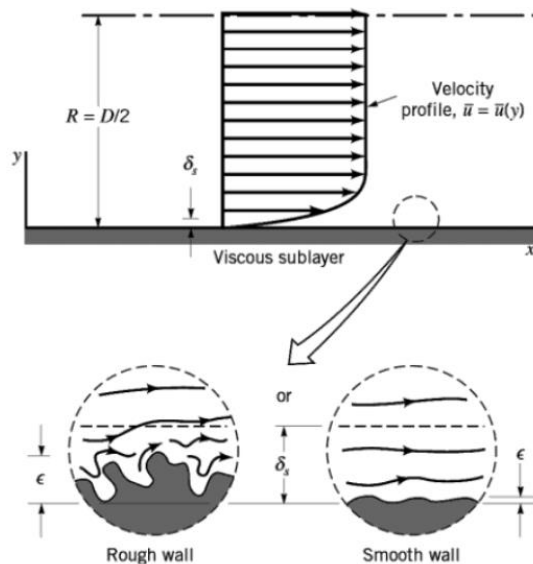
- Re on Reynoldsin luku
- $d_h$  on putken hydraulinen halkaisija, m
- $v$  on keskimääräinen virtausnopeus, m/s
- $\nu$  on kinemaattinen viskositeetti, m<sup>2</sup>/s

Jos Reynoldsin luku on pienempi kuin 2 320, virtaus on laminaarinen. Laminaarisessa virtauksessa kitkakerroin lasketaan yhtälöllä 10 [5].

$$\lambda = \frac{64}{Re} \quad (10)$$

- $\lambda$  on kitkakerroin
- Re on Reynoldsin luku

Putken karheuskerroin riippuu materiaalista. Jos putken sisäseinämä on sileä, karheuskertoimen vaikutus on todella pieni. Karheapintaisilla putkilla, kuten betoniputkilla, karheuskerroin on suuri, ja silloin putkimateriaalilla on suuri vaikutus putkiston painehäviöön. Paineellisissa verkostoissa käytetään kuitenkin sileitä putkia, joiden karheuskerroin on tyypillisesti 0,0015–0,05 mm [11]. Kuvassa 19 on havainnekuva siitä, miten virtaus käyttäytyy eri tavalla karheassa ja sileässä putkessa.



Kuva 19. Havainnekuva karhean ja sileän putken seinämistä [11].

Taulukossa 4 on esitelty tyypillisiä LVI-järjestelmissä käytettävien materiaalien karheuskertoimia.

Taulukko 4. Karheuskertoimia eri putkimateriaaleille [12, s. 12].

Surface Material	Absolute Roughness Coefficient - k in mm
Aluminum, Lead	0.001 - 0.002
Drawn Brass, Drawn Copper	0.0015
Aluminum, Lead	0.001 - 0.002
PVC, Plastic Pipes	0.0015
Fiberglass	0.005
Stainless steel	0.015
Steel commercial pipe	0.045 - 0.09
Stretched steel	0.015
Weld steel	0.045
Galvanized steel	0.15
Rusted steel	0.15 - 4
Riveted steel	0.9 - 9
New cast iron	0.25 - 0.8
Worn cast iron	0.8 - 1.5
Corroding cast iron	1.5 - 2.5
Asphalted cast iron	0.012
Galvanized iron	0.015
Smoothed cement	0.3
Ordinary concrete	0.3 - 3
Well planed wood	0.18 - 0.9
Ordinary wood	5

Turbulentisessa virtauksessa kitkakertoimen määrittäminen on monimutkaisempaa kuin laminaarisessa virtauksessa. Turbulenttisen virtauksen karheustyytit jaetaan pääsääntöisesti kolmeen eri karheustyyppiin [5].

- Hydraulisesti sileät johdot ( $Re \cdot \frac{k}{d} < 65$ )
- Hydraulisesti karheat johdot ( $Re \cdot \frac{k}{d} < 1300$ )
- Hydraulisesti sileiden ja karheiden johtojen ( $65 < Re \cdot \frac{k}{d} < 1300$ )

Hydraulisesti sileille johdoille kitkakerroin voidaan laskea Blasiusen yhtälöllä 11, kun Reynoldsin luku on  $2320 < Re < 10^5$  [5].

$$\lambda = 0,3164 \cdot Re^{-0,25} \quad (11)$$

$\lambda$  on kitkakerroin

Re on Reynoldsin luku

Nikuradsen yhtälöllä 12, kun Reynoldsin luku on  $10^5 < Re < 10^6$  [5].

$$\lambda = 0,0032 + 0,221 \cdot Re^{-0,237} \quad (12)$$

Prandtl-Karmanin yhtälöllä 13, kun Reynoldsin luku  $Re > 10^6$  [5].

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 2 \cdot \lg \frac{Re \cdot \sqrt{\lambda}}{2,51} \quad (13)$$

Nikuradsen yhtälöllä 14, kun  $Re \cdot k/d > 1300$  [5].

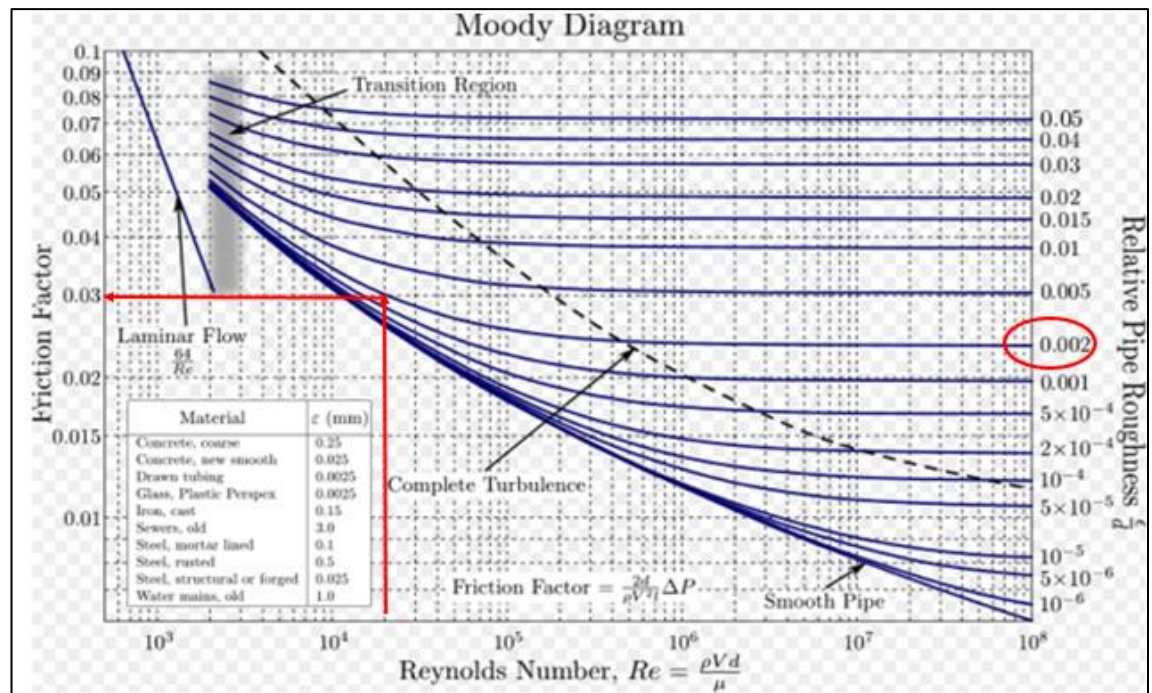
$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 2 \cdot \lg \frac{3,71}{\frac{k}{d}} \quad (14)$$

- $\lambda$  on kitkakerroin
- $k$  on karheuskerroin, mm
- $d$  on putken halkaisija, mm

Moodyn yhtälöllä 15 [5].

$$\lambda = 0,0055 \cdot 0,15 \cdot \frac{k}{d}^{0,333} \quad (15)$$

Kitkakertoimen laskeminen on työlästä, joten työelämässä käytetään usein apuna taulukoita aina kun mahdollista. Moodyn diagrammista saadaan kitkakerroin, kun Reynoldsin luku ja putken suhteellinen karheus tiedetään. Diagrammista katsotaan kohta, jossa laskettu Reynoldsin luku kohtaa putken suhteellisen karheuden kuvaajan. Tästä leikkauspisteestä vedetään viiva vaakasuorassa vasemmalle ja luetaan kitkakerroin (kuva 20).



Kuva 20. Moodyn diagrammi kitkakertoimen määrittämiseen [13].

Jos kuitenkin halutaan laskea kitkakerroin, työelämässä Prandtl-Colebrookin yhtälöllä 16 saadaan laskettua kitkakerroin riittävällä tarkkuudella koko turbulentsille alueelle [5].

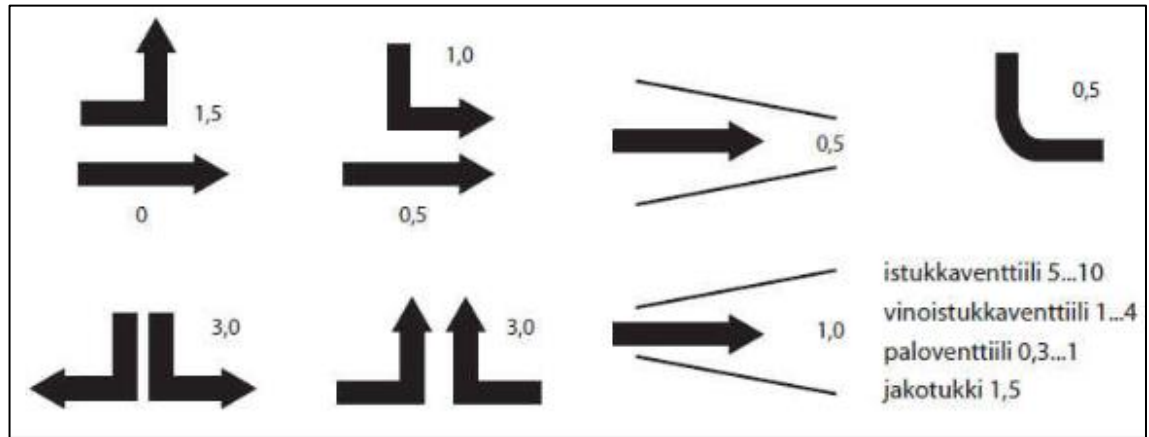
$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \cdot \lg \left[ \frac{2,51}{Re\sqrt{\lambda}} + \frac{k}{3,71d} \right] \quad (16)$$

- $\lambda$  on kitkakerroin
- Re on Reynoldsin luku
- k on karheuskerroin, mm
- d on putken halkaisija, mm

### 3.2 Putkiosien painehäviöt

Putkien lisäksi painehäviötä aiheuttaa suunnanmuutokset ja putkiston venttiilit. Putkiosien painehäviöt yleensä lasketaan käyttämällä kertavastuksia. Putkireitin osien kaikki kertavastukset lasketaan yhteen ja kerrotaan sitten putkiosuuden virtauksen dynaamisella paineella (yhtälö 17) [5].

Kertavastuksien arvot riippuvat siitä, onko kyseessä avoin järjestelmä (käyttövesi) vai suljettu järjestelmä (jäähdytys- tai lämmitysverkosto). Kuvasta 21 huomataan, miten kertavastukset riippuvat siitä, mistä suunnasta t-haaraa virtaus tulee ja mihin se on menossa.



Kuva 21. Suunnanmuutoksien kertavastukset [14].

Putkiston suunnanmuutoksien ja venttileiden aiheuttama painehäviö voidaan laskea yhtälöllä 17 [5].

$$\Delta p_{\zeta} = \sum \zeta \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \quad (17)$$

$\Delta p_{\zeta}$  on kertavastuksien aiheuttama painehäviö, Pa

$\zeta$  on kertavastuskerroin

$\rho$  on virtaavan nesteen tiheys, kg/m<sup>3</sup>

$v$  on virtausnopeus, m/s

Putken halkaisija vaikuttaa merkittävästi putkiosien painehäviöön. Peruskokoisissa järjestelmissä osien painehäviöt saadaan laskettua kertavastuksia käyttämällä riittävän tarkasti. Kuitenkin järjestelmissä, joissa putkikoot ovat luokkaa 100–300 mm tai siitä ylöspäin, kertavastuksilla lasketut painehäviöt olisi laskettu todellista tilannetta merkittävästi suuremmiksi.

Kertavastuksilla laskettaessa aineominaisuuksien, kuten viskositeetin, muuttuminen jää kokonaan huomioimatta, koska yhtälössä 17 ei ole ollenkaan huomioitu kitkakerrointa.

Jotta pitoisuuden laimentamisesta johtuva painehäviöiden aleneminen tulisi huomioitua myös putkiosien osalta, tulee osien painehäviöt laskea käyttämällä ekvivalenttisia putkipituuksia.

Koska putken osien painehäviö on myös verrannollinen dynaamiseen paineeseen, voidaan putkiosien painehäviöt laskea ekvivalenttisen putkipituuden avulla [5]. Tämä tarkoittaa sitä, että putkiosien painehäviöiden laskennassa osille määritetään pituus, joka vastaa suoran putken painehäviötä eli

$$\lambda \cdot \frac{l_{ekv}}{d_s} \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 = \zeta \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2. \quad (18)$$

Taulukossa 5 on putkiosien ekvivalenttisia putkipituuksia suhteutettuna putken halkaisijaan.

Taulukko 5. Putkiosien ekvivalenttisia pituuksia suhteutettuna putken halkaisijaan,  $(L/D)_{EQ}$  [15].

No.	Item name & type	Condition	$(L/D)_{EQ}$	No.	Item name & type	Condition	$(L/D)_{EQ}$
1	Globe valve			6	Butterfly valve	Fully open	40
	A Plug type seat	Fully open	340				
	B No bevel w/pin guide	Fully open	450	7	Cock valve		
	C Y patern 60 degrees	Fully open	175	A	Straight	Fully open	18
	D 45 degrees	Fully open	145	B	Three way, straight flow	Fully open	44
				C	Three way, to branch	Fully open	140
2	Angle valve						
	A Plug type seat	Fully open	145	8	Elbow		
	B No bevel w/pin guide	Fully open	200	A	LR 90 degrees		20
				B	SR 90 degrees		30
3	Gate valve			C	SR 45 degrees		16
	A Wedge, double, plug disc	Fully open	13				
	B	1/2 open	260	9	Standard Tee		
	C	1/4 open	900	A	Straight flow		20
				B	To branch		60
4	Check valve						
	A Swing		135	10	Street Elbow		
	B Clearway swing		50	A	90 deg.		50
	C Globe, lift or step		340	B	45 deg.		26
	D Angle, lift or step		145				
	E In line ball check valve		150	11	Single mitter bend		
				A	45 deg.		15
5	Foot valve			B	90 deg.		58
	A With strainer & poppet		420				
	B With leather hinged		75	12	Return bend		50

Putkiosien ekvivalenttinen putkipituus lasketaan yhtälöllä 19 [5].

$$p_{ekv} = \lambda \cdot \frac{l_{ekv}}{d_s} \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \quad (19)$$

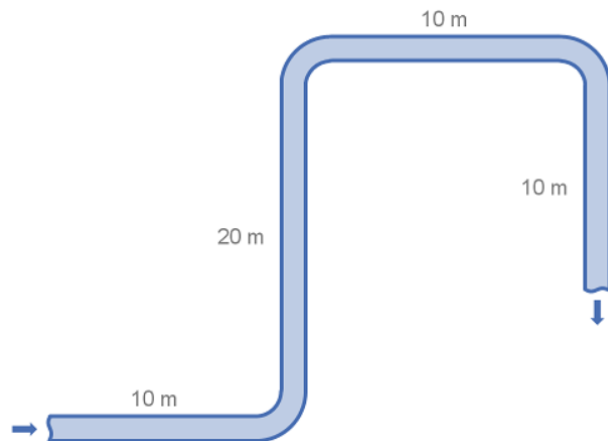
- $p_{ekv}$  on ekvivalenttisen putkipituuden painehäviö, Pa  
 $\lambda$  on kitkakerroin  
 $l_{ekv}$  on kertavastuskertoimen  $\zeta$  ekvivalenttinen pituus, m  
 $d_s$  on putken sisähalkaisija, m  
 $\rho$  on virtaavan aineen tiheys, kg/m<sup>3</sup>  
 $v$  on virtausnopeus, m/s

Taulukossa 5 on esitetty ekvivalenttinen putkipituus suhteutettuna putken halkaisijaan, siksi yhtälössä 19 taulukon  $L/D_{EQ}$  täytyy kertoa vielä putken halkaisijalla, joten

$$l_{ekv} = L/D_{EQ} \cdot d_s. \quad (20)$$

Esimerkkinä voidaan laskea, miten laskentamenetelmä vaikuttaa putkiston painehäviöön. Lasketaan kuvitteelliselle putkiosuudelle (kuva 22) painehäviöt kahdella eri menetelmällä, käyttäen kertavastuksia ja ekvivalenttista putkipituutta.

Putkiosuuden yhteenlaskettu putkipituus on 50 m, ja siinä on kolme käyrää. Putken sisähalkaisija on 300 mm, virtausnopeus on 3 m/s, kitkakerroin on 0,018 ja nesteen tiheys on 1 000 kg/m<sup>3</sup>.



Kuva 22. Kuvitteellinen putkiosuus painehäviön laskentaan [16].

Esimerkki 1 (käyttäen kertavastuksia):

Putkiosuuden painehäviö lasketaan ensin yhtälöllä 7.

$$\Delta p_{\lambda} = 0,018 \cdot \frac{50 \text{ [m]}}{0,300 \text{ [m]}} \cdot \frac{1}{2} \cdot 1000 \left[ \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right] \cdot 3 \left[ \frac{\text{m}}{\text{s}} \right]^2 = 13\,500 \text{ Pa}$$

Kuvasta 21 saadaan käyrälle kertavastukseksi 0,5. Koska käyriä on putkiosuudella kolme kappaletta, kertavastuksien summa on yhteensä  $3 \times 0,5 = 1,5$ .

$$\Delta p_{\zeta} = (3 * 0,5) \cdot \frac{1}{2} \cdot 1000 \left[ \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right] \cdot 3 \left[ \frac{\text{m}}{\text{s}} \right]^2 = 6\,750 \text{ Pa}$$

Painehäviö on yhteensä  $13\,500 + 6\,750 = 20\,250 \text{ Pa} = 20,3 \text{ kPa}$

Esimerkki 2 (käyttäen ekvivalenttista putkipituutta):

Putken painehäviö lasketaan ensin kuten esimerkissä 1.

$$\Delta p_{\lambda} = 0,018 \cdot \frac{50 \text{ [m]}}{0,300 \text{ [m]}} \cdot \frac{1}{2} \cdot 1000 \left[ \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right] \cdot 3 \left[ \frac{\text{m}}{\text{s}} \right]^2 = 13\,500 \text{ Pa}$$

Putkiosien painehäviölle luetaan taulukosta 2 käyrän suhteellinen ekvivalentti putkipituus, jossa  $L/D_{\text{EQ}}$  on käyrälle 20 (LR 90 eli long radius).

$$0,018 \cdot \frac{(20 \cdot 3) \cdot 0,300 [m]}{0,300 [m]} \cdot \frac{1}{2} \cdot 1000 \left[ \frac{kg}{m^3} \right] \cdot 3 \left[ \frac{m}{s} \right]^2 = 4860 Pa$$

Painehäviö on yhteensä  $13\,500 + 4\,860 = 18\,360 Pa = 18,4 kPa$

Esimerkeistä huomataan, että käyttämällä ekvivalenttista putkipituutta saadaan huomattavasti pienempi painehäviö, vaikka putkiosuus ei olisi kovinkaan pitkä.

### 3.3 Komponenttien painehäviöt

Komponenttien mitat säilyvät ennallaan, vaikka nesteen aineominaisuudet muuttuvat. Tarkat lämmönsiirtimien painehäviöt saadaan suoraan laitetoimittajilta, joten lämmönsiirtimissä glykolipitoisuuden muutoksesta aiheutuvaa painehäviön laskua voidaan tarkastella käyttämällä ekvivalenttista putkipituutta yhtälöllä 20. Ekvivalenttinen putkipituus ja kitkakerroin voidaan iteroida, kun lämmönsiirtimen painehäviö ja hydraulinen halkaisija tiedetään. Käsini iteroiminen on hankalaa, koska yhtälössä on kaksi muuttujaa, joten yhtälön tuntemattomat tekijät täytyy ratkaista Excelillä ratkaisin-apuohjelman avulla.

Lämmön siirtimen hydraulisen halkaisijan arvoksi kokeilemalla eri arvoja todettiin, että glykolipitoisuuden alenemisesta johtuva painehäviön muutos lämmönsiirtimessä muuttuu lähes samalla suhteella kuin putkiston painehäviöt. Taulukossa 6 on vertailtu lämmönsiirtimessä tapahtuvaa painehäviön suhteellista muutosta käyttämällä eri arvoja lämmönsiirtimen hydrauliselle halkaisijalle glykolipitoisuuksilla 30 %, 25 %, 20 %, 15 % ja 10 %. Lämmönsiirtimen suhteellista painehäviön alenemista on verrattu putkiston suhteelliseen painehäviön alenemiseen. Taulukko osoittaa, että glykolipitoisuuden muuttuessa lämmönsiirtimessä tapahtuva painehäviön muutos saadaan laskettua riittävällä tarkkuudella käyttämällä ekvivalenttista putkipituutta (yhtälö 19).

Taulukko 6. Lämmönsiirtimen suhteellinen painehäviön muutos.

	Putkisto	LS	LS	LS	LS	LS	LS	LS
	dh	dh	dh	dh	dh	dh	dh	dh
30 %	100 %	50	100	150	200	250	300	350
25 %	94 %	96 %	96 %	95 %	95 %	95 %	94 %	94 %
20 %	89 %	92 %	92 %	91 %	91 %	90 %	90 %	89 %
15 %	75 %	79 %	78 %	77 %	77 %	76 %	76 %	75 %
10 %	80 %	84 %	83 %	82 %	81 %	80 %	79 %	79 %

$$\Delta p_{LS} = \lambda \cdot \frac{l_{ekv}}{d_h} \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \quad (20)$$

$\Delta p_{LS}$  on lämmönsiirtimen painehäviö, Pa

$\lambda$  on kitkakerroin

$l_{ekv}$  on ekvivalenttinen putkipituus, m

$d_h$  on hydraulinen sisähalkaisija, m

$\rho$  on virtaavan aineen tiheys, kg/m<sup>3</sup>

$v$  on virtausnopeus, m/s

### 3.4 Pumppausenergian laskeminen

Pumpun toimintapiste sijaitsee pumpun ominaiskäyrän ja verkoston painehäviökäyrän leikkauspisteessä. Jotta pumppu olisi energiatehokas, tulisi se mitoittaa siten, että sen hyötysuhde olisi 80 % toimintapisteen kohdalla. Pumpun nostokorkeus (H) on valmistajien diagrammeissa laskettu veden ominaisuuksilla, joten vesi-glykolijärjestelmien painehäviö täytyy muuttaa vastaamaan veden nostokorkeutta (yhtälö 21), muuten pumpun tuottama painehäviö ei riitä. [17]

$$H = \frac{\Delta p \cdot 1000}{\rho \cdot g} \quad (21)$$

- H on pumpun nostokorkeus, m  
 $\Delta p$  on verkoston painehäviö, kPa  
 $\rho$  on virtaavan nesteen tiheys, kg/m<sup>3</sup>  
g on putoamiskiihtyvyys, vakio 9,81 m/s<sup>2</sup>

Kiertopumpun akselin tarvitsema teho saadaan laskettua yhtälöllä 22 [17].

$$P_2 = \frac{\rho \cdot g \cdot Q \cdot H}{\eta_p} \quad (22)$$

- P<sub>2</sub> on pumpun akseliteho, W  
 $\rho$  on pumpattavan nesteen tiheys, kg/m<sup>3</sup>  
g on putoamiskiihtyvyys, vakio 9,81 m/s<sup>2</sup>  
Q on tilavuusvirta, m<sup>3</sup>/s  
H on nostokorkeus, m  
 $\eta_p$  on pumpun hyötysuhde, %

Pumpun todellinen sähkötehon määrä on kuitenkin isompi kuin pumpun akselin tarvitsema teho. Akselia pyörittävässä sähkömoottorissa ja moottorin säätölaitteissa tapahtuu kuitenkin häviötä, joten todellinen sähköteho on suurempi. Pumpun todellinen sähköteho saadaan laskettua yhtälöllä 23. Myös sähkömoottorin valintaan täytyy kiinnittää huomiota, jottei liian iso moottori laske pumpun kokonaishyötysuhdetta. [17]

$$P_1 = \frac{P_2}{\eta_m \cdot \eta_s} \quad (23)$$

- P<sub>1</sub> on pumpun ottoteho, W  
P<sub>2</sub> on pumpun akseliteho, W  
 $\eta_m$  on moottorin hyötysuhde, %  
 $\eta_s$  on säädön hyötysuhde, %

Pumpun energiankulutus saadaan, kun pumpun ottoteho kerrotaan ajanjaksolla, jolloin pumppu on käynnissä. Jos pumppu pyörii vuoden jokaisena päivänä, ajanjakson pituus on 365 päivää x 24 tuntia = 8 760 tuntia/ vuosi. Pumpun energiankulutus saadaan laskettua yhtälöllä 24.

$$Q = P_1 \cdot t \quad (24)$$

Q on energiankulutus, kWh/a

P<sub>1</sub> on pumpun ottoteho, kW

t on ajanjakson pituus, h

## 4 Energiansäästöön vaikuttavat tekijät

Jotta järjestelmä toimii oikein ja energiatehokkaasti, perusedellytys on, että järjestelmä on mitoitettu oikein. LVI-alalla useasti insinöörit haluavat toimintavarmuutta ja pelivaraa, ja useasti ajaututaan ylimitoittamaan lämmitys- ja jäähdytysjärjestelmiä. Pieni lisävarmuus on hyvä huomioida LVI-järjestelmien suunnittelussa, mutta liiallinen ylimitoitus syö energiatehokkuutta ja tulee kalliiksi kiinteistön käyttäjälle. Ylimitoitus voi myös lyhentää laitteiden käyttöikä ja vaikuttaa näin järjestelmän elinkaaren pituuteen. Sen vuoksi järjestelmien suunnittelussa on pyrittävä tekemään laskelmat tarkasti ja luotettava siihen, että laskelmat ovat riittävät. Tämä kuitenkin edellyttää sitä, että laskennat on tehty oikein ja että laskennoissa on osattu ottaa kaikki seikat huomioon.

Isoissa järjestelmissä esimerkiksi laitteiden tehot ja painehäviöt tulisi mitoittaa tarkasti, koska pienetkin poikkeamat mitoituksissa voivat tulla kalliiksi.

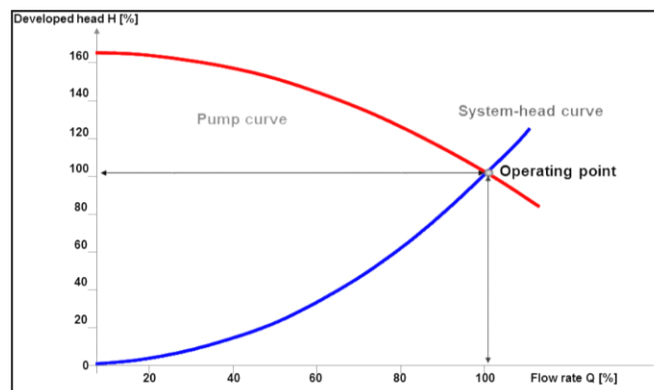
### 4.1 Glykolipitoisuus

Jäähdytysjärjestelmissä käytetään vesi-glykoliseoksia. Glykolilla on huonommat aineominaisuudet kuin vedellä, joten glykolipitoinen neste vaatii enemmän tehoa pumpuilta kiertääkseen putkistossa. Nesteestä jäätyminen alenee, mitä suurempi osuus nesteestä on glykolia. Mitä isompi osuus nesteestä on glykolia, sitä suurempi määrä työtä tarvitaan nesteen liikuttamiseen. Tästä syystä glykolipitoisuus ei saisi olla yhtään suurempi kuin on tarpeellista. Kuitenkin hyvin useasti pakkaskestävyyttä vaativiin järjestelmiin on ajettu varmuuden vuoksi 30 %:n vesiglykoliseos ilman sen tarkempaa tarkastelua. Tekemäni

laskelmat ovat kuitenkin osoittaneet, että asiaan pitää kiinnittää enemmän huomiota, varsinkin isoissa järjestelmissä, joissa pumppauskustannukset ovat korkeat. Pienissä järjestelmissä, kuten omakotitalon jäähdytysjärjestelmissä, fluidin pitoisuudella ei juurikaan ole merkitystä, koska tilavuusvirrat ovat hyvin pieniä. Nesteen lämmönsiirtokyky on sitä heikompi, mitä isompi osuus seoksesta on glykolia.

#### 4.2 Tilavuusvirta ja nostokorkeus

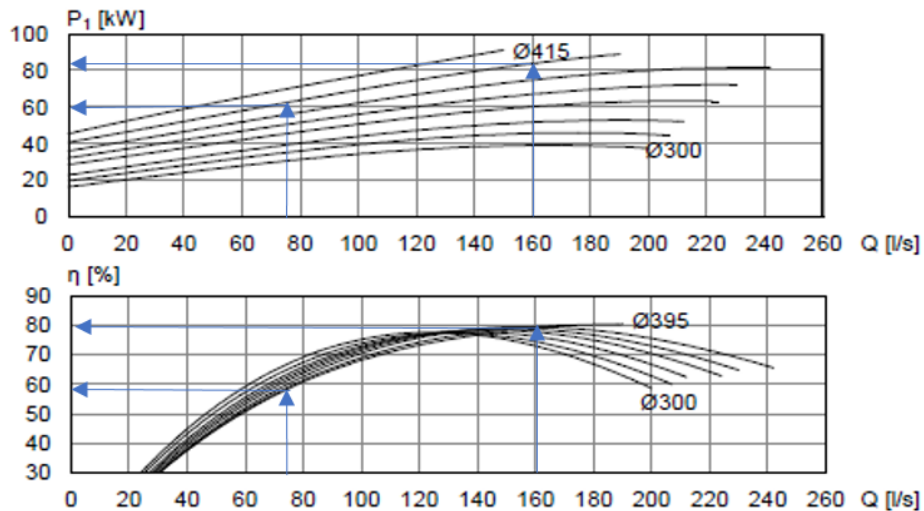
Tilavuusvirran ja nostokorkeuden aleneminen vaikuttaa pumpun energiankulutukseen. Mitä vähemmän nestettä tarvitsee pumpata ja mitä pienempi on nostokorkeus, sitä vähemmän sähköenergiaa tarvitaan lämmönsiirtonesteen liikuttamiseen. Pumpun toimintapiste (operating point) sijoittuu verkoston painehäviökäyrän ja pumpun ominaiskäyrän leikkauspisteeseen [17]. Kuvassa 23 näkyy pumpun ominaiskäyrän ja verkoston käyrän leikkauspiste. Tätä pistettä kutustaan toimintapisteeksi.



Kuva 23. Pumpun toimintapiste [18].

#### 4.3 Pumpun hyötysuhde

Kuvasta 24 huomataan, kuinka pumpun ottoteho ( $P_1$ ) vähenee tilavuusvirran pienentyessä. Pumpun hyötysuhde ( $\eta$ ) kuitenkin laskee 80 %:sta 60 %:iin. Tämä johtuu siitä, että moottorin tehokapasiteetti ei muutu, koska pumppua pyörittää edelleen sama moottori, joka on mitoitettu isomman tilavuusvirran mukaan. Jotta pumpun hyötysuhde saadaan nostettua takaisin, tarvitaan uusi pumppu, joka on mitoitettu pienemmän tilavuusvirran mukaan.



Kuva 24. Keskipakopumpun teho- ja hyötysuhdekäyrä [19].

#### 4.4 Aineominaisuudet

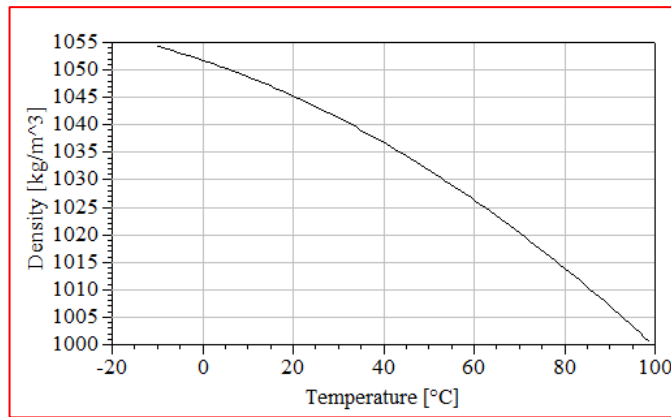
Vedellä on parhaimmat ominaisuudet lämmönsiirtoon, ja sen vuoksi sitä käytetään aina kun mahdollista. Jäähdytysverkostoissa kuitenkin nesteen lämpötila voi mennä pakkasen puolelle ja vesi voi jäätyä. Lämmönsiirtonesteet eivät kuitenkaan saa jäätyä missään vaiheessa, joten lämmönsiirtonesteen pakkaskestävyyttä on lisättävä glykolilla.

Propyleeni- ja etyleeniglykoli ovat käytetyimmät glykolit, joita käytetään jäähdytysjärjestelmissä [1]. Glykolit sekoitetaan veteen ennen kuin neste ajetaan järjestelmään. Kun puhutaan tilavuuden mukaisesta prosentiosuudesta, 30 %:n glykoliseos tarkoittaa sitä, että siinä on 3/10 osaa glykolia ja 7/10 osaa vettä.

Seuraavissa alaluvuissa esitellään nesteen aineominaisuudet ja kerrotaan, miten ne vaikuttavat energiansäästöön.

##### 4.4.1 Tiheys

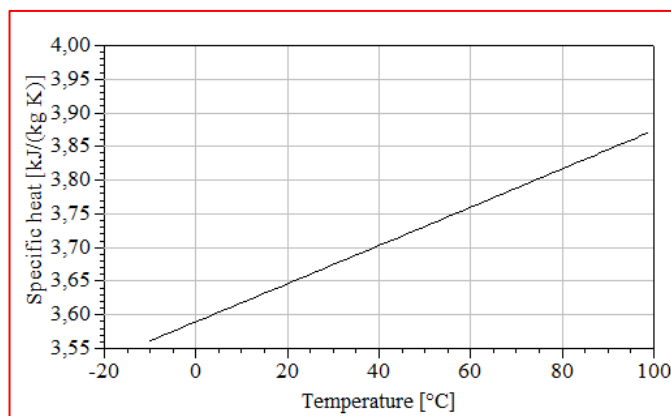
Tiheys ilmaisee aineen massan suhteessa sen tilavuuteen. Tiheyden tunnus on  $\rho$  (rho), ja yksikkö SI-järjestelmässä on kilogramma kuutiota kohden ( $\text{kg/m}^3$ ). Glykolipitoisuutta alentamalla nesteen tiheys pienenee. Tiheyden pienentyessä pumpun paineenkorotuksen tarve pienenee. Kuvan 25 funktiokuvaaja esittää 30-prosenttisen etyleeniglykolin tiheyden muutosta lämpötilan mukaan. Kuvaajasta huomataan, että lämpötilan kasvaessa nesteen tiheys pienenee.



Kuva 25. 30-prosenttisen vesi-glykoliseoksen tiheyden kuvaaja [20].

#### 4.4.2 Ominaislämpökapasiteetti

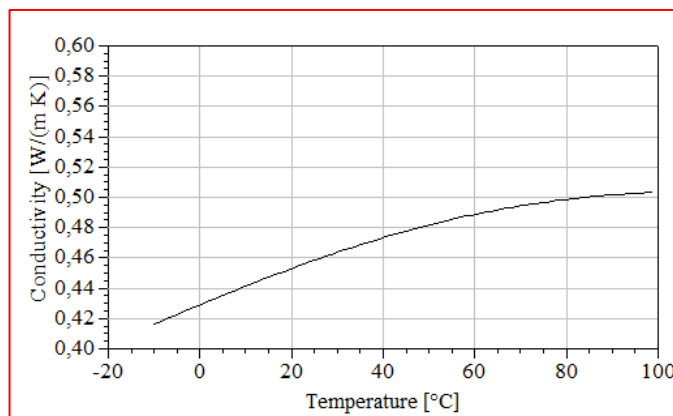
Ominaislämpökapasiteetti määrittää kuinka paljon aineeseen sitoutuu lämpöenergiaa eli kertoo aineen kyvystä varastoida lämpöä. Suuremman lämpökapasiteetin omaava aine kykenee saavuttamaan saman tehon pienemmällä tilavuusvirralla. Ominaislämpökapasiteetin tunnusvakiopaineessa on  $c_p$ , ja sen yksikkö on  $J/(kg \cdot ^\circ C)$ . Ominaislämpökapasiteetti on ainoa aineominaisuus, jonka muutos noudattaa lähes lineaarista mallia. Kuvan 26 funktiokuvaaja esittää 30-prosenttisen etyleeniglykolin ominaislämpökapasiteetin muutosta lämpötilan mukaan. Kuvaajasta huomataan, että ominaislämpökapasiteetti suurenee lineaarisesti lämpötilan kasvaessa.



Kuva 26. 30-prosenttisen vesi-glykoliseoksen ominaislämpökapasiteetin kuvaaja [20].

#### 4.4.3 Lämmönjohtavuus

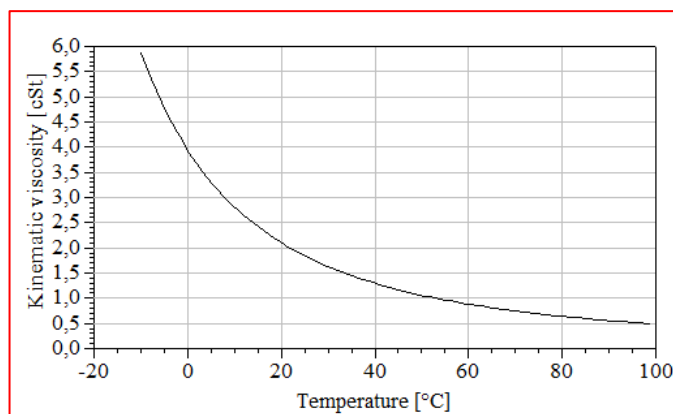
Lämmönjohtavuus kertoo materiaalin kyvystä johtaa lämpöä. Lämmönjohtavuuden tunnus on  $\lambda$  (lambda), ja sen yksikkö on  $W/^\circ C m$ . Putkiston sisällä lämmönsiirtoneste saa johtua vapaasti, mutta lämpö ei saa siirtyä ulos putken seinämän läpi. Metallit johtavat hyvin lämpöä ja tästä syystä putkistot on eristettävä huonosti lämpöä johtavilla materiaaleilla (eristeillä), jottei lämpö johdu putkiston läpi ympäristöön. Kuvan 27 funktiokuvaaja esittää 30-prosentin etyleeniglykolin lämmönjohtumiskyvyn muutosta lämpötilan mukaan.



Kuva 27. 30 %:sen vesi-glykoliseoksen lämmönjohtavuuden kuvaaja [20].

#### 4.4.4 Viskositeetti

Viskositeetti kuvaa fluidin kykyä vastustaa virtausta eli kertoo, kuinka juoksevaa aine on. Dynaaminen viskositeetti ilmaisee, kuinka neste kykenee vastustamaan nesteen sisäistä kitkaa. Dynaamisen viskositeetin tunnus on  $\eta$  (eeta), ja yksikkö on poisi (Pa·s). Dynaamisen viskositeetin sijasta painehäviölaskennoissa käytetään kinemaattista viskositeettia (kuten yhtälössä 10), jossa dynaaminen viskositeetti on jaettu nesteen tiheydellä. Kinemaattisen viskositeetin tunnus on  $\nu$  (nyy), ja yksikkö on  $m^2/s$ . Viskositeetti vaikuttaa Reynoldsin lukuun, joka kertoo nesteen virtauslajin. Mitä pienempi viskositeetti nesteellä on, sitä pienempi painehäviö virtaukselle saadaan. Kuvasta 28 huomataan, kuinka kinemaattinen viskositeetti pienenee nesteen lämpötilan kasvaessa. [5; 10.]



Kuva 28. 30-prosenttisen vesi-glykoliseoksen kinemaattisen viskositeetin kuvaaja [20].

## 5 Energiansäästön laskentaohjelma

Energiansäästön laskentaa varten tehtiin excel-pohjainen laskentaohjelma. Ohjelmalla voidaan tarkastella jäähdytys- tai lämmitysverkoston ympärivuotista pumppausenergian kulutusta. Ohjelma laskee aineominaisuuksien arvot halutulle glykolipitoisuudella halutussa lämpötilassa sekä verkoston pumppausenergian kulutuksen viidellä eri glykolipitoisuudella kesä-, välikausi- ja talviolosuhteet huomioiden. Tulokseksi laskentaohjelma antaa kiertopumppujen energiankulutuksen vuositasolla rahaksi muutettuna.

### 5.1 Laskentaohjelman ideointi

Lämmönsiirtonesteille löytyy käsikirjoista valmiita taulukoita, joista voidaan lukea aineominaisuuksien arvot. Näissä käsikirjoissa arvot on yleensä ilmoitettu pitoisuuksille portaittain ainoastaan 10 prosenttiyksikön välein, ja muutenkin käsikirjoista ainainen taulukoiden etsiminen ja arvojen kirjaaminen on aikaa vievää puuhaa. Arvoja aineominaisuuksille saadaan kätevästi tietokoneohjelmista, esimerkiksi CoolPack-nimisestä ohjelmasta. CoolPackista saadaan todella kattavasti arvot usealla eri lämmönsiirtonesteellä, mutta esimerkiksi etyleeniglykolille aineominaisuudet saadaan ainoastaan 0 °C:lle ja siitä ylöspäin. Maalämpöpiireissä lämpötilat ovat kuitenkin useasti pakkasen puolella, joten arvot jouduttaisiin katsomaan joka tapauksessa taulukoista.

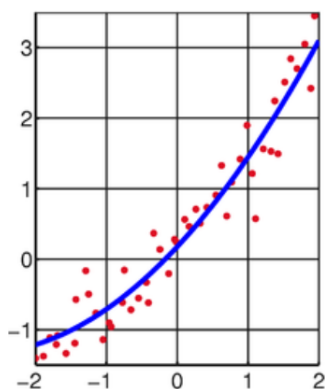
Insinööriyötä aloitettaessa käytössä oli excel-pohjainen laskentaohjelma, jolla saatiin laskettua aineominaisuudet etyleeniglykolille 1 prosenttiyksikön tarkkuudella. Tätä laskentaohjelmaa käytettäessä kuitenkin huomattiin, että aineominaisuuksien arvot eivät olleet oikeita, koska työkalu ei kyennyt muodostamaan tarpeeksi kattavasti eri kuvaajia.

Näillä aineominaisuuksien arvoilla laskettiin Comfort-jäähdytyslaitoksen pumppauskustannukset ja todettiin, että pumppujen sähköenergian kulutus saatiin reilusti todellisuutta pienemmäksi. Tämän vuoksi tehtiin kokonaan uusi laskentatyökalu, jolla pystytään laskemaan arvot tarkasti.

Energiankulutuksen laskeminen ei ole monimutkaista, jos verkoston painehäviöt ja lämmönsiirtonesteen aineominaisuudet tiedetään. Laskennassa yhtälöihin sijoitettavat aineominaisuudet on syytä ilmoittaa usean desimaalin tarkkuudella, ja painehäviöiden laskeminen isolle verkostolle on työlästä. Painehäviöiden tarkempaan laskemiseen täytyy selvittää kitkakerroin (esiintyy yhtälössä 7). Kitkakertoimen laskemiseen on olemassa erilaisia aputaulukoita ja diagrammeja (kuva 20), mutta tarkemman tuloksen saamiseksi on kitkakerroin ”iteroitava” kokeilemalla eri lukuarvoja siten, että yhtälön molemmille puolille saadaan riittävän tarkasti sama luku. Verkostossa on kymmeniä eri putkiosuuksia, ja jokaiselle on laskettava oma kitkakerroin, ja kun lasketaan painehäviöt viidelle eri pituisuudelle kolmessa eri lämpötilassa, iterointeja pitää tehdä satoja jopa tuhansia kertoja. Tästä syystä laskentaohjelmaan tehtiin työkalu, joka laskee putkien ja osien painehäviöt käyttäen viittä eri glykolipitoisuutta.

## 5.2 Least square method -välilehti

Aineominaisuuksien arvojen laskentatyökalu perustuu pienimmän neliösumman menetelmään (engl. Ordinary least squares, OLS). Menetelmä perustuu matemaattiseen optimointiin, jossa pyritään löytämään mitatulle pistejoukkoille paras sovite eli yhtälö, joka muodostaa sellaisen kuvaajan, mikä mukailee parhaiten koordinaatiston pistejoukkoa. Kuvassa 29 on mittauksen koordinaattipisteitä, joiden mukaan sininen regressiokäyrä on muodostettu siten, että käyrä mukailee mahdollisimman tarkasti pistejoukkoa.



Kuva 29. Pistejoukkoa mukaileva regressiokäyrä [21].

### 5.3 Aineominaisuudet-välilehti

Aineominaisuudet-välilehdellä (kuva 30) valitaan vertailuun halutut glykolipitoisuudet ja valitaan nesteiden lämpötilat kesä-, välikausi- ja talviolosuhteiden aikana.

Ensiksi alavetovalikoista valitaan nesteille lähteet, joiden aineominaisuuksia halutaan laskennassa käyttää. Laskentaohjelmassa on kuusi eri vaihtoehtoa: ASHRAE, Dow, CoolPack, Seccool, Antifrogen ja Zitec M [22; 23; 20; 24; 25; 26.]. Näistä jokaiselle vaihtoehdolle on tehty oma välilehti, jossa on taulukoituna kyseisen lähteen mittaamat arvot aineominaisuuksille. Ohjelma poimii valitun lähteen arvot kootusti aineominaisuudet-välilehdelle. Lähteiden aineominaisuudet on taulukoitu pääasiassa 10 prosenttiyksikön porrastuksella riippuen lähteestä. Myös lämpötilat pitoisuuksille ovat saatavilla taulukoista ainoastaan 5 °C:n porrastuksella. Jos taulukkoarvot eivät ole sopivia tai halutaan käyttää tarkempia pitoisuuksia, esimerkiksi 33 %:n pitoisuutta, on laskentaohjelmassa valittavissa myös ”laskuri”, joka laskee aineominaisuudet mille tahansa glykolipitoisuudelle 1 prosenttiyksikön tarkkuudella. Tässä tapauksessa aineominaisuudet on laskettu ASHRAE:n käsikirjan taulukkoarvoista [22]. Kuvassa 30 on laskentaohjelman aineominaisuudet-välilehdellä oleva taulukko, josta valitaan nesteille lähtötieto, glykolipitoisuus ja järjestelmän toimintalämpötilat.

Kesä		1	2	3	4	5
Neste	Etyleeniglykoli	Etyleeniglykoli	Etyleeniglykoli	Etyleeniglykoli	Etyleeniglykoli	Etyleeniglykoli
Lähtötiedot	ASHRAE	Laskuri	Laskuri	Laskuri	Laskuri	Laskuri
Glykolin prosenttiosuus	ASHRAE	20 %	15 %	10 %	10 %	7 %
Nesteen lämpötila °C	ASHRAE	10	10	10	10	10
Jäätymispiste	Dow					
	CoolPack					
	SecCool					
	Antifrogen	-8.9			-3.7	
Tiheys	Zitec M	1032,94			1016,28	
Ominaislämpökapasiteetti	Syötä arvot	3,792			3,954	
Lämmönjohtavuus	Mittaukset:				0,528	
Dynaaminen viskositeetti	ASHRAE: 10-90 % [-35...125°C]			1,930	1,559	1,067
Kinemaattinen viskositeetti	Dow: 10-90% [-35...120°C]			1,884	1,534	1,056
	CoolPack: 10-90% [0...100°C]					
	Seccool: 10-60% [-55...100°C]					
	Antifrogen: 10-60% [-50...80°C]					
	Zitec M: 5-100% [-125...120°C]					
Välikausi						
Nesteen lämpötila °C						
Jäätymispiste						
Tiheys			1025,98	1017,57	1012,72	
Ominaislämpökapasiteetti		3,603	3,780	3,866	3,946	3,988
Lämmönjohtavuus		0,436	0,476	0,498	0,520	0,530
Dynaaminen viskositeetti		3,480	2,539	2,287	1,789	0,933
Kinemaattinen viskositeetti		3,313	2,455	2,226	1,758	0,938
Talvi						
Nesteen lämpötila °C		0	0	0	0	0
Jäätymispiste		-15.4	-8.9	-6.1	-3.7	-2.3
Tiheys		1051,78	1035,67	1027,21	1018,73	1013,84
Ominaislämpökapasiteetti		3,589	3,769	3,855	3,937	3,981
Lämmönjohtavuus		0,429	0,468	0,489	0,511	0,524
Dynaaminen viskositeetti		4,150	3,019	2,824	2,078	0,421
Kinemaattinen viskositeetti		3,946	2,915	2,742	2,040	0,465

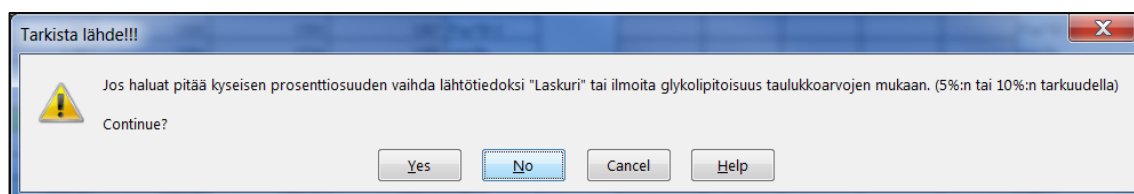
Kuva 30. Excel-laskentaohjelman välilehti glykolipitoisuuden ja toimintalämpötilojen valintaan.

Esimerkkikoodissa 1 on aineominaisuudet-välilehden taulukon yhden solun sisällöstä. Esimerkkikoodissa on kaava, joka on syötetty jokaiseen aineominaisuudet-taulukon soluun, eli saman tyyppinen kaava on jouduttu kirjoittamaan 90 kertaa taulukkoon. Solun kaava koostuu ehtolauseista ja arvon haku -komennoista. Näiden komentojen avulla laskentaohjelma poimii taulukkoarvoja toisilta välilehdiltä ehtolauseiden mukaan. Näiden kaavojen ansiosta laskentaohjelma kykenee etsimään halutulle glykolipitoisuudelle pitoisuutta ja lämpötilaa vastaavat arvot.

```
=IF (C16="Syötä ar-
vot";J21;IF (C16="ASHRAE";VLOOKUP (C18;ASHRAE!$B$63:$K$96;MATCH (C17;ASHR
AE!$B$63:$K$63;0);FALSE);IF (C16="Seccool";VLOOKUP (C18;Seccool!$B$21:$M
$52;MATCH (C17;Seccool!$B$21:$M$21;0);FALSE);IF (C16="CoolPack";VLOOKUP (
C18;Cool-
Pack!$B$21:$S$42;MATCH (C17;CoolPack!$B$21:$S$21;0);FALSE);IF (C16="Lask
uri";LOOKUP (C18;'Laskuri 1'$B$21:$S$21;'Laskuri
1'$B$22:$S$22);IF (C16="Zitec M";VLOOKUP (C18;'Zitrec
M'$B$37:$V$87;MATCH (C17;'Zitrec
M'$B$37:$V$37;0);FALSE);IF (C16="Antifrogen";VLOOKUP (C18;'Antifrogen
N'$B$21:$M$48;MATCH (C17;'Antifrogen
N'$B$21:$M$21;0);FALSE);IF (C16="Dow";VLOOKUP (C18;Dow!$B$62:$K$94;MATC
H (C17;Dow!$B$62:$K$62;0);FALSE)))))))))
```

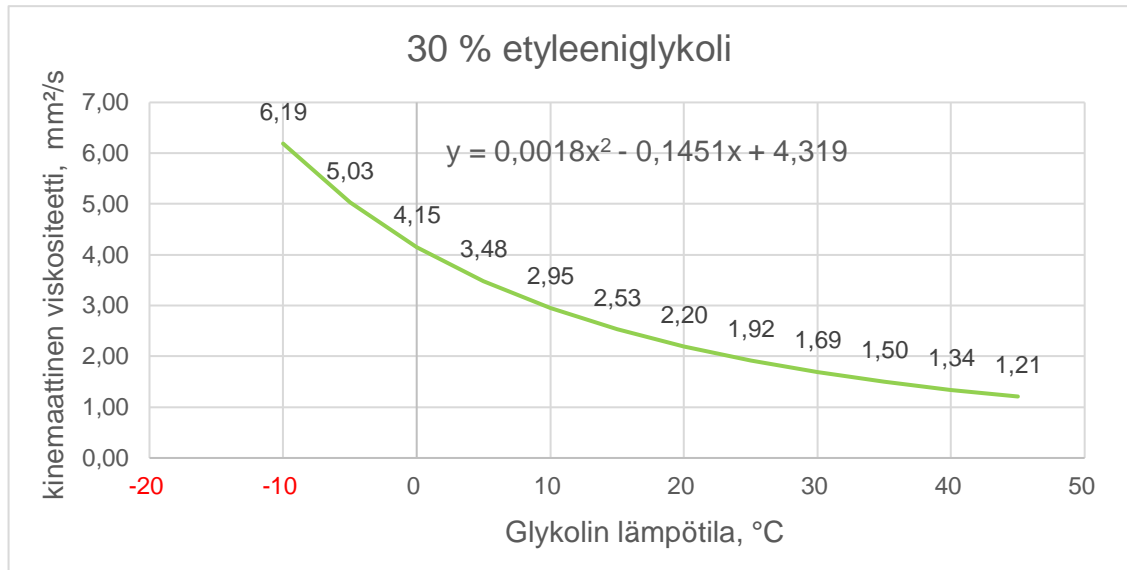
Esimerkkikoodi 1. Aineominaisuudet-välilehden yhden solun sisältö.

Sujuvuuden ja käyttäjän epävarmuuden vähentämiseksi on laskentaohjelmaan lisätty opastavia tekstejä ja alavetovalikoita, joista pystytään valitsemaan pitoisuudet ja lämpötilat helposti. Varoitusikkunoita ponnahtaa esiin, jos syötetyt lukuarvot eivät kelpaa tai jokin tieto on jäänyt täyttämättä. Kuvassa 31 on varoitusikkuna, joka ponnahtaa esiin, kun lähtötiedoksi on valittu valmiita taulukoita käyttävä lähtötieto, mutta pitoisuudeksi on valittu jokin pitoisuus, jota ei löydy taulukoista. Tässä tapauksessa, jos käyttäjä haluaa pitää valitun pitoisuuden, ohjelma neuvoo käyttäjää valitsemaan lähtötiedoksi "laskurin" tai määrittämään pitoisuuden 5 tai 10 prosenttiyksikön tarkkuudella.



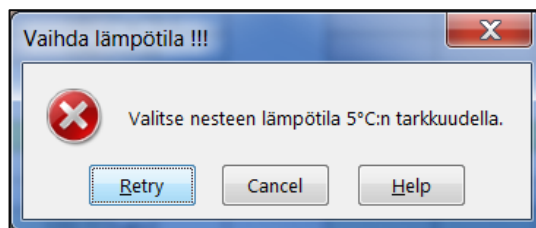
Kuva 31. Excel-laskentaohjelman varoitusikkuna, kun glykolipitoisuus poikkeaa taulukkoarvoista.

Lämpötila voidaan syöttää ohjelmaan 5 °C:n tarkkuudella. Aineominaisuuksien arvot tarkemmissa lämpötiloissa on mahdollista saada, kun valitun pitoisuuden muodostaman lämpötilakuvaajan yhtälöön sijoitetaan haluttu lämpötila x:n paikalle,  $(x) = 0,0018x^2 - 0,1451x + 4,319$  (kuva 32). Tämä toiminto on kuitenkin tehtävä manuaalisesti, koska yhtälö muuttuu aina trendikäyrän mukaan glykolipitoisuutta muutettaessa. Yleensä 5 °C:n tarkkuus antaa riittävän tarkat aineominaisuudet nesteelle, mutta jos laskennassa halutaan käyttää tätä menetelmää, on ohjelmassa lähtötiedoksi asetettava syötä arvot -toiminto. Tällöin yhtälöstä saadut arvot syötetään manuaalisesti syötä arvot -taulukoon, ja ohjelma käyttää näitä arvoja laskennassa.



Kuva 32. 30-prosenttisen etyleeniglykolin kinemaattinen viskositeetti lämpötilan funktiona.

Kuvassa 33 on ponnahdusikkuna, joka tulee näkyviin, kun lämpötila on annettu liian tarkasti.



Kuva 33. Stop-ikkuna ponnahtaa esiin, mikäli syötetty lämpötila pitää vaihtaa.

Ohjelma kertoo aina selvästi, mikä on pielessä ja mitä tarvitsee muuttaa, jotta laskennassa voidaan edetä verkoston painehäviöiden laskentaan. Kuvassa 34 on opasteikkuna, joka tulee näkyviin glykolipitoisuutta valittaessa.

Laskentaväli [5%] ja [10%]	
Laskuri:	1,2,3,4,5...100% [1%]
ASHRAE:	10,20,30...90% [10%]
Dow:	10,20,30...90% [10%]
CoolPack:	10,15,20...90% [5%]
Seccool:	10,15,20...60% [5%]
Antiforgen:	10,15,20...60% [5%]
Zitec M:	5,10,15...100% [5%]

Kuva 34. Opasteikkuna lähteiden raja-arvoista.

#### 5.4 Painehäviöt-välilehti

Painehäviöt-välilehdellä lasketaan verkoston putkien, osien ja komponenttien painehäviöt. Jokaiselle eri glykolipitoisuudelle ja lämpötilalle on oma painehäviötaulukko. Taulukoita on siis 15 kpl putkien painehäviöille, 15 kpl putken osille ja 15 kpl komponenteille.

##### 5.4.1 Putken painehäviöt

Putken painehäviötaulukkoon syötetään verkoston putkiosuuksien pituudet, halkaisijat, meno- ja paluuputkien lämpötilaero ja lopuksi alavetovalikosta valitaan putkimateriaalille sopiva karheuskerroin. Putkiston tiedot syötetään ainoastaan ensimmäiseen taulukkoon. Muihin taulukoihin putkien tiedot siirtyvät automaattisesti ensimmäisestä taulukosta. Aineominaisuuksien arvot taulukoihin siirtyvät automaattisesti aineominaisuudetvälilehdeltä.

Kitkakertoimet on laskettava taulukon jokaiselle putkiosuudelle erikseen. Kitkakertoimet tulee laskea jokaiselle putkiosuudelle iterointimenetelmällä siten, että yhtälön molemmille puolille saadaan mahdollisimman tarkasti sama luku. Kitkakertoimen laskemista on tarkemmin käsitelty luvussa 3.1. Kitkakertoimet määritettiin käyttämällä Prandtl-Colebrookin yhtälöä (yhtälö 16). Laskentaohjelmassa iterointeja tulee tehdä yhteensä yli 300 kertaa, joten iterointi tehtiin hyödyntäen VB-ohjelmointikieltä. VBA eli Visual Basic for Application on Microsoftin sovellusohjelmissa makrokielenä käytetty ohjelmointikieli [27]. Esimerkkikoodissa 1 on ote koodista, jolla yhtälön iterointi on toteutettu. Esimerkkikoodissa 2 olevilla koodeilla saadaan iterointi toteutettua ainoastaan neljä kertaa. Todellisuudessa koodeja on laskentaohjelmassa yli 300 kappaletta.

```

Range ("BH130") .GoalSeek           Goal:=100,           Chang-
ingCell:=Range ("BI130")

Range ("BH131") .GoalSeek           Goal:=100,           Chang-
ingCell:=Range ("BI131")

Range ("BH132") .GoalSeek           Goal:=100,           Chang-
ingCell:=Range ("BI132")

Range ("BH133") .GoalSeek           Goal:=100,           Chang-
ingCell:=Range ("BI133")

```

Esimerkkikoodi 2. Ote VBA-ohjelmointikielellä laaditusta koodista.

Ohjelmointikielen koodi toteuttaa kitkakertoimen laskemisen. Laskentaohjelma ajaa laskennan läpi yhtä painiketta painamalla. Laskentaohjelmassa kitkakerroin joudutaan päivittämään aina kun putkiston tietoja muutetaan, vaihdetaan glykolin pitoisuutta tai muutetaan toimintalämpötiloja. Kun painiketta ”Päivitä kitkakerroin” painetaan, ohjelma laskee kaikki kitkakertoimet ja päivittää painehäviöt taulukoihin. Yksi putkiston painehäviöiden laskentataulukoista näkyy liitteessä 2.

#### 5.4.2 Putkiosien painehäviöt

Putkiosien painehäviöt lasketaan omiin taulukoihin. Painehäviöt lasketaan käyttämällä ekvivalenttista putkipituutta. Tästä menetelmästä on kerrottu tarkemmin luvussa 3.2.

Ensimmäiseen taulukkoon syötetään putkiosuuksilla olevien putkiosien tyyppi ja lukumäärä. Muihin taulukoihin putkiosien tiedot siirtyvät automaattisesti ensimmäisestä taulukosta. Putkiosien painehäviötaulukot toimivat muilta osin samalla periaatteella kuin putken painehäviötaulukot. Liitteessä 3 on yksi laskentaohjelman putkiosien painehäviötaulukoista.

#### 5.5 Laskenta-välilehti

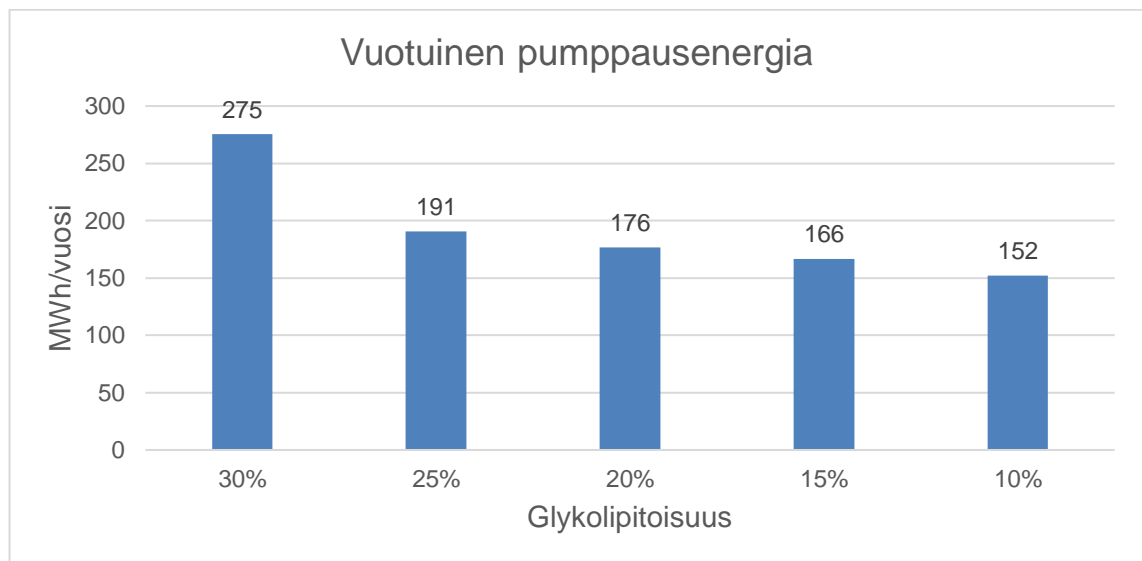
Laskenta-välilehdellä on pumppausenergian laskemiseen liittyvät asiat. Välilehdellä on kolme erillistä taulukkoa, joissa lasketaan kesä-, välikausi- ja talviolosuhteille pumppausenergian kulutukset. Tälle välilehdelle ei syötetä mitään tietoja, vaan välilehti on

tarkoitettu ainoastaan laskentakaavoja varten. Liitteessä 4 on Laskenta-välilehden kesätilanteen taulukko, jossa on laskettu kesätilanteen pumppausenergian kulutus.

## 5.6 Säästö-välilehti

Säästö-välilehti on laskentaohjelman etusivu. Tälle välilehdelle on koottu tulokset pumppausenergian kulutuksista. Välilehdelle syötetään ainoastaan pumpun tilavuusvirta, käyttöajat kesä-, välikausi- ja talviajalle, syötetään haluttu sähköenergian hinta (€/MWh) ja valitaan pumpulle hyötysuhteet. Liitteessä 5 on Säästö-välilehdeltä tulokset Comfort-jäähdytyslaitoksen pumppausenergian kulutuksesta kesä- ja talvitilanteen aikana.

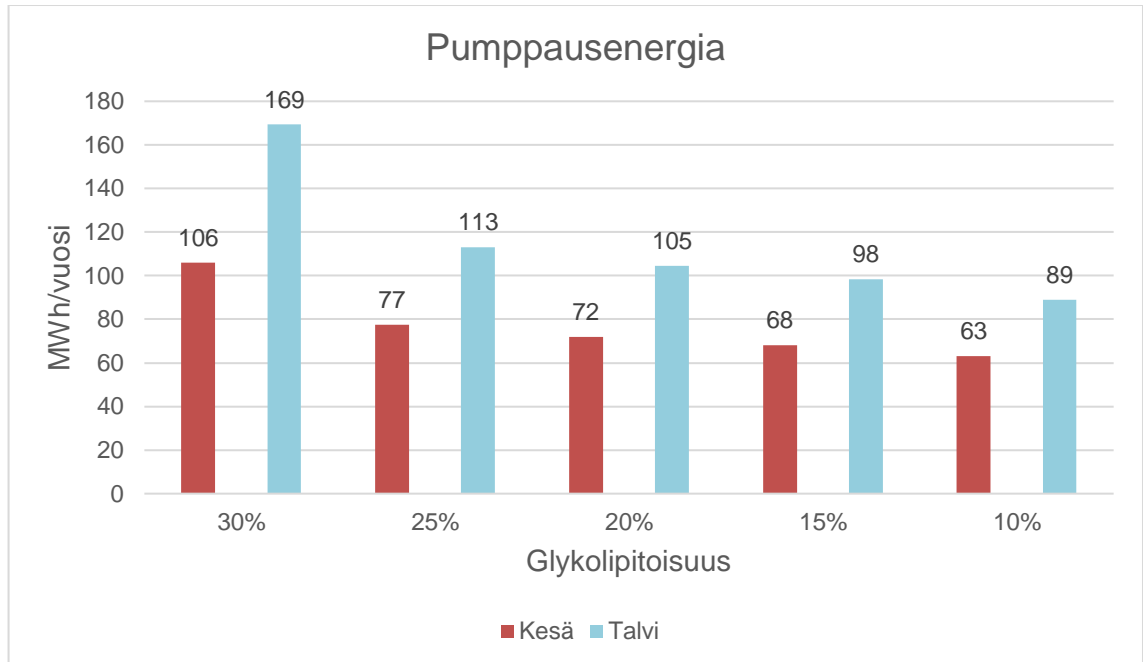
Laskennoista ohjelma muodostaa pylväsdiagrammit, jotka havainnollistavat laskennan tuloksia visuaalisesti. Kuvassa 35 on esitetty Comfort-jäähdytyslaitoksen pumppausenergian kulutus vuositasona käyttäen eri glykolipitoisuuksia. Kuvasta nähdään, kuinka energiankulutus pienenee glykolipitoisuuden laimentuessa.



Kuva 35. Comfort-jäähdytyslaitoksen vuotuinen pumppausenergian kulutus.

Kuvassa 36 on Comfort-jäähdytyslaitoksen pumppausenergian kulutus kesä- ja talvitilanteen aikana. Kuvasta huomataan, kuinka pumppausenergian tarve vähenee glykolipitoisuuden pienentyessä. Kesällä konejäähdytyksen aikaan pumppausenergian kulutus on suurempaa kuin talvella. Kuitenkin pylväsdiagrammista (kuva 36) huomataan, että

sähköenergiaa kuluu enemmän talvella. Tämä johtuu siitä, että järjestelmä toimii kahdeksan kuukautta vuodesta talvitilanteen mukaan ja ainoastaan neljä kuukautta kesätilanteen mukaan.



Kuva 36. Comfort-jäähdytyslaitoksen energiankulutus kesä- ja talvikaudella.

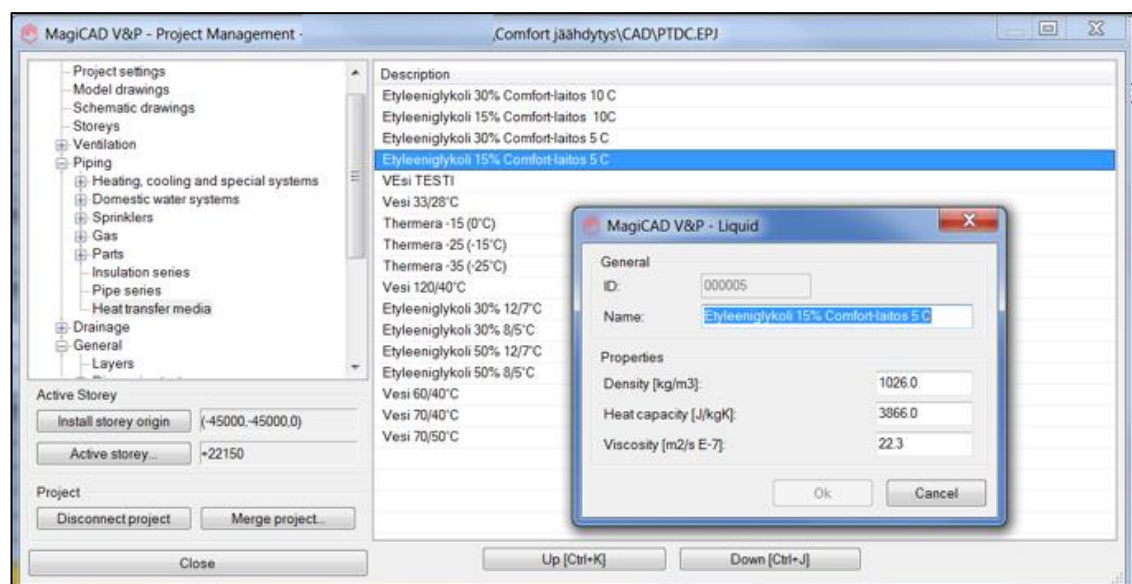
Välilehdellä on myös laskuri, joka laskee, kuinka paljon vanhaa liuosta tarvitsee poistaa ja kuinka paljon vettä tarvitsee lisätä, jotta haluttu laimeampi pitoisuus saavutetaan. Laskuriin syötetään nykyinen glykolipitoisuus, uusi toivottu pitoisuus sekä järjestelmän tilavuus. Laskentaa varten nauhoitettiin makro, joka suorittaa laskennan yhdellä napin painalluksella. Tämä laskuri näkyy taulukossa 7.

Taulukko 7. Laskentatyökalu glykolipitoisuuden muuttamiseen.

Nykyinen pitoisuus	30 %	
Haluttu pitoisuus	15 %	
Verkoston tilavuus	80000	dm <sup>3</sup>
Poistettava liuosta	40000	dm <sup>3</sup>
Vanhaa liuosta jää	40000	dm <sup>3</sup>
Liuoksen veden osuus	28000	dm <sup>3</sup>
Liuoksen glykolin osuus	12000	dm <sup>3</sup>
Tarvittava veden lisäys	<b>40000</b>	dm <sup>3</sup>

## 5.7 Pikalaskuri-välilehti

Laskenta ohjelmassa on myös pikalaskuri, jolla saadaan nopeasti laskettua pumpausenergian kulutus viidellä eri glykolipitoisuudella. Pikalaskuria on kätevä käyttää, jos pumpun tilavuusvirta ja paineenkorotus tiedetään. Pikalaskuriin voidaan syöttää esimerkiksi MagiCAD-mallinnusohjelmasta saadut pumpun tilavuusvirta ja nostokorkeus. Tämä kuitenkin edellyttää sitä, että MagiCAD laskee kyseisen verkoston painehäviöt samoilla aineominaisuuksien arvoilla, joita tämäkin laskentaohjelma käyttää. MagiCADissa laskennan aineominaisuuksien arvoja pääsee luomaan ja muokkaamaan Project-välilehdeltä. Kuvassa 37 on opastekuva, miten lämmönsiirtonesteiden ominaisuuksia voidaan muuttaa.

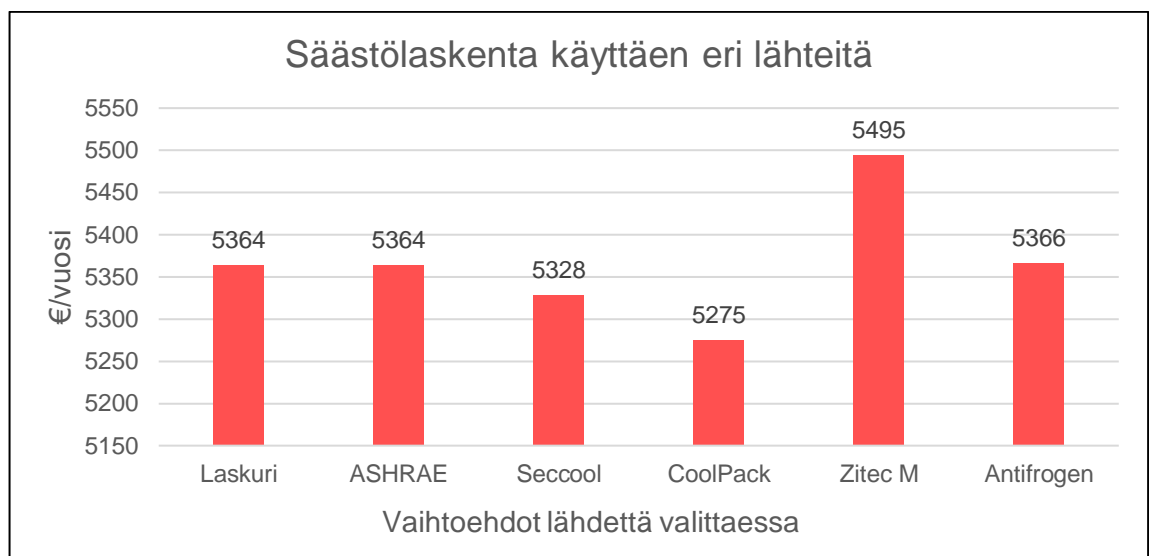


Kuva 37. Aineominaisuuksien muokkaaminen MagiCAD-mallinnusohjelmassa [28].

## 6 Epäkohdat ja säästöratkaisut

### 6.1 Lähtötietojen merkitys säästöön.

Säästölaskentaa tehtäessä vertailtiin, miten aineominaisuuksien lähde vaikuttaa rahalliseen säästöön. Kuvassa 38 on vertailtu lähteen merkitystä kesätilanteen energiankulutukseen. Huomataan, että laskentaohjelman laskuria käyttämällä saadaan sama säästö kuin ASHRAE:n arvoilla, mutta muita lähteitä käyttämällä säästö on 0–131 € riippuen lähteestä.



Kuva 38. Aineominaisuuksien lähteen valinnan vaikutus säästölaskennassa.

### 6.2 Geo-piirin lämmönsiirtonesteen laimentaminen

Laskentaohjelman avulla todettiin, että geo-piirin energiakustannukset laskisivat huomattavasti, jos glykolipitoisuus laimennettaisiin. 15 %:n glykolipitoisuuden katsottiin asiantuntijoiden kanssa omaavan riittävän pakkaskestävyyden. 15 %:n glykolin pakkaskestävyys on  $-6,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Laimennuksen ideana oli, että vanhaa nestettä poistetaan verkostosta ja laimentaminen tapahtuisi vettä lisäämällä. Glykolin laimennusprosessista oli kuitenkin paljon spekulointia, voidaanko tällaista laimennusta edes tehdä. Pelättiin, että uusi neste ei sekoitu tasaisesti, vaan lähtee kiertämään ”junana” verkostossa siten, että glykolipitoisuus on joissain paikoissa suurempi ja joissain paikoissa glykolia ei olisi ollenkaan.

Jos verkosto jouduttaisiin tyhjentämään ja laimeampi liuos jouduttaisiin ajamaan valmiiksi sekoitettuna, investointi ei enää olisi kannattava. Lämmönsiirtonesteitä toimittavan yrityksen asiantuntijalta tiedusteltiin, onnistuuko laimentaminen ja miten se tapahtuisi käytännössä. Asiantuntija sanoi, että laimentaminen onnistuu vettä lisäämällä, mutta järjestelmän suoja-aineen pitoisuutta täytyy lisätä. Kuvassa 39 on täyttöpumppu, jota voidaan käyttää verkoston täyttämiseen.



Kuva 39. Pumppu järjestelmän täyttöö varten.

### 6.2.1 Korroosiosuoja-aineen lisäys

Glykolipitoisuutta laimentaessa glykolipitoisuus laskee, mutta samalla laskee myös nesteen suoja-aineen pitoisuus. Alhaisempi glykolipitoisuus vaatii suuremman määrän suoja-ainetta, joten glykolipitoisuuden laimennuksessa on huomioitava suoja-aineen lisäys. Suoja-aine pitää glykoliliuoksen pH-arvon korroosion kannalta optimitasolla. Suoja-aine muodostaa putkiston seinämiin oksidikerroksen, joka estää korroosiotuotteiden irtaantumisen ja takaa näin verkostolle paremman lämmön siirtyvyyden. [29]

### 6.2.2 Ylijäämäglykoli

Comfort-jäähdytyslaitos on ollut vasta niin vähän aikaa käytössä, että geo-piiristä poistettu liuos voitaisiin käyttää hyödyksi kiinteistön muihin järjestelmiin, varastoida tai myydä. Lämmönsiirtoneste kannattaa antaa vaikka ilmaiseksi, jos joku sen haluaa tulla noutamaan, sillä jäteglykolin hävittäminen tämän kokoisesta järjestelmästä tulee erittäin kalliiksi. Laimennustyöstä urakkatarjouksen tehnyt yritys veloittaa jäteglykolin vastaan-

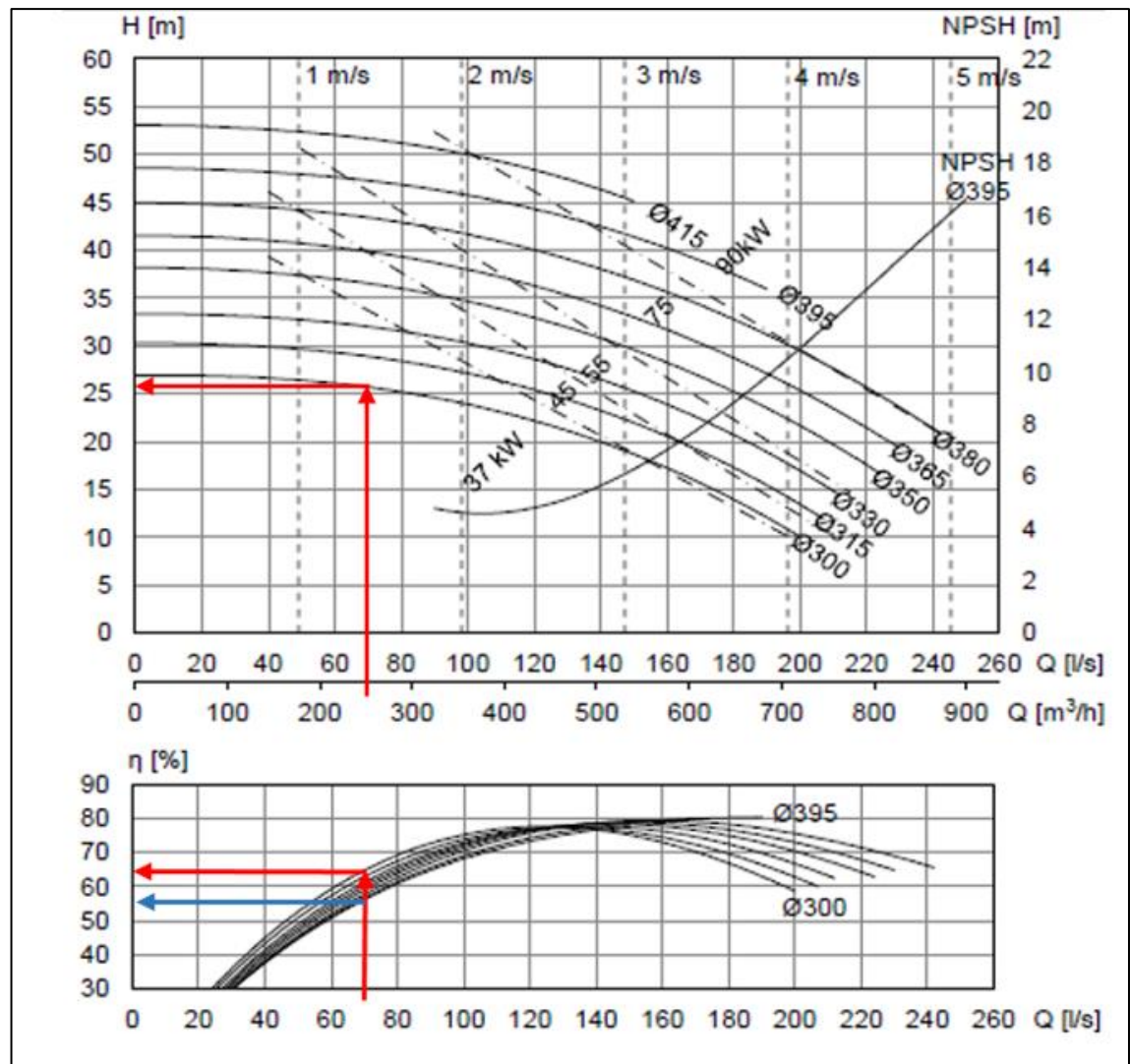
ottamisesta 0,5 €/litra. Comfort-jäähdytyslaitoksen geo-piirin tilavuus on 80 m<sup>3</sup>. Kun glykolipitoisuus laimennetaan 30 %:sta 15 %:iin, jäteglykolia tulee 40 m<sup>3</sup>, eli glykolin hävitys tulee maksamaan 20 000 €.

### 6.3 Kiertopumpun vaihtaminen

Citect-valvomon trendiseurannasta saatiin talteen laitoksessa toteutuneet paineet, virtaamat ja lämpötilat noin vuoden mittaiselta ajalta. Mittaustulokset siirrettiin Valvomon tietokoneelta Excel-laskentaohjelmaan. Trendiseurannasta huomattiin, että geo-piirin keskipakoispumppujen tilavuusvirrat olivat jäähdytyskaudella enintään 97 l/s, vaikka pumput on mitoitettu tilavuusvirralle 130 l/s. Mittaukset ovat ajalta 16.7.2017–17.7.2018. Vuonna 2018 keväällä lämpötilat olivat tavanomaisia tai hieman tavanomaista lämpimämmät. Hellettä eli yli 25 °C:n ulkolämpötiloja mitattiin vuonna 2018 40 päivänä vuodesta. Jos ulkolämpötila on ollut yli 25 °C, jäähdytysjärjestelmän pumppujen tilavuusvirran on pitänyt jossain kohtaa olla maksimaalisen mitoituksen mukainen eli 130 l/s. [30]

Konejäähdytyksen teho oli mitatulla jaksolla enintään noin 1 000 kW (kilowatti), vaikka järjestelmän konejäähdytyksen lämmönsiirtimen mitoitusteho on 3 200 kW. Järjestelmän kapasiteetti on siis todella reilusti ylimitoitettu.

Suunnitelmissa geo-piiriin on suunniteltu kesä- ja talvitilanteelle omat pumput, mutta konehuoneessa käydessä huomattiin, että molemmat pumput ovat samankokoiset. Valmistajan pumppukäyrästä huomataan, että näiden molempien pumppujen maksimivirtaama on 185 l/s ja nostokorkeus 38 metriä. Vaikka pumput ovat ylimitoitettuja tilavuusvirralla 130 l/s, siitä huolimatta järjestelmään on valittu sellaiset pumput, joiden kapasiteetit ovat mitoitettuja tilavuusvirtoja suuremmat. Molemmissa pumpuissa on 90 kW:n sähkömoottorit ja pumpun juoksupyörät ovat halkaisijaltaan 395 mm. Pumppujen energiatehokkuutta voitaisiin parantaa vaihtamalla pumppujen juoksupyörät pienemmäksi. Jos juoksupyörä vaihdettaisiin 395 mm:stä 300 mm:iin, pumpun hyötysuhde nousisi 55 %:sta ainoastaan 65 %:iin. Energiatehokkuuden kannalta olisi järkevää vaihtaa molemmat pumput tai ainakin talvitilanteen pumppu, jotta hyötysuhteeksi saataisiin 80 %. Kuvasta 40 nähdään hyötysuhteen nousu juoksupyörää vaihdettaessa. Kuvasta huomataan myös, että geo-piirin pumput toimisivat parhaalla hyötysuhteella tilavuusvirran ollessa 160 l/s. Nykyiset pumput ovat siis aivan liian isot.



Kuva 40. Kolmeksin AL-1250/4 SD-keskipakoispumpun hyötysuhdekäyrä [19].

Jos geo-piirin toinen pumpuista vaihdetaan pienempään, saadaan hyötysuhde nostettua paremmaksi. Geo-piirin AL-1250/4 SD pumppu voitaisiin vaihtaa pienempään AL-1202/4-malliin. Tällä toimenpiteellä hyötysuhde saataisiin nostettu 55 %:sta 77 %:iin.

## 7 Taloudellinen kannattavuus

### 7.1 Takaisinmaksuajan laskeminen

Taloudellisen kannattavuuden määrittämiseksi käytettiin nykyarvomenetelmää. Nykyarvo investoinnille lasketaan yhtälöllä 25 [31].

$$N = k \times T - d \times J - H \quad (25)$$

- N on nykyarvo  
 T on vuotuiset vakionettotuotot (tuotot-menot).  
 k on jälkeinpäin suoritettujen jaksollisten maksujen diskonttauskerroin.  
 J on jäännösarvo  
 d on diskonttauskerroin  
 H on hankintahinta

Jälkeinpäin suoritettujen jaksollisten maksujen diskonttauskerroin lasketaan yhtälöllä 26 [31]. Nimelliskorko sijoitetaan yhtälöön desimaaleina, joten korkoprosentti täytyy jakaa 100:lla eli esimerkiksi 5 %:n korko merkataan yhtälöön siten, että  $i = 0,05$ .

$$k = \frac{(1+i)^n - 1}{i(1+i)^n} \quad (26)$$

- k on jälkeinpäin suoritettujen jaksollisten maksujen diskonttauskerroin  
 i on nimelliskorko,  $(i/100)$   
 n on elinkaarijakson pituus vuosina

Diskonttauskerroin (d) lasketaan yhtälöllä 27 [30].

$$d = \frac{1}{(1+i)^n} \quad (27)$$

- d on jälkeinpäin suoritettujen jaksollisten maksujen diskonttauskerroin  
 i on nimelliskorko,  $(i/100)$   
 n on elinkaarijakson pituus

Energiakustannukset saattavat muuttua eri tavalla kuin yleinen kustannustason nousu. Tämä voidaan huomioida vähentämällä energian hinnannousu nimelliskorosta. Energian nimellinen hinnannousu huomioidaan yhtälöllä 28 [31].

$$r_e = \frac{i-e}{1+e} \quad (28)$$

- $r_e$  on energiakustannusten nousu  
 $i$  on nimelliskorko, ( $i/100$ )  
 $e$  on energian nimellinen hinnannousu, ( $e/100$ )

## 7.2 Investointien takaisinmaksuaika

Pumppujen energiankulutuksen laskennassa käytettiin Citect-valvomon seurannasta saatuja tietoja. Pumppujen tilavuusvirroista laskettiin keskimääräiset virtaamat, joita käytettiin energiakustannusten laskennassa.

Nykyarvon laskennassa käytettiin reaalkorolle arvoa 3 % ja energian hinnannousulle arvoa 4,6 %. Laskennan investointikustannukset perustuvat urakoitsijoilta pyydettyihin tarjouksiin.

Kannattavuuslaskelmat suoritettiin neljällä eri säästötoimenpiteellä, jotta varmistetaan siitä, mikä on järkevin säästötoimenpide. Koska geo-piirin keskipakoispumput on ylimitoitettu, ensiksi laskettiin, minkälainen säästö saataisiin aikaan pumpun juoksupyörää vaihtamalla. Urakoitsijan mukaan juoksupyörän vaihdolle tulisi hintaa noin 3 000 €. Toisella kerralla laskettiin säästö, kun mitoitetaan kokonaan uusi pumppu. Pumpun vaihdolle pyydettiin myös urakkatarjous. Hinta pumpun vaihdolle muodostuu 1 000 €:n asennuskuluista ja pumpun 7 000 €:n hankintahinnasta. Uuden pumpun mitoittamisen ansiosta pumpun hyötysuhde saatiin 80 %.

Näiden pienempien muutostoimenpiteiden jälkeen laskettiin glykolipitoisuuden laimentamisen vaikutus, kun 30 %:n etyleeniglykoli laimennetaan 15 %:iin. Glykolipitoisuuden laimennuksen kustannukset muodostuvat laimennustyöstä ja jäteglykolin hävityksestä. Työ glykolin laimentamiseen maksaa 9 600 € ja glykolin hävittäminen maksaa 20 000 €. Glykolipitoisuuden laimentamisen ansiosta nesteen lämmönsiirtokyky paranee, eli sama teho kuin ennen laimennusta saavutetaan pienemmällä tilavuusvirralla. Tämä tarkoittaa sitä, että pumppujen tilavuusvirta pienenee. Tilavuusvirran pienentyessä pumppujen hyötysuhde laskee lisää entisestään. Hyötysuhteella on niin suuri merkitys pumppujen energiankulutukseen, että vaikka glykolipitoisuuden laimennuksen ansiosta tarvitaan

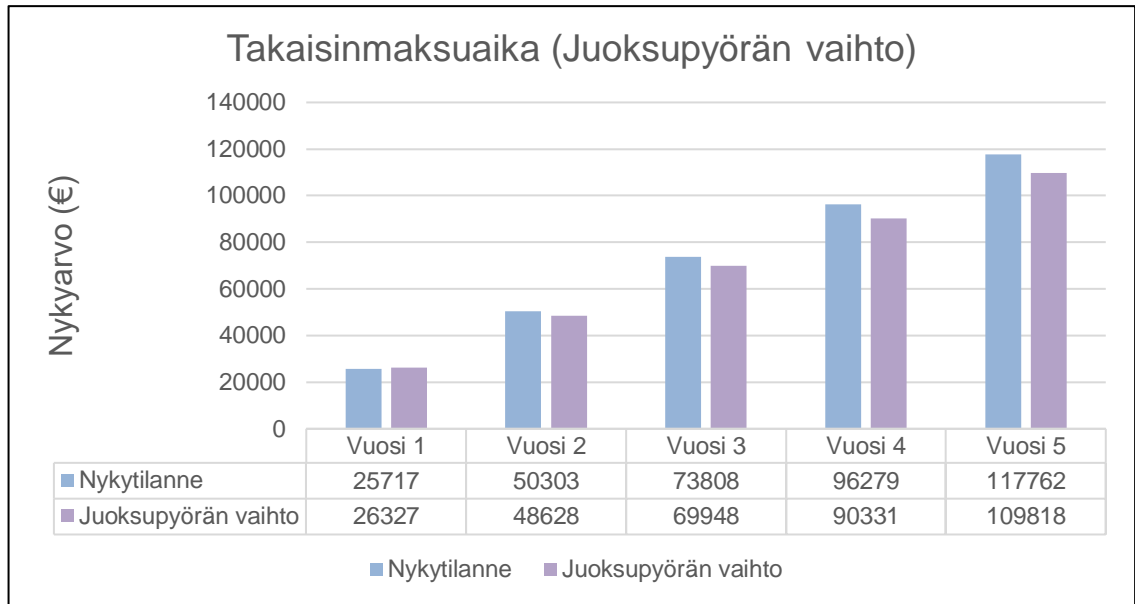
vähemmän virtausta, on edullisempaa pumpata korkeamman glykolipitoisuuden omaavaa nestettä paremmalla hyötysuhteella. Tämän vuoksi glykolipitoisuuden laimennuksen lisäksi mitoitettiin uusi pumppu.

Taulukossa 8 on esitetty investoinnin nykyarvolaskenta, kun geo-piirin pumpun 390 mm:n juoksupyörä vaihdetaan pienempään 315 mm:n juoksupyörään. Tällä toimenpiteellä takaisinmaksuajaksi tulee kaksi vuotta, minkä jälkeen investointi tuottaa noin 2 500 € vuodessa.

Taulukko 8. Nykyarvon laskenta, kun pelkkä juoksupyörä vaihdetaan.

Nykyarvolaskenta	Nykytilanne	Juoksupyörän vaihto	
Elinkaarijakson pituus	2	2	v
Investointikustannukset	0	3000	€
Vuotuinen pumppausenergia	269	244	MWh
Sähköenergian hinta	100	100	€/MWh
Vuotuinen sähkökustannus	26900	24400	€
Energian nimellinen hinnan nousu	4,6	4,6	%
Nimelliskorko	3,0	3,0	%
Jaksollisten maksujen diskonttauskerroin	1,91	1,91	
Jaksollisten energiamaksujen diskonttauskerroin	1,87	1,87	
Sähkökustannusten nykyarvo	50303	45628	€
Nykyarvo	<b>50303</b>	<b>48628</b>	€

Kuvasta 41 nähdään, että pelkkä juoksupyörän vaihto kääntyy kannattavaksi jo kahden vuoden aikana, minkä jälkeen se tuottaa noin 2 500 € vuodessa. Juoksupyörän vaihto on edullisin säästötoimenpide, mutta investoinnin tuotto jää kuitenkin melko alhaiseksi.



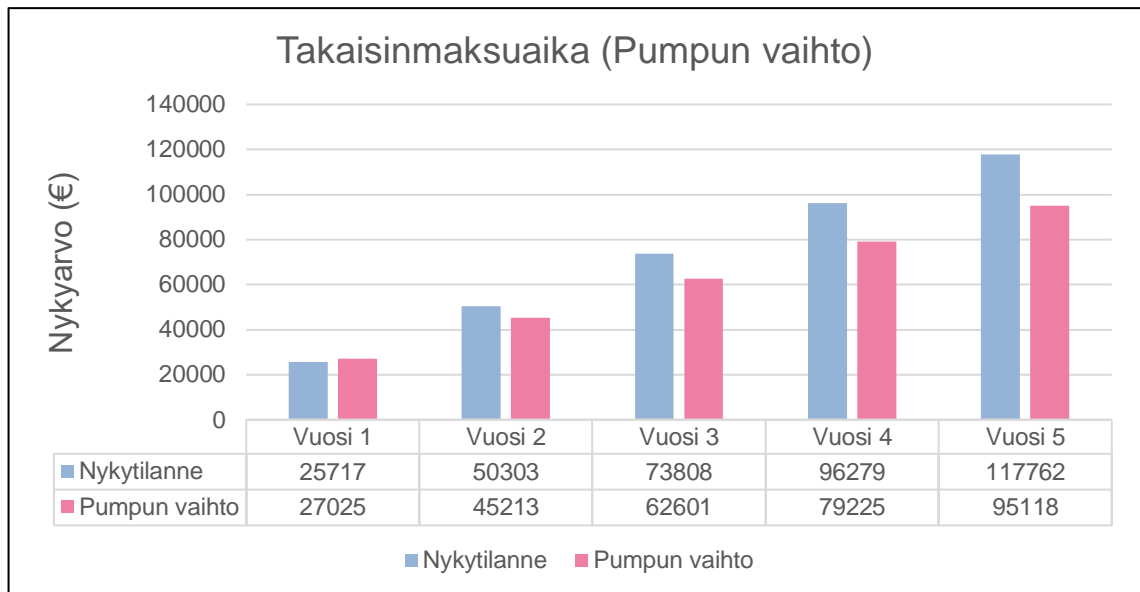
Kuva 41. Pylväsdiagrammi takaisinmaksuajasta, kun pumpun juoksupyörä vaihdetaan.

Taulukossa 9 on esitetty investoinnin nykyarvolaskenta, kun geo-piirin pumppu vaihdetaan sellaiseen pumppuun, jonka hyötysuhde on 80 %. Tällä toimenpiteellä takaisinmaksuajaksi tulee myös kaksi vuotta, mutta investoinnille saadaan parempi tuotto, kuin pelkästään juoksupyörää vaihtamalla. Pumpun vaihdolla saadaan tuottoa noin 7 000 € vuodessa.

Taulukko 9. Nykyarvon laskenta, kun geo-piirin pumppu vaihdetaan uuteen.

Nykyarvolaskenta	Nykytilanne	Pumpun vaihto	
Elinkaarijakson pituus	2	2	v
Investointikustannukset	0	8000	€
Vuotuinen pumppausenergia	269	199	MWh
Sähköenergian hinta	100	100	€/MWh
Vuotuinen sähkökustannus	26900	19900	€
Energian nimellinen hinnan nousu	4,6	4,6	%
Nimelliskorko	3,0	3,0	%
Jaksollisten maksujen diskonttauskerroin	1,91	1,91	
Jaksollisten energiamaksujen diskonttauskerroin	1,87	1,87	
Sähkökustannusten nykyarvo	50303	37213	€
<b>Nykyarvo</b>	<b>50303</b>	<b>45213</b>	€

Kuvasta 42 nähdään, että pumpun vaihtaminen kääntyy kannattavaksi jo kahden vuoden kohdalla.



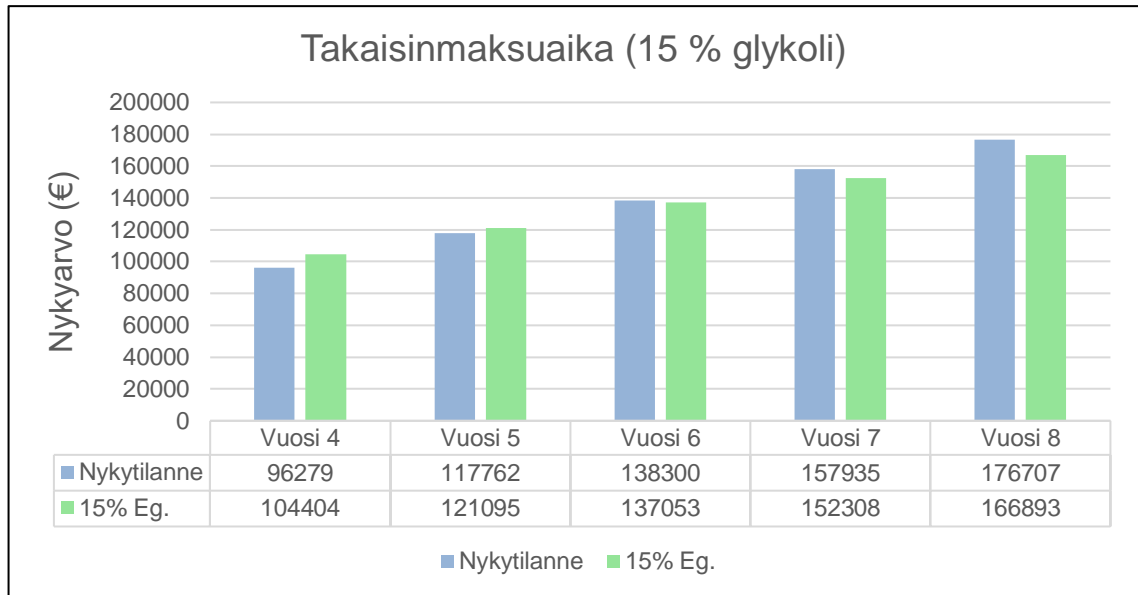
Kuva 42. Pylväsdiagrammi takaisinmaksuajasta, kun geo-piirin pumppu vaihdetaan.

Taulukossa 10 on esitetty investoinnin nykyarvolaskenta, kun geo-piirin glykolipitoisuus laimennetaan 30 %:sta 15 %:iin. Tällä toimenpiteellä takaisinmaksuajaksi saadaan kuusi vuotta, minkä jälkeen investointi tuottaa 6 060 € vuodessa. Glykolipitoisuuden laimentaminen ei siis yksistään ole järkevää, koska pelkästään pumpun vaihtamisella saadaan isompi tuotto reilusti nopeammalla takaisinmaksuajalla.

Taulukko 10. Nykyarvon laskenta, kun glykolipitoisuus laimennetaan.

Nykyarvolaskenta	Nykytilanne	15 % glykoli	
Elinkaarijakson pituus	6	6	v
Investointikustannukset	0	29600	€
Vuotuinen pumppausenergia	269	209	MWh
Sähköenergian hinta	100	100	€/MWh
Vuotuinen sähkökustannus	26900	20900	€
Energian nimellinen hinnan nousu	4,6	4,6	%
Nimelliskorko	3,0	3,0	%
Jaksollisten maksujen diskonttauskerroin	5,42	5,417	
Jaksollisten energiamaksujen diskonttauskerroin	5,14	5,141	
Sähkökustannusten nykyarvo	138300	107453	€
Nykyarvo	<b>138300</b>	<b>137053</b>	€

Kuvasta 43 huomataan, kuinka investointi kääntyy kannattavaksi vasta kuuden vuoden jälkeen.



Kuva 43. Pylväsdiagrammi takaisinmaksuajasta, kun ainoastaan glykolipitoisuus laimennetaan.

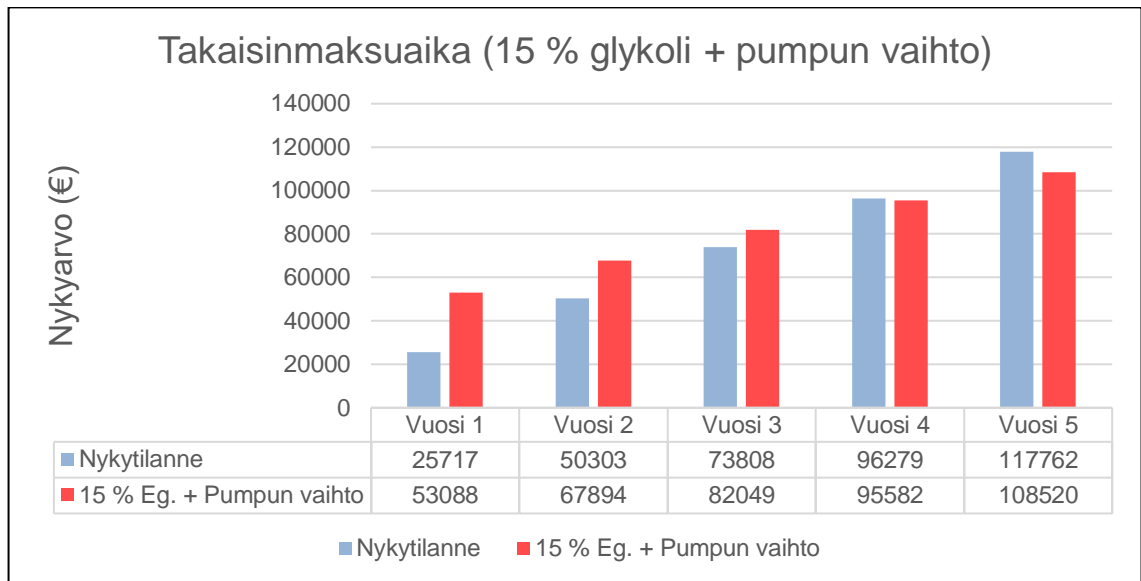
Glykolipitoisuuden laimentamisella on kuitenkin merkittävä vaikutus Comfort-laitoksen energiatehokkuuteen, joten glykolipitoisuuden laimentamiseen lisättiin vielä pumpun vaihto.

Taulukossa 11 on esitetty investoinnin nykyarvolaskenta, kun geo-piirin glykolipitoisuus laimennetaan 30 %:sta 15 %:iin sekä vaihdetaan pumppu, jolla hyötysuhde saadaan paremmaksi. Takaisinmaksuaika on neljä vuotta, minkä jälkeen investointi tuottaa säästöä noin 10 750 € vuodessa.

Taulukko 11. Nykyarvon laskenta, kun glykolipitoisuus laimennetaan ja pumpun vaihdetaan.

Nykyarvolaskenta	Nykytilanne	15% glykoli + pumpun vaihto	
Elinkaarijakson pituus	4	4	v
Investointikustannukset	0	37600	€
Vuotuinen pumppausenergia	269	162	MWh
Sähköenergian hinta	100	100	€/MWh
Vuotuinen sähkökustannus	26900	16200	€
Energian nimellinen hinnan nousu	4,6	4,6	%
Nimelliskorko	3,0	3,0	%
Jaksollisten maksujen diskonttauskerroin	3,72	3,72	
Jaksollisten energiamaksujen diskonttauskerroin	3,58	3,58	
Sähkökustannusten nykyarvo	96279	57982	€
<b>Nykyarvo</b>	<b>96279</b>	<b>95582</b>	€

Kuvasta 44 nähdään, kuinka glykolipitoisuuden laimennus yhdistettynä pumpun vaihtoon kääntyy kannattavaksi jo neljän vuoden jälkeen.



Kuva 44. Takaisinmaksuaika, kun glykolipitoisuus laimennetaan ja pumppu vaihdetaan.

Comfort-jäähdytyslaitos on ylimitoitettu reilusti, joten pienikin säästötoimenpide vaikuttaa pumppausenergian kulutukseen positiivisesti. Jos isompaan investointiin ei haluta lähteä, pelkällä pumpun vaihdolla saadaan jo merkittävä säästö ja nopea takaisinmaksuaika. Comfort-laitoksessa on kuitenkin väljyyttä paljon, ja paras mahdollinen säästötoimenpide olisi vaihtaa geo-piiriin laimeampi liuos ja mitoittaa uudet pumput, jotka toimivat paremmalla hyötysuhteella. Näiden kahden säästötoimenpiteen yhdistäminen takaa maksimaalisen tuoton ja kohtuullisen takaisinmaksuajan.

Kannattavuuslaskentojen perusteella voidaan todeta, että glykolipitoisuuden laimentaminen on kannattavaa, mutta siitä huolimatta pumpun hyötysuhteella on niin suuri merkitys, että pumpun toimintapisteen muutos on aina huomioitava glykolipitoisuuden laimennuksen yhteydessä.

### 7.3 Glykolipitoisuuden laimennuksen kannattavuus muissa kohteissa

Comfort-jäähdytyslaitos on ylimitoitettu reilusti, ja tällä hetkellä toteutuvat maksimivirtaamat ovat laitoksen kapasiteettia noin 60 % pienemmät eli laitos toimii tällä hetkellä huo-

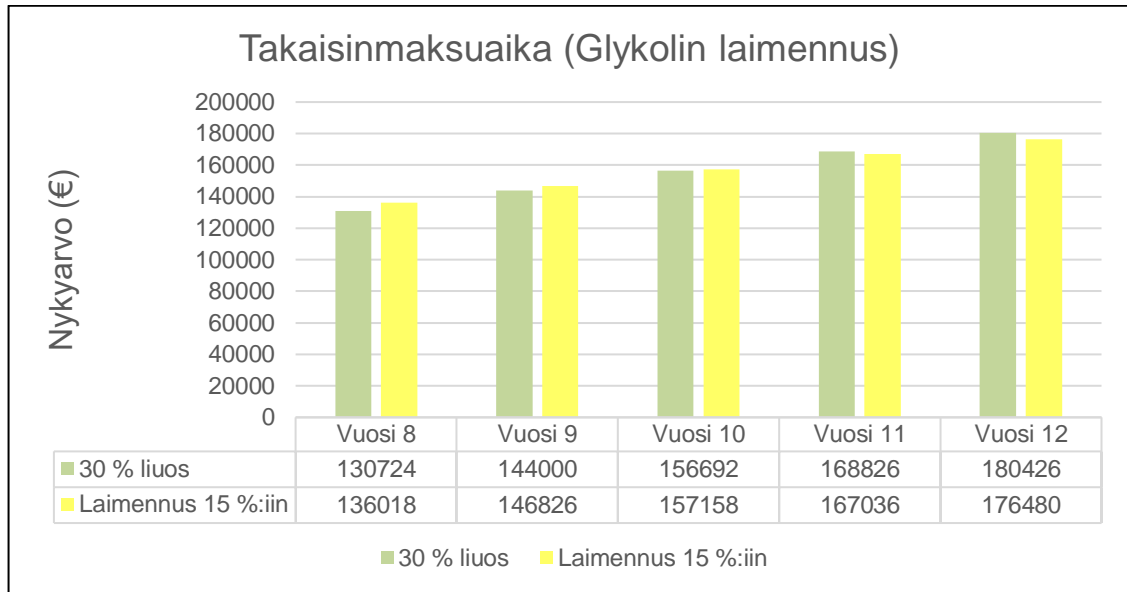
nolla hyötysuhteella. Jos tarkastellaan vastaavankokoista laitosta, joka on lähtökohtaisesti mitoitettu oikein, todetaan, että glykolipitoisuuden laimennus ei enää tässä tapauksessa ole niin kannattavaa.

Taulukossa 12 on esitetty investoinnin nykyarvolaskenta, kun glykolipitoisuus laimennetaan 30 %:sta 15 %:iin. Tässä kuvitteellisessa järjestelmässä pumpun hyötysuhteen on 80 %. Oletetaan, että glykolipitoisuuden laimennuksen johdosta pumpun hyötysuhde säilyisi samana. Taulukossa on laskettu tälle kuvitteelliselle järjestelmälle takaisinmaksuaika. Kun glykolipitoisuuden laimennukseen investoidaan 29 600 €, huomataan, että takaisinmaksuajaksi saadaan 11 vuotta, minkä jälkeen investointi tuottaisi vuodessa vain 3 750 €.

Taulukko 12. Investoinnin nykyarvon laskenta kuvitteellisessa järjestelmässä.

Nykyarvolaskenta	30 % glykoli	15% glykoli	
Elinkaarijakson pituus	11	11	v
Investointikustannukset	0	29600	€
Vuotuinen pumppausenergia	199	162	MWh
Sähköenergian hinta	100	100	€/MWh
Vuotuinen sähkökustannus	19900	16200	€
Energian nimellinen hinnan nousu	4,6	4,6	%
Nimelliskorko	3,0	3,0	%
Jaksollisten maksujen diskonttauskerroin	9,25	9,25	
Jaksollisten energiamaksujen diskonttauskerroin	8,48	8,48	
Sähkökustannusten nykyarvo	168826	137436	€
Nykyarvo	<b>168826</b>	<b>167036</b>	€

Kuvasta 45 nähdään, kuinka glykolipitoisuuden laimennus kääntyy kannattavaksi vasta 11 vuoden jälkeen. Takaisinmaksuaika tällöin olisi melko pitkä, joten verkoston glykolipitoisuus on syytä määrittää oikeaksi jo järjestelmää käyttöön ottaessa.



Kuva 45. Takaisinmaksuaika, kun glykolipitoisuus laimennetaan.

## 8 Yhteenveto

Insinööriyössä tutkittiin glykolipitoisuuden vaikutusta jäähdytysjärjestelmän energiatehokkuuteen. Työn tavoitteena oli selvittää, kattaako laitoksen geo-piirin lämmönsiirtonesteen laimennus investointikustannukset järkevällä takaisinmaksuajalla.

Opinnäytetyössä esiteltiin Comfort-jäähdytyslaitoksen toimintaperiaate ja käytiin yksityiskohtaisesti läpi geo-piirin prosessi lämmitys- ja jäähdytyskauden aikana. Säästölasennan suorittamiseen tarvittavat yhtälöt ja menetelmät käytiin myös läpi.

Järjestelmän energiakustannuksia laskettiin Excel-taulukkolaskentaohjelmaa hyödyntäen. Aluksi tarkoitus oli tehdä hyvin yksinkertainen laskentataulukko, jolla pystytään laskemaan pumppausenergian kulutus. Glykolin aineominaisuudet saatiin valmiista laskentatyökalusta, joten tarkoitus oli hyödyntää tätä laskentatyökalua mahdollisimman pitkälle. Laskentatyökalun aineominaisuuksia käyttämällä säästöä syntyi niin paljon, että oli syytä epäillä laskentatyökalun luotettavuutta. Laskentatyökalua tarkastelemalla huomattiin, että aineominaisuudet eivät olleet lähelläkään luotettavien lähteiden arvoja. Tästä syystä insinööriyön rajaus laajeni, ja päätettiin tehdä kokonaan uusi ohjelma, mikä laskee aineominaisuudet tarkasti taulukkoarvojen mukaisesti mille tahansa glykolipitoisuudelle

1 prosenttiyksikön tarkkuudella. Laskentaohjelma kehittyi vähitellen, ja ohjelmaan tehtiin uusia toimintoja laskennan nopeuttamiseksi. Lopputuloksena syntyi laskentaohjelma, jolla pystytään laskemaan jäähdytys- tai lämmitysjärjestelmän painehäviöt käyttäen viittä eri glykolipitoisuutta. Laskentaohjelma antaa lopputuloksena jokaiselle pitoisuudelle pumppausenergian kulutuksen ja laskee vuotuiset pumppauskustannukset huomioiden kesä-, välikausi- ja talviolosuhteet.

Kannattavuuslaskelman perusteella todettiin, että geo-piirin glykolipitoisuuden laimennus ei yksistään ole järkevä investointi. Geo-piirin pumppujen huonon hyötysuhteen vuoksi halvempi ja tuottavampi toimenpide olisi vaihtaa pelkät geo-piirin kiertopumput. Glykolipitoisuuden laimennuksella on kuitenkin merkittävä vaikutus Comfort-jäähdytyslaitoksen energiatehokkuuteen, joten järkevin säästötoimenpide olisi laimentaa geo-piirin glykolipitoisuus 30 %:sta 15 %:iin ja mitoittaa uudet kiertopumput. Glykolipitoisuuden laimentaminen yhdistettynä pumppujen vaihdolla tuottaa vuodessa noin 11 000 €, ja investointi maksaa itsensä takaisin vain neljässä vuodessa.

Tarkastelussa ollut järjestelmä on kuitenkin poikkeustapaus, koska järjestelmä on suunniteltu 60 % toteutunutta tehontarvetta suuremmaksi. Lähtökohtaisesti oikein mitoitettussa järjestelmässä glykolipitoisuutta laimennettaessa takaisinmaksuajaksi tulisi noin 11 vuotta, koska Comfort-jäähdytyslaitoksen kohdalla säästö muodostuu pääasiassa pumpun hyötysuhteen muutoksesta.

Laskentaohjelman kehittäminen ja suunnitteleminen vei suurimman osan ajasta, mutta ohjelman laatimisen ansiosta Excelin käsittelytaitoni nousivat aivan uudelle tasolle. Comfort-jäähdytyslaitoksen toiminnan ja prosessien omaksuminen asetti myös haastetta.

Tämän opinnäytetyön myötä ole saanut laajemman käsityksen teollisuuden jäähdytysjärjestelmistä ja lisännyt valmiutta toimia suurien jäähdytysjärjestelmien suunnittelijana.

Lopuksi haluan kiittää Granlund Oy:n LVI-asiantuntija Juha-Petteri Muukkosta, joka mahdollisti tämän insinöörityön tekemisen.

## Lähteet

- 1 Onnettomuuden vaaraa aiheuttavat aineet – turvallisuusohjeet. 2017. Verkkoaineisto. TTL. <<https://www.ttl.fi/ova/kaytop.html>>. Luettu 24.07.2018.
- 2 Types of gasketed plate heat exchangers. Verkkoaineisto. Alfa Laval. <<https://www.alfalaval.com/microsites/gphe/types/>>. Luettu 4.9.2018.
- 3 Rakennusten sisäilmasto ja ilmanvaihto. 2012. Suomen rakentamismääräyskokoelma, osa D2. Ympäristöministeriö. Luettu 20.2.2019.
- 4 Rakennusten energiatehokkuus. 2011. Suomen rakentamismääräyskokoelma, osa D3. Ympäristöministeriö. Luettu 22.2.2019.
- 5 Valkeapää, Aki. 2015. LVI-tekniikan mitoituserusteet, putkiverkon painehäviöt. Opetusmateriaali. Metropolia Ammattikorkeakoulu.
- 6 Venturi-ilmiö. Verkkoaineisto. Wikipedia. <[https://en.wikipedia.org/wiki/Venturi\\_effect](https://en.wikipedia.org/wiki/Venturi_effect)>. Luettu 20.1.2019.
- 7 Fundamentals of Fluid Mechanics. 2007. Verkkoaineisto. Slide Serve. <<https://www.slideserve.com/byron-buckner/chapter-8-flow-in-pipes>>. Luettu 15.2.2019.
- 8 Kudela, Hendryk. 2007. Hydraulic losses in pipes. Verkkoaineisto. <[http://fluid.itcmp.pwr.wroc.pl/~znmp/dydaktyka/fundam\\_FM/Lecture11\\_12.pdf](http://fluid.itcmp.pwr.wroc.pl/~znmp/dydaktyka/fundam_FM/Lecture11_12.pdf)>. Luettu 21.3.2018.
- 9 Blower, G.J. 2006. Plumbing Mechanical Services. Essex: Pearson Education Limited.
- 10 Viskositeetti. Verkkoaineisto. Wikipedia. <<https://fi.wikipedia.org/wiki/Viskositeetti>>. Luettu 14.1.2019.
- 11 Relative Roughness of Pipe. Verkkoaineisto. Nuclear Power. <<https://www.nuclear-power.net/nuclear-engineering/fluid-dynamics/major-head-loss-friction-loss/relative-roughness-of-pipe/>>. Luettu 20.2.2019.
- 12 Charette, Jacques. 2003. Pipe Roughness Values.
- 13 Davis, Tom. Moody Diagram. Verkkoaineisto. <https://jp.mathworks.com/matlab-central/fileexchange/7747-moody-diagram>>. Luettu 15.1.2019.
- 14 Lämpöjohtojen laskennallinen mitoitus. Verkkoaineisto. Cupori. <[http://www.faktaomkoppar.se/kupariputkien-asennus/asennus-suunnitteluopas/mitoitus-lampojohdot/laskennallinen-mitoitus-lampojohdot\\_copy](http://www.faktaomkoppar.se/kupariputkien-asennus/asennus-suunnitteluopas/mitoitus-lampojohdot/laskennallinen-mitoitus-lampojohdot_copy)>. Luettu 13.2.2019.
- 15 Equivalent length. 2010. Verkkoaineisto. Wordpress. <[https://jensapardi.files.wordpress.com/2010/03/calc\\_p\\_drop\\_liq1.pdf](https://jensapardi.files.wordpress.com/2010/03/calc_p_drop_liq1.pdf)>. Luettu 5.3.2019.
- 16 Pressure losses from fittings. 2016. Verkkoaineisto. Native Dynamics. <<https://neutrium.net/tag/pressure-drop>>. Luettu 16.1.2019.

- 17 Energiätehokkaat pumput. 2012. Verkkoaineisto. Motiva Oy. <[https://www.motiva.fi/ajankohtaista/julkaisut/hankinnat/energiatehokkaat\\_pumput10735.shtml](https://www.motiva.fi/ajankohtaista/julkaisut/hankinnat/energiatehokkaat_pumput10735.shtml)>. Luettu 6.2.2019.
- 18 Centrifugal-pump basics. Verkkoaineisto. KSB. <<https://www.ksb.com/ksb-id-en/Press/magazine/centrifugal-pump-basics/1758114>>. Luettu 12.3.2019.
- 19 AL-1250/4. Verkkoaineisto. Kolmeks Oy. <<https://www.kolmeks.fi/tuotteet/pumput-ja-paineenkorotusasemat/teollisuuspumput>>. Luettu 17.8.2018.
- 20 CoolPack Version 1.50. 2012. IPU & Department of Mechanical Engineering Technical University of Denmark.
- 21 Least squares. Verkkoaineisto. Wikipedia. <[https://en.wikipedia.org/wiki/Least\\_squares](https://en.wikipedia.org/wiki/Least_squares)>. Luettu 12.2.2019.
- 22 ASHRAE Fundamentals Handbook. 2001. ARHRAE. Luettu 3.4.2018.
- 23 Engineering and Operating guide for DOWTHERM SR-1 and DOWTHERM 4000 Inhibited Ethylene Glycol-based Heat Transfer Fluids. 2008. Dow Chemical company.
- 24 Seccool Version 1.3.3. 2007. IPU & Department of Mechanical Engineering Technical University of Denmark.
- 25 Physical properties of Antifrogen N. 2000. Clariant.
- 26 Physical properties of ethylene glycol. 2002. Ziteg M.
- 27 VBA-perusteet. Verkkoaineisto. Jyväskylän yliopiston IT-tiedkunta. <<http://apro.mit.jyu.fi/doc/tiedonhallinta/vba/>>. 12.3.2019.
- 28 MagiCAD 2019 for AutoCAD. 2019. Progman Oy.
- 29 Kiertovesijärjestelmien korroosiosuojaus. Verkkoaineisto. KL-lämpö. <[https://www.kl-lampo.com/files/tietopankki/artikkelit/ammattirakentaja\\_artikkeli\\_kk-620.pdf](https://www.kl-lampo.com/files/tietopankki/artikkelit/ammattirakentaja_artikkeli_kk-620.pdf)>. Luettu 13.2.2019.
- 30 Vuoden 2018 sää. 2019. Verkkoaineisto. Ilmatieteen laitos. <<https://ilmatieteenlaitos.fi/vuosi-2018>>. Luettu 20.2.2019.
- 31 Yrjölä, Jukka. 2006. Investointilaskelmat. Opetusmateriaali. Metropolia Ammattikorkeakoulu.

## ASHRAE:n tiheystaulukko [21]

Tiheys (kg/m <sup>3</sup> )									
Pitoisuus T->	10 %	20 %	30 %	40 %	50 %	60 %	70 %	80 %	90 %
-35					1089,94	1104,6	1118,61	1132,11	
-30					1089,04	1103,54	1117,38	1130,72	
-25					1088,01	1102,36	1116,04	1129,21	1141,87
-20				1071,98	1086,87	1101,06	1114,58	1127,57	1140,07
-15				1070,87	1085,61	1099,64	1112,99	1125,82	1138,14
-10			1054,31	1069,63	1084,22	1098,09	1111,28	1123,94	1136,09
-5		1036,85	1053,11	1068,28	1082,71	1096,43	1109,45	1121,94	1133,91
0	1018,73	1035,67	1051,78	1066,8	1081,08	1094,64	1107,5	1119,82	1131,62
5	1017,57	1034,36	1050,33	1065,21	1079,33	1092,73	1105,43	1117,58	1129,2
10	1016,28	1032,94	1048,76	1063,49	1077,46	1090,7	1103,23	1115,22	1126,67
15	1014,87	1031,39	1047,07	1061,65	1075,46	1088,54	1100,92	1112,73	1124,01
20	1013,34	1029,72	1045,25	1059,68	1073,35	1086,27	1098,48	1110,13	1121,23
25	1011,69	1027,93	1043,32	1057,6	1071,11	1083,87	1095,92	1107,4	1118,32
30	1009,92	1026,02	1041,26	1055,39	1068,75	1081,35	1093,24	1104,55	1115,3
35	1008,02	1023,99	1039,08	1053,07	1066,27	1078,71	1090,43	1101,58	1112,15
40	1006,01	1021,83	1036,78	1050,62	1063,66	1075,95	1087,51	1098,48	1108,89
45	1003,87	1019,55	1034,36	1048,05	1060,94	1073,07	1084,46	1095,27	1105,5
50	1001,61	1017,16	1031,81	1045,35	1058,09	1070,06	1081,3	1091,93	1101,99
55	999,23	1014,64	1029,15	1042,54	1055,13	1066,94	1078,01	1088,48	1098,36
60	996,72	1011,99	1026,36	1039,61	1052,04	1063,69	1074,6	1084,9	1094,6
65	994,1	1009,23	1023,45	1036,55	1048,83	1060,32	1071,06	1081,2	1090,73
70	991,35	1006,35	1020,42	1033,37	1045,49	1056,83	1067,41	1077,37	1086,73
75	988,49	1003,34	1017,27	1030,07	1042,04	1053,22	1063,64	1073,43	1082,61
80	985,5	1000,21	1014	1026,65	1038,46	1049,48	1059,74	1069,36	1078,37
85	982,39	996,96	1010,6	1023,1	1034,77	1045,63	1055,72	1065,18	1074,01
90	979,15	993,59	1007,09	1019,44	1030,95	1041,65	1051,58	1060,87	1069,53
95	975,8	990,1	1003,45	1015,65	1027,01	1037,55	1047,32	1056,44	1064,92
100	972,32	986,48	999,69	1011,74	1022,95	1033,33	1042,93	1051,88	1060,2
105	968,73	982,75	995,81	1007,71	1018,76	1028,99	1038,43	1047,21	1055,35
110	965,01	978,89	991,81	1003,56	1014,46	1024,52	1033,8	1042,41	1050,38
115	961,17	974,91	987,68	999,29	1010,03	1019,94	1029,05	1037,5	1045,29
120	957,21	970,81	983,43	994,9	1005,48	1015,23	1024,18	1032,46	1040,08
125	953,12	966,59	979,07	990,38	1000,81	1010,4	1019,19	1027,3	1034,74

Putken painehäviötaulukko

Päivätsä λ <sub>p</sub>		°C													Pa					
30 %	10	l	d <sub>e</sub>	Q	Δt	K	ρ	C <sub>p</sub>	Φ	U	k/d	v	Re	Re x k/d	Itterointi	oikea	Suhde	λ <sub>p</sub>	Δp	
		m	mm	m³/s	C	mm	kg/m³	kJ/kgK	kW	m²/s	mm	m/s			vasen	%				
Konehuone 1.1		34,5	316	0,185	3	0,05	1,049	3,6	2105	2,81E-06	0,00016	2,4	265026	42	7,9	7,9	100	0,0162	5153	
Konehuone 1.2		34,5	316	0,185	3	0,05	1,049	3,6	2105	2,81E-06	0,00016	2,4	265026	42	7,9	7,9	100	0,0162	5153	
	2.1	89,7	266	0,079	3	0,05	1,049	3,6	902	2,81E-06	0,00019	1,4	134832	25	7,4	7,4	100	0,018	6466	
	2.2	100,9	266	0,079	3	0,05	1,049	3,6	902	2,81E-06	0,00019	1,4	134832	25	7,4	7,4	100	0,018	7272	
	3.1	112,0	214	0,053	3	0,05	1,049	3,6	602	2,81E-06	0,00023	1,5	112044	26	7,3	7,3	100	0,0188	11267	
	3.2	112,0	214	0,053	3	0,05	1,049	3,6	602	2,81E-06	0,00023	1,5	112044	26	7,3	7,3	100	0,0188	11267	
	4.1	89,0	163	0,026	3	0,05	1,049	3,6	301	2,81E-06	0,00031	1,3	73507	23	7,0	7,0	100	0,0205	9480	
	4.2	89,0	163	0,026	3	0,05	1,049	3,6	301	2,81E-06	0,00031	1,3	73507	23	7,0	7,0	100	0,0205	9480	
	5.1														1,0	1,0	100	0,0176		
	5.2														1,0	1,0	100	0,0005		
	6.1														1,0	1,0	100	0,0232		
	6.2														1,0	1,0	100	11,001		
	7.1														1,0	1,0	100	12,001		
	7.2														1,0	1,0	100	13,001		
	8.1														1,0	1,0	100	14,001		
	8.2														1,0	1,0	100	0,0155		
	9.1														1,0	1,0	100	16,001		
	9.2														1,0	1,0	100	17,001		
	10.1														1,0	1,0	100	18,001		
	10.2														1,0	1,0	100	19,001		
																		Δp	65537	

Putkiosien painehäviötaulukko

	$(L/D)_{\text{ekv}}$	$(L/D)_{\text{ekv}}$	$(L/D)_{\text{ekv}}$	$(L/D)_{\text{ekv}}$	$(L/D)_{\text{ekv}}$	$(L/D)_{\text{ekv}}$	$(L/D)_{\text{ekv}}$	$(L/D)_{\text{ekv}}$	$(L/D)_{\text{ekv}}$						
	28,3	0	84,8	28,3	57	170	170	28,3	57						
	10														
	meno meno paluu paluu meno paluu meno paluu														
	30 % 10 0,5 0 1,5 0,5 1 3 3 0,5 1 10														
	$\zeta_{\text{käyvä}}$	$\zeta_{\text{T-haara}}$	$\zeta_{\text{T-haara}}$	$\zeta_{\text{T-haara}}$	$\zeta_{\text{T-haara}}$	$\zeta_{\text{T-haara}}$	$\zeta_{\text{T-haara}}$	$\zeta_{\text{supistus}}$	$\zeta_{\text{supistus}}$	$l_{\text{ekv}}$	$\lambda$	$d_s$	$\rho$	$v$	$\Delta p$
	kpl	kpl	kpl	kpl	kpl	kpl	kpl	kpl	kpl	m		mm	kg/m <sup>3</sup>	m/s	Pa
Konehuone 1.1										0,00	0,0181	316	1049	1,08	
Konehuone 1.2										0,00	0,0181	316	1049	1,08	
2.1	13				1			1		150,43	0,0205	266	1049	0,65	2603
2.2	13				1			1		157,95	0,0205	266	1049	0,65	2733
3.1	12				1			1		114,65	0,0214	214	1049	0,68	2771
3.2	12				1			1		120,68	0,0214	214	1049	0,68	2917
4.1										0,00	0,0235	163	1049	0,58	
4.2										0,00	0,0235	163	1049	0,58	
5.1										0,00	0,0176	0	1049		
5.2										0,00	9,0005	0	1049		
6.1										0,00	0,0232	0	1049		
6.2										0,00	11,0005	0	1049		
7.1										0,00	12,0005	0	1049		
7.2										0,00	13,0005	0	1049		
8.1										0,00	14,0005	0	1049		
8.2										0,00	0,0155	0	1049		
9.1										0,00	16,0005	0	1049		
9.2										0,00	17,0005	0	1049		
10.1										0,00	18,0005	0	1049		
10.2										0,00	19,0005	0	1049		
	11025 Pa														

## Laskenta-välilehti

Kesä tilanne	c	d	e	f	g	
	1	2	3	4	5	
Glykoli	30 %	25 %	20 %	15 %	10 %	
Lämpötila	10	10	10	10	10	°C
Jäätymispiste	-15,8	-12,1	-8,9	-6,1	-3,7	°C
Q	85	83,6	82,3	81,2	80,2	dm <sup>3</sup> /s
$\Delta P_{\text{pumppu}}$	229	214	202	191	179	
MVP	22,3	21,0	19,9	19,0	18,0	m
$\eta_p$	62 %	78 %	78 %	77 %	77 %	
$\eta_m$	88 %	88 %	88 %	88 %	88 %	
$\eta_g$	97 %	97 %	97 %	97 %	97 %	
$P_{2\text{akseliteto}}$	31,40	22,96	21,30	20,17	18,69	kW
$P_{1\text{ottoteto}}$	37	27	25	24	22	kW
Ajanjakso	2880	2880	2880	2880	2880	h
Energia	106	77	72	68	63	MWh
Sähkön hinta	100	100	100	100	100	€/MWh
Kustannus/a	10593	7748	7185	6804	6304	€/vuosi
Säästö		2845	3408	3789	4288	€
$\rho$	1048,76	1041,00	1032,94	1024,63	1016,28	kg/m <sup>3</sup>
$C_p$	3,62	3,71	3,79	3,88	3,95	kJ/kgK
$\nu$	2,81	2,41	2,11	1,88	1,53	mm <sup>2</sup> /s
g	9,81	9,81	9,81	9,81	9,81	m/s <sup>2</sup>
Q	0,085	0,084	0,082	0,081	0,080	m <sup>3</sup> /s
$\Delta t$	7,0	7,0	7,0	7,0	7,0	
$\Phi$	2257	2257	2257	2257	2257	
Putkisto	15770	14755	13895	13171	12348	
putkiosat	11025	10315	9713	9207	8630	
Muut	202205	189196	178171	168887	158325	
Yhteensä	229000	214267	201779	191265	179302	

## Säästö-välilehti

		Käyttöaika		Nesteen lämpötila		
		4		10		KK/vuosi
		2880				h
						°C

Kesä tilanne	1	2	3	4	5	
Lähtötiedot	Laskuri	Laskuri	Laskuri	Laskuri	Laskuri	
Glykoli	30 %	25 %	20 %	15 %	10 %	
Jäätyminen	-15,8	-12,1	-8,9	-6,1	-3,7	°C
Q	85	84	82	81	80	dm <sup>3</sup> /s
$\Delta p_{pumppu}$	229	214	202	191	179	kPa
MVP	22,3	21	20	19	18	m
$\eta_p$	62 %	78 %	78 %	77 %	77 %	
$\eta_m$	88 %	88 %	88 %	88 %	88 %	
$\eta_t$	97 %	97 %	97 %	97 %	97 %	
$P2_{akseliteho}$	31	23	21	20	19	kW
$P1_{ottoteho}$	36,78	26,90	24,95	23,62	21,89	kW
Energia	106	77	72	68	63	MWh/vuosi
Sähkön hinta	100	100	100	100	100	€/MWh
Kustannus/a	10593	7748	7185	6804	6304	€/vuosi
<b>Säästö</b>		<b>2845</b>	<b>3408</b>	<b>3789</b>	<b>4288</b>	€/vuosi

Pitoisuus	30 %	25 %	20 %	15 %	10 %	
Yhteensä	275	191	176	166	152	MWh/vuosi
Yhteensä		8468	9885	10886	12335	€/vuosi

## Pikalaskuri-välilehti

Käyttökäyttö:						Putkikan pituus (vaikoin reitti)	
Valitse fluidit Ainaaminäruudet välilehdeltä						44	m
Täytä vaaleat kentät						Δt	3,0
Täytä vaaleat kentät						K	0,05 Materiaalin korkeuskorrain
Sytä pumpujen hyötysuhteet						d <sub>s</sub>	164,3 mm
Painonappia "Laskel." <span style="float: right;">alkava 100%</span>						Käyttöra	6 KK/vuosi
Siniset tekstit ovat linkitettyjä raluja						Sähkön hinta	75 l/MWh
Rivit 33- 64 on piilotettuna						Käyttöra	4320 h
Laske		Näytä solut					
100,00%							

Glykeli	30%	25%	20%	15%	10%	
Lämpötila	10	10	10	10	10	
Jäätymäpiste	-15,8	-12,1	-8,4	-6,1	-3,2	°C
Q	30	30	29	29	28	dm <sup>3</sup> /s
MVP	6	6	5	5	5	m
ΔP <sub>putki</sub>	60	56	53	51	48	kPa
η <sub>p</sub>	80%	80%	80%	80%	80%	
η <sub>m</sub>	88%	88%	88%	88%	88%	
η <sub>s</sub>	97%	97%	97%	97%	97%	
P <sub>2</sub> -laskelma	2,3	2,1	1,9	1,8	1,7	kW
P <sub>1</sub> -laskelma	2,6	2,4	2,3	2,1	2,0	kW
Ajanjakso	4320	4320	4320	4320	4320	h
Energia	11	11	10	9	9	MWh
Sähkön hinta	75	75	75	75	75	l/MWh
Kurttomäärä	854	789	734	688	642	l/vuosi
Säästö		65	120	166	213	l/vuosi
ρ	1048,76	1041,00	1032,94	1024,63	1016,28	kg/m <sup>3</sup>
ν	2,81	2,41	2,11	1,88	1,54	mm <sup>2</sup> /s
q	9,81	9,81	9,81	9,81	9,81	m/s
Q	0,03	0,030	0,029	0,029	0,028	m <sup>3</sup> /s
C <sub>p</sub>	3,62	3,71	3,79	3,88	3,95	kJ/kgK
D <sub>t</sub>	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	
φ	341	341	341	341	341	
K	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	
d <sub>s</sub>	164,3	164,3	164,3	164,3	164,3	mm
k/d	0,00030432	0,000304321	0,0003043	0,00030432	0,00030432	
d <sub>L</sub>	0,1643	0,1643	0,1643	0,1643	0,1643	m
v	1,4	1,4	1,4	1,4	1,3	m/s
U	2,8126E-06	2,41158E-06	2,11E-06	1,884E-06	1,535E-06	m <sup>2</sup> /s
Re	82659	94811	106684	117861	142976	
Itorainti	7,0570	7,1349	7,1998	7,2530	7,3517	
Itorainti	7,0570	7,1349	7,1998	7,2530	7,3517	
Suhde	100	100	100	100	100	% alk!
λ <sub>s</sub>	0,020080006	0,019643938	0,019291341	0,019009322	0,018502027	
l	44	44	44	44	44	m
d <sub>L</sub>	0,1643	0,1643	0,1643	0,1643	0,1643	m
ρ	1048,76	1041,00	1032,94	1024,63	1016,28	kg/m <sup>3</sup>
ν	1,41	1,39	1,37	1,35	1,34	m <sup>2</sup> /s
ΔP <sub>putki</sub>	5646	5303	5011	4764	4493	Pa
ΔP <sub>vesi</sub>	54354	51050,5993	48239,7530	45859,3884	43250,0908	Pa
ΔP <sub>putki</sub>	60000	56353	53251	50623	47743	Pa
R	128	121	114	108	102	Pa/m
H	5,8	5,5	5,3	5,0	4,8	m
ρ	1048,76	1041,00	1032,94	1024,63	1016,28	kg/m <sup>3</sup>
q	9,81	9,81	9,81	9,81	9,81	m/s
ΔP <sub>putki</sub>	60000	56353	53251	50623	47743	Pa