

# **Kaukojäähdytysakun esiselvitys**

Antti Rökköläinen

Opinnäytetyö  
Toukokuu 2017  
Tekniikan ja liikenteen ala  
Energiatekniikan tutkinto-ohjelma

Tekijä(t) Räkköläinen, Antti	Julkaisun laji Opinnäytetyö, AMK	Päivämäärä Toukokuu 2017
	Sivumäärä 80	Julkaisun kieli Suomi
		Verkojulkaisulupa myönnetty: x
Työn nimi <b>Kaukojäähdytysakun esiselvitys</b>		
Tutkinto-ohjelma Energiatekniikan tutkinto-ohjelma		
Työn ohjaaja(t) Marjukka Nuutinen, Jukka Konttinen		
Toimeksiantaja(t) Tampereen Sähkölaitos Oy		
<p>Tiivistelmä</p> <p>Tampereen Sähkölaitoksen lämmön- ja sähköntuotantorakenteen muutoksesta johtuva maakaasun käytön väheneminen on syy, miksi korvaavan öljypolttoaineen varastointivelvoite on pienentymässä. Vanhoille, kallioon louhituille öljysäiliöille halutaan löytää uusia hyödyntämiskeinoja. Tutkimuskohteeksi valittiin kalliosäiliöiden muuttaminen kaukojäähdytysakuiksi. Tavoitteena oli kerätä perustietoa aiheeseen liittyen ja löytää teknistaloudellinen ratkaisu onnistuneelle järjestelmälle.</p> <p>Tietoperusta koottiin kirjallisuudesta. Käytännön kokemuksia öljyvarastojen muutostöistä saatiin haastattelemalla.</p> <p>Öljysäiliöitä voidaan hyödyntää jäähdytysakuina. Öljyjäämien poistaminen säiliöistä vaatii tehokkaiden liuottimien ja mekaanisen työn käyttöä. Lämpötilakerrostuneisuuden hyödyntämiseksi säiliöihin tulee rakentaa virtauksen ohjaimet. Lämmönsiirtoa varten vaaditaan pumppaus- ja lämmönvaihdin järjestelmä.</p> <p>Jäähdytysakun energiasäilytys on noin 3 250 MWh, jos öljyvaraston koko tilavuus saadaan hyödynnettyä. Siirtoteho akkujärjestelmän ja kaukojäähdytysverkon välillä on mahdollista toteuttaa teholuokissa 5 - 50 MW, joista suositeltava tehoalue on 20 - 30 MW. Tutkituilla siirtotehoilla akun purkautumisaika on 3 - 30 vuorokautta.</p> <p>Nykyisen kaukojäähdytysverkon kehityksen perusteella arvioitiin jäähdytysverkon kasvua tulevaisuudessa. 20 MW siirtoteholla pystytään vastaamaan jäähdytysverkon piikkikuorman tarpeeseen 2020-luvulla. Tuloksia voidaan hyödyntää kaukojäähdytysakun investoinnin ja taloudellisen potentiaalin selvittämiseksi.</p>		
Avainsanat ( <a href="#">asiasanat</a> ) Kaukojäähdytysakku, öljyn kalliovarasto, lämpötilakerrostuminen		
Muut tiedot		

Author(s) Rökköläinen, Antti	Type of publication Bachelor's thesis	Date May 2017 Language of publication: Finnish
	Number of pages 80	Permission for web publication: x
Title of publication <b>Preliminary study of a district cooling accumulator</b>		
Degree programme Degree Programme in Energy Technology		
Supervisor(s) Nuutinen, Marjukka; Konttinen, Jukka		
Assigned by Tampereen Sähkölaitos Oy		
Abstract  <p>The change in the power and district heating production structure of Tampere Power Utility has reduced the usage of natural gas. This results in a diminishing obligation to store oil based reserve fuel which motivates to find new business usages for the old rock cavern oil storage tanks. The transformation of rock cavern oil storage to district cooling accumulator was selected as a research topic. The objective was to gather basic information about the subject and to find a successful techno-economical solution for the accumulator system.</p> <p>The theoretical basis was collected from literature. Practical experience about oil storage transformation procedure was obtained by interviews.</p> <p>Oil storage tanks can be used as cooling accumulators. Removing the oil residue requires powerful solvents and mechanical work. Utilizing the thermal stratification in the tanks requires the installing flow diffusers. Heat transfer between the accumulator circuit and the cooling network requires pump and heat exchanger systems.</p> <p>The energy content of the accumulator will be approximately 3 250 MWh if the whole volume of the rock cavern storage can be utilized. The heat transfer capacity between the accumulator and the district cooling network can be implemented within the range of 5 to 50 MW whereof 20 to 30 MW is recommended. The discharge time of the accumulator will be between 3 to 30 days with the heat transfer capacities studied.</p> <p>The growth of the district cooling network in the future was estimated based on the current development. The district cooling accumulator with 20 MW heat transfer capacity is able respond to the peak cooling demands in the 2020s. The Results can be utilized in resolving the investment and economical potential of the district cooling accumulator.</p>		
Keywords/tags ( <a href="#">subjects</a> ) District cooling accumulator, rock cavern oil storage, thermal stratification		
Miscellaneous		

## Sisältö

1	Kaukojäähdytysakun lähtökohdat.....	5
2	Tampereen Sähkölaitos Oy .....	7
	2.1 Konsernirakenne ja talous.....	7
	2.2 Tampereen Sähkölaitoksen voima- ja lämpölaitokset .....	8
3	Kaukojäähdytys Tampereella .....	9
	3.1 Kaukojäähdytysverkon yleiskuvaus.....	9
	3.2 Kaupinonjan kaukojäähdytyslaitos.....	10
	3.3 Jäähdytysverkon kasvuodotukset .....	12
	3.4 Jäähdytyskontit.....	17
4	Kaukojäähdytyksen teoria .....	18
	4.1 Jäähdytysverkon toimintaperiaatteet .....	18
	4.2 Lämmönsiirron perusteet.....	20
	4.3 Pumppauksen perusteet .....	22
	4.4 Lämmönvaihdivien toimintaperiaate .....	25
	4.5 Verkon tasapainottaminen.....	27
	4.6 Vapaaäähdytys .....	28
	4.7 Järvi jäähdytysenergian lähteenä.....	29
	4.8 Yleisimmät lämpöpumpputekniikat .....	30
	4.8.1 Kompressorijäähdytys .....	30
	4.8.2 Absorptioäähdytys.....	31
	4.8.3 Hyötysuhde ja käytännön valintaperusteet .....	32
	4.9 Kaukoäähdytysakun teoria .....	33
5	Kalliovarasto .....	36
	5.1 Öljyn ominaisuudet ja jalostus .....	36
	5.2 Öljysäiliöiden louhinta ja käyttö.....	40
	5.3 Kallioperä.....	42
	5.4 Puhdistaminen.....	44

6	Jäähdytysenergiapotentiaali .....	46
7	Laitteisto ja suunnitelmat.....	48
	7.1 Virtauksenohjaimet .....	49
	7.2 Perussäätö .....	50
	7.3 Siirtolinja.....	51
	7.4 Vaaditut laitteet .....	53
8	Johtopäätökset.....	55
9	Pohdinta .....	59
	Lähteet.....	61
	Liitteet .....	67
	Liite 1. Konsernin talousluvut.....	67
	Liite 2. Nord Pool Spot -sähköpörssin kuukausikeskiarvot .....	68
	Liite 3. Lämpötila- ja sadetilastoja vuodesta 1961. ....	69
	Liite 4. LLT.....	70
	Liite 5. NSL1 .....	71
	Liite 6. NSL2 .....	72
	Liite 7. TAVO .....	73
	Liite 8. Tampereen Sähkölaitoksen tuotantolaitokset .....	74
	Liite 9. Veden tiheys .....	75
	Liite 10. Järviveden imulämpötila.....	76
	Liite 11. Kalliovaraston havainnekuva .....	77
	Liite 12. Kallioperä .....	78
	Liite 13. Kivilajien tiheydet.....	79
	Liite 14. Kallioperän lämpötila syvyyden funktiona paikkakunnittain .....	80

## Kuviot

Kuvio 1. Tampereen Sähkölaitoksen konsernirakenne.....	7
Kuvio 2. Tampereen Sähkölaitoksen käyttämät polttoaineet 1990 ja 2016.....	8
Kuvio 3. Tampereen kaukojäähdytysverkko .....	9
Kuvio 4. Kaukojäähdytysverkon prosessikaavio.....	10
Kuvio 5. Kaupinojan laitos toukokuussa 2016.....	11
Kuvio 6. Tampereen jäähdytysverkon kehitys .....	13
Kuvio 7. Myytävän jäähdytysenergian ennuste .....	13
Kuvio 8. Sopimustehon ennuste .....	14
Kuvio 9. Asiakasmäärän ennuste .....	15
Kuvio 10. Jäähdytysverkon pituuden ennuste .....	15
Kuvio 11. Kompressorikapasiteetin kasvun ennuste .....	16
Kuvio 12. SRW07 -jäähdytyskontin paikallislogiikkanäyttö.....	17
Kuvio 13. Ratapihan jäähdytyskontit .....	18
Kuvio 14. Kaukojäähdytysjärjestelmän periaate.....	19
Kuvio 15. Kiinteistökohtainen kaukojäähdytyslaitteisto.....	20
Kuvio 16. Pumppujen toiminta-alueet .....	22
Kuvio 17. Sulzer-keskipakopumppu .....	23
Kuvio 18. Myötä- ja vastavirtalämmönvaihtimien periaate .....	25
Kuvio 19. Levylämmönvaihtimen virtaukset .....	26
Kuvio 20. Kaukojäähdytysverkon painekuvaaja.....	27
Kuvio 21. Vapaajäähdytys vedestä .....	28
Kuvio 22. Järven vuotuinen lämpökierto .....	29
Kuvio 23. Lämpöpumppuprosessi .....	30
Kuvio 24. Absorptiojäähdytysprosessi .....	31
Kuvio 25. Sorptio- ja kompressoriprosessin tyypilliset käyttöarvot .....	32
Kuvio 26. Kuorman tasapainottaminen .....	33
Kuvio 27. Lämpötilakerrostuminen säiliön eri käyttövaiheissa .....	34
Kuvio 28. Vapaajäähdytys lumella .....	35
Kuvio 29. Luolaston havainnekuva.....	36
Kuvio 30. Maan kerrosten lämpötila ja paine syvyyden suhteen .....	37
Kuvio 31. Raakaöljyn tisleet .....	38

Kuvio 32. Keskimääräiset saannot per raakaöljy barreli .....	39
Kuvio 33. Oulun kalliovarasto.....	40
Kuvio 34. Kalliosäiliön hydrostaattikka.....	41
Kuvio 35. Ilman lämpötilan vaikutus kallion lämpötilaan. ....	43
Kuvio 36. Akkupiirin ja jäähdytysverkon yhdistävä lämmönvaihdin.....	47
Kuvio 37. Lataussykli, virtaus alhaalta ylös .....	49
Kuvio 38. Purkaussykli, virtaus ylhäältä alas .....	50
Kuvio 39. Yleiskaavio .....	50
Kuvio 40 Nestekierto purkamisen ja lataamisen yhteydessä .....	51
Kuvio 41. Putkilinjan hinta-arvio .....	52
Kuvio 42. Jäähdytysverkon kasvuskenaario .....	56
Kuvio 43. Tuotantoprofiilin muutos .....	57
Kuvio 44. Akun energiasisältö verrattuna myytävän energian kehitykseen.....	58
Kuvio 45. Akun tehon osuus suhteessa sopimustehon kehitykseen .....	58

### **Taulukot**

Taulukko 1. Tampereen jäähdytysverkon tunnusluvut vuosittain.....	12
Taulukko 2. Hiilivetyjen osuudet raakaöljyssä .....	37
Taulukko 3. Amfiboliitin lämpötekniset ominaisuudet.....	42
Taulukko 4. Lämpötilaero ja kapasiteetti.....	48
Taulukko 5. Virtauksen nopeudet putkikoon ja jäähdytystehon suhteen .....	52
Taulukko 6. Saatavilla olevien pumppujen arvot .....	53
Taulukko 7. Saatavilla olevien lämmönvaihtimien kapasiteetti tarkastelu .....	55

## 1 Kaukojäähdytysakun lähtökohdat

Suomessa perinteiset energiayhtiöt ovat alkaneet etsiä tiukkenevassa taloustilanteessa uusia liiketoimintamahdollisuuksia sähkön- ja lämmöntuotannon lisäksi. Kaukojäähdytys on 2000-luvulta alkaen ollut energiayhtiöiden yksi uusi liiketoiminta-alue. Kilpaillakseen perinteisien ilmastointilaitteiden kanssa kaukojäähdytyksen tulee olla tuottajalleen edullista ja energiatehokasta. Tästä syystä Suomessa on suosittu luonnosta ilmaiseksi saatavaa jäähdytysenergiaa, kuten meri- ja järvivettä. Järjestelmien rajoituksista johtuen on kuitenkin välttämätöntä käyttää lämpöpumppuja huipputehon saavuttamiseksi. Tämän vuoksi on ajankohtaista miettiä talvella ilmaiseksi saatavan jäähdytysenergian varastointia kesän helteitä varten. Akkuun varastoidulla energialla voitaisiin vähentää kompressoreilla tuotetun jäähdytysenergian tarvetta ja täten vähentää sähkön kulutusta.

Tampereen Sähkölaitoksen Naistenlahden voimalaitoksen läheisyydessä sijaitsee kallioon louhittu luolasto, jossa sijaitsee vanha öljyvarasto. Varasto on jäämässä pois nykyisestä käyttötarkoituksestaan, ja sille on pohdittu uusia käyttömahdollisuuksia. Koska Tampereen Sähkölaitoksen kaukolämpöverkolla ei ole suurta kaukolämpöakkuja, on aiemmin pohdittu kalliovaraston käyttöä kaukolämpöakkuna. Lämpöakkuja ei ole kuitenkaan toteutettu, sillä lämmön säilöminen vanhoihin öljysäiliöihin aiheuttaa oleellisen suuret lämpöhäviöt säiliöiden suuren koon vuoksi. Jotta öljyjäämien höyrystyminen ja räjähdysvaara voitaisiin estää, tulisi vanhat öljysäiliöt puhdistaa erityisen hyvin lämmön säilömistä varten. Jäähdytysenergian säilöminen vanhoihin öljysäiliöihin olisi riskittömämpää ja helpompaa.

Suomessa on olemassa useita vastaavan tyyppisiä kohteita, joita voidaan vertailla Tampereen kalliovarastoon. Oulussa sijaitsee vanha öljyvarasto, jonka tilavuus on 190 000 m<sup>3</sup>. Öljyvarasto on muutettu 1990-luvulla kaukolämpöakuksi. Opinnäytetyön puitteissa järjestettiin vierailu Oulun Energialle, jossa tutustuttiin vanhan kalliovaraston toimintaan kaukolämpöakkuna.

Kotkan Katariinan meripuiston alueella sijaitsee vanha kevyen polttoöljyn kalliovarasto. Varasto on peräisin vanhan öljysataman ajoilta. Öljysataman toiminta päättyi



lopullisesti vuonna 2002. Kalliosäiliön tilavuus on 78 000 m<sup>3</sup>, ja Pöyry Oy on laatinut esiselvityksen vuonna 2014 luolaston muuttamisesta kaukolämpöäkuksi Kotkan Energian käyttöön.

Helsingin paikallinen energiayhtiö Helen Oy on louhinut uusia, puhtaasti kaukojäähdytysakkukäyttöön tarkoitettuja kalliosäiliöitä. Helenin ensimmäinen jäähdytysakku on toteutettu Pasilan alle vuosina 2011 - 2012. Sen tilavuus on 11 500 m<sup>3</sup>. Toinen jäähdytysakku on louhittu ja rakennettu Esplanadin alle vuosina 2013 - 2015. Akun tilavuus on 38 500 m<sup>3</sup>.

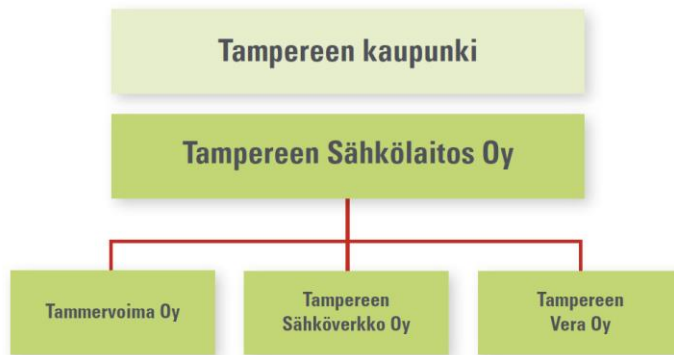
Opinnäytetyön tavoitteena oli selvittää, soveltuvatko Tampereen vanhat öljysäiliöt käytettäväksi kaukojäähdytysakkuina, millaisilla käytännön ratkaisulla järjestelmän saisi toimivaksi sekä mikä on järjestelmän taloudellinen ja energiatekninen potentiaali.

Opinnäytetyön pääasiallisin toteutusmenetelmä oli olemassa olevien tutkimusten, aineistojen ja julkaisuiden arviointi ja vertailu Tampereen kalliovarastoon. Tavoite oli löytää aiheeseen liittyvää perustietoa ja soveltaa sitä esisuunnittelun osana. Toinen toteutusmenetelmä oli lämmönsiirtotehojen ja kapasiteetin arvioiminen veden termodynaamisten ominaisuuksien perusteella. Saatujen tietojen perusteella voitiin antaa esimerkkejä vaadituista toimenpiteistä, järjestelmistä ja toteutustavoista. Opinnäytetyön rajauksesta johtuen tarkempi putkistotekninen suunnittelu jätettiin vähemmälle. Myös kustannustarkastelu on aiheen laajuuden vuoksi vain osittainen.

## 2 Tampereen Sähkölaitos Oy

### 2.1 Konserni

Tampereen Sähkölaitos on vuonna 1888 alkunsa saanut energiayhtiö, joka toimittaa Pirkanmaan alueelle sähköä, kaukolämpöä, kaukojäähdytystä sekä maakaasua (Historia. n.d.). Vuoden 2015 joulukuussa valmistunut Tammervoima Oy:n jätettä polttava hyötyvoimalaitos kuuluu samaan konserniin, sillä Tampereen Sähkölaitoksen omistaa siitä 51 % ja Pirkanmaan Jätehuolto Oy 49 % (Tammervoima Oy perustettiin 11.11.2011). Koko konsernin omistaa Tampereen kaupunki (ks. kuvio 1). (Tampereen Sähkölaitoksen konsernirakennetta tiivistetään. 18.6.2015)

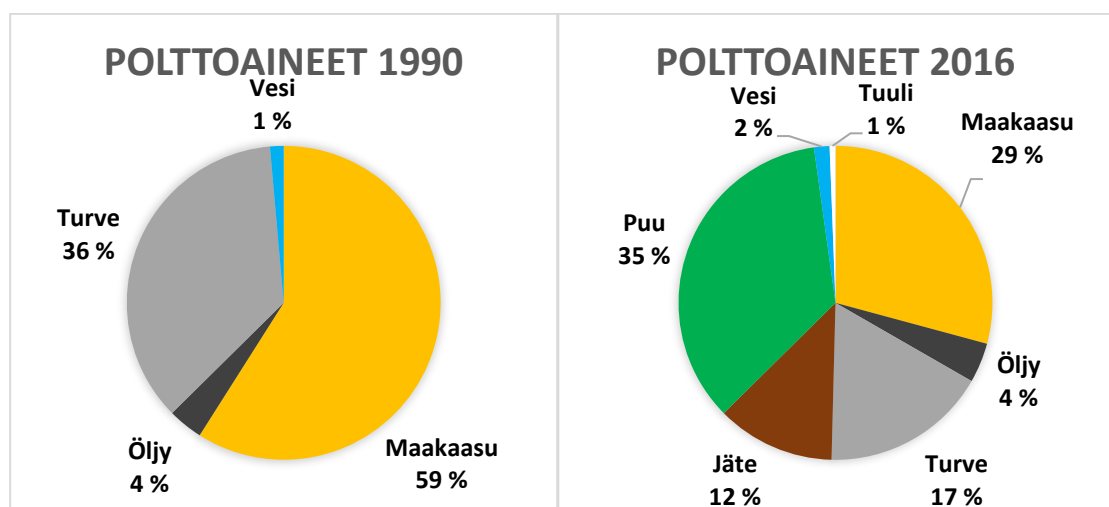


Kuvio 1. Tampereen Sähkölaitoksen konsernirakenne (Vuosisraportti 2015.)

Vuonna 2015 koko konsernin liikevaihto oli noin 271 miljoonaa euroa, josta liiketulos noin 21 miljoonaa euroa. Verrattuna vuosiin 2014 ja 2013 liikevaihto on pienentynyt, mutta tulos, oman pääoman tuotto sekä omavaraisuusaste ovat nousseet selkeästi (ks. liite 1). Pääasialliset syyt haasteelliseen tilanteeseen ovat sähkönhinnan tasainen lasku vuodesta 2010 alkaen (ks. liite 2) sekä keskimääräistä lämpimämmät talvet (ks. liite 3). Onnistuneiden investointien ansiosta konsernin taloudellinen tilanne on parantunut. Investoinnit olivat Tammervoima hyötyvoimala, Hervannan hakelämpökeskus ja Naistenlahti 2:n savukaasupesuri. Nämä kaikki painottavat kaukolämmön tuotantoa, josta on tullut pääasiallinen tulonlähde. (Vuosisraportti 2015.)

## 2.2 Tampereen Sähkölaitoksen voima- ja lämpölaitokset

Tampereen Sähkölaitoksella on useita erikokoisia ja eri polttoaineilla toimivia tuotantolaitoksia. Suurimmat yksiköt ovat Naistenlahdessa ja Lielahdessa. Nämä ovat perinteisesti toimineet peruskuormalaitoksina. Lielahdessa (ks. liite 4) (147 MW<sub>e</sub>, 160 MW<sub>th</sub>, 1987) sekä Naistenlahti 1:ssä (ks. liite 5) (129 MW<sub>e</sub>, 144 MW<sub>th</sub>, 2000) pääpolttoaineena on maakaasu, koska laitokset ovat tyypiltään kaasukombilaitoksia. Naistenlahti 2 (ks. liite 6) (60 MW<sub>e</sub>, 120 MW<sub>th</sub>, 1998) on vanha turvekattila vuodelta 1977, jossa puun polton osuutta on lisätty turpeen rinnalla. Puun osuus on nykyään noin 50 %. Muuttuneen taloustilanteen vuoksi näiden rinnalle on kuitenkin rakennettu pienempiä, uusiutuvilla polttoaineilla toimivia yksiköitä, jotka tuottavat laskennallisesti vähemmän hiilidioksidipäästöjä. Nämä ovat Sarankulman pellettilaitos (37 MW<sub>th</sub>, 2013), Hervannan hakelaitos (57 MW<sub>th</sub>, 2015) sekä Tarastenjärven hyötyvoimalaitos (45 MW<sub>th</sub>, 12 MW<sub>e</sub>, 2015) (ks. liite 7). Näiden lisäksi on olemassa vanhat vara- ja huippukäyttöön tarkoitetut lämpökeskukset, joiden polttoaineina toimivat maakaasu sekä öljy (ks. liite 8). Näillä toimilla on pyritty vähentämään maakaasun käyttöä, ja nykytilanne on täysin erilainen verrattuna aikaisempaan (ks. kuvio 2). Maakaasun käytön vähenemisen vuoksi velvoite korvaavan polttoaineen varastointiin on myös pienempi. Tämän vuoksi on aiheellista pohtia, voitaisiinko kallioluolaston öljysäiliöitä hyödyntää johonkin muuhun kuin öljyn varastointiin.

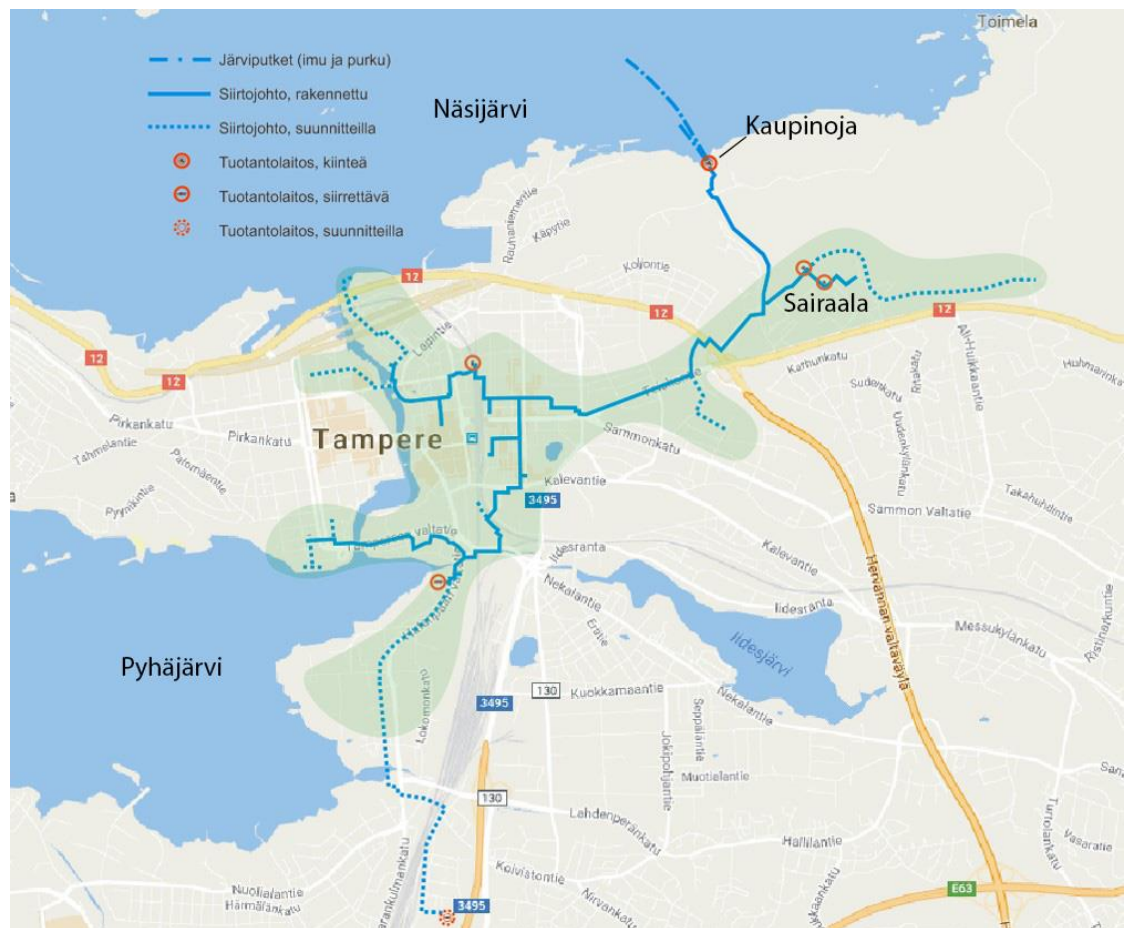


Kuvio 2. Tampereen Sähkölaitoksen käyttämät polttoaineet 1990 ja 2016 (Vuosiraportti 2015.)

### 3 Kaukojäähdytys Tampereella

#### 3.1 Jäähdytysverkon yleiskuvaus

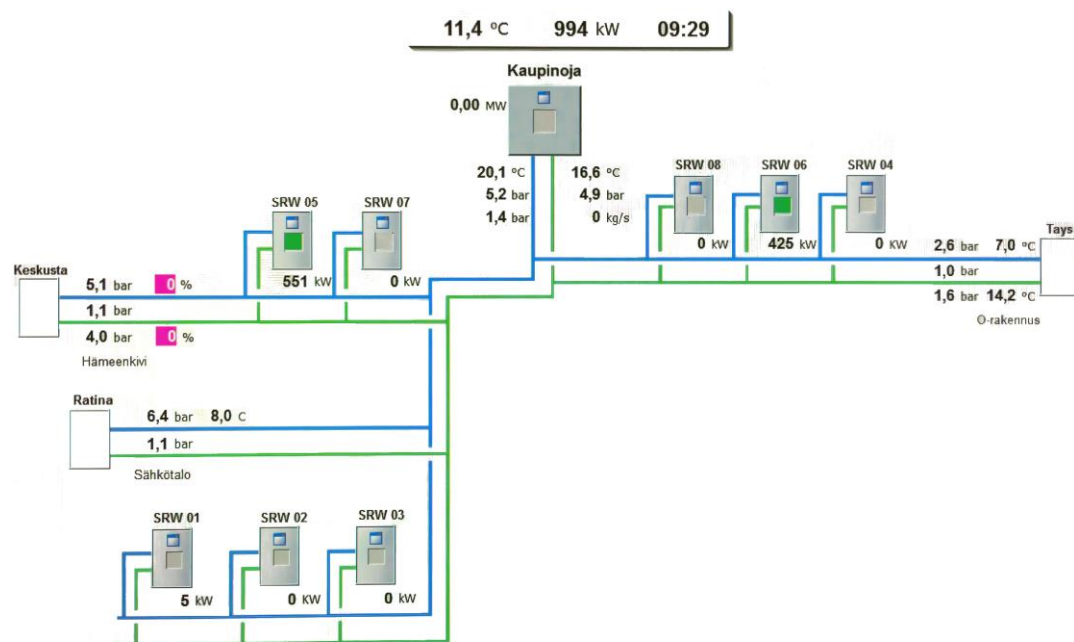
Tampereen Sähkölaitoksen kaukojäähdytysliiketoiminta alkoi vuonna 2012. Tällöin kaupungille sijoitetut kaukojäähdytyskontit toimivat omien kohteidensa jäähdyttäjinä eikä verkko ollut yhtenäinen. Jäähdytyskontit ovat kompressoritoimisia yksiköitä ja käyttävät sähköä jäähdytysenergian tuottamiseen. Syksyllä 2015 kaukojäähdytysverkko yhtenäistettiin (ks. kuvio 3), kun suurimmat siirtolinjat valmistuivat. Keväällä 2016 Kaupinojan kaukojäähdytyslaitoksen ensimmäinen osa aloitti toimintansa jäähdytysverkon osana (Vuosisraportti 2016).



Kuvio 3. Tampereen kaukojäähdytysverkko (muokattu: Kaukojäähdytysverkosto n.d.)

Vuonna 2016 Tampereen Sähkölaitos toimitti kaukojäähdytystä noin 5,8 GWh:a ja tarpeen on arvioitu nousevan tasaisesti seuraavien vuosien ajan. Vuoden 2016 lo-

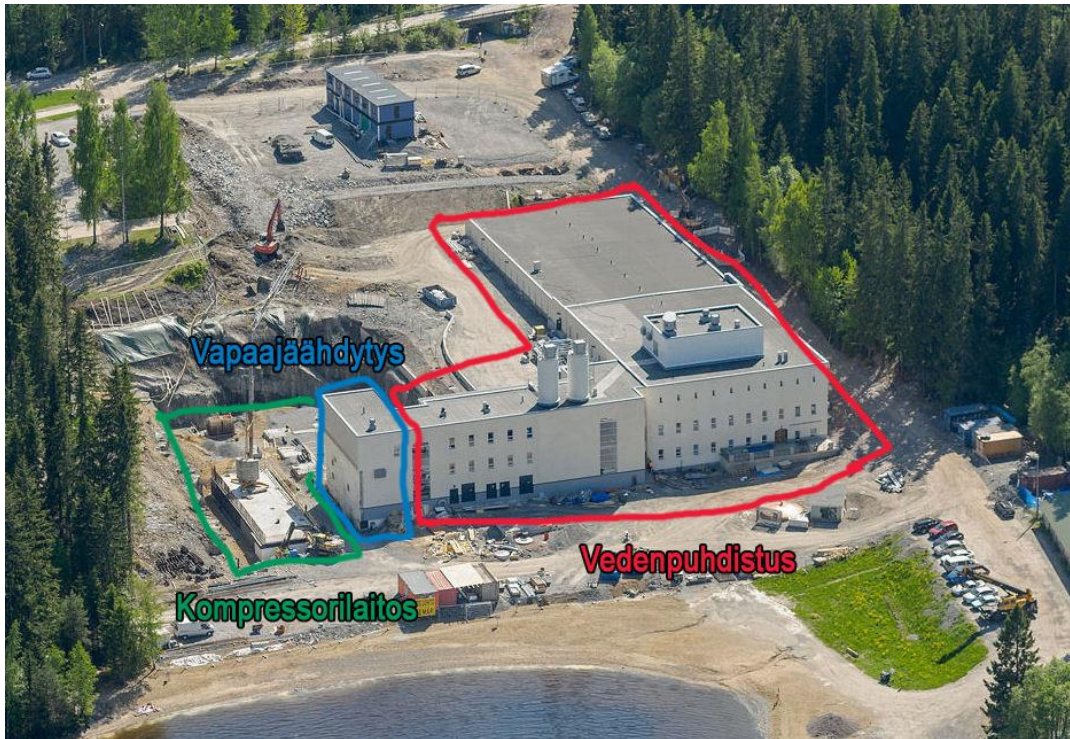
pussa Tampereen Sähkölaitoksen kaukojäähdytysverkolla oli asiakkaita 21. Liittymäsopimusten yhteenlaskettu jäähdytystehontarve on noin 20 MW. Kaupinojan kaukojäähdytyslaitos toimii verkon päätuottajana. Muita tuottajia ovat kaukojäähdytyskon-  
tit, joita löytyy yhteensä kahdeksan kappaletta (ks. kuvio 4). Jäähdytysverkon pituus on noin 10 kilometriä. (KJ-tilasto 2016)



Kuvio 4. Kaukojäähdytysverkon prosessikaavio (Metso DNA)

### 3.2 Kaupinojan kaukojäähdytyslaitos

Jäähdytysverkon päälaitos sijaitsee Näsijärven rannalla, UKK-instituutin vieressä. Jäähdytyslaitos on rakennettu yhteen Tampereen kaupungin vesilaitoksen yksikön kanssa (Tampereen Vesi). Yksiköt sijaitsevat historiallisella paikalla, jossa alkuperäinen vedenpuhdistuslaitos aloitti toimintansa jo vuonna 1928. Nykyisen laitosteknisen remontin aloitti suunnittelulla vuonna 2011, varsinaisen rakennustyön alkaessa loppuvuodesta 2013. Laitosteknisen ensimmäinen vaihe on valmistunut vuoden 2016 aikana (ks. kuvio 5). Vedenpuhdistamon lopullinen maksimikapasiteetti tulee olemaan 72 000 m<sup>3</sup>/d. (Kaupinojan vedenpuhdistuslaitos n.d.)



Kuvio 5. Kaupinojan laitos toukokuussa 2016 (muokattu: Kaupinojan vedenpuhdistuslaitos n.d.)

Jäähdytys- ja vedenpuhdistuslaitoksen yhteinen imuputki on halkaisijaltaan 1400 mm ja on pituudeltaan noin 1 km laitoksesta lähimpään syvänteeseen. Imuputken päässä oleva imutorni on noin 20 metrin syvyydessä betonilaatan (korkeus n. 3 m) päällä. Imutornin siivilärakenteen pinta-ala on noin 20 m<sup>2</sup> ja reikäkoko 5 mm. Laitos palauttaa hulevetensä ja jäähdytysverkon lämmön yhteistä paluuputkea myöten. Paluuputki on halkaisijaltaan 800 mm ja pituudeltaan noin 300 m. Palautusputken pää on noin 8 metrin syvyydessä ja suunnattu kohti Tammerkosken päävirtausta. (Aluehallintoviraston päätös 50/2013/2)

Ensimmäisessä vaiheessa jäähdytyslaitos ottaa Näsijärvestä kylmää vettä ja siirtää jäähdytysenergian kaukojäähdytysverkkoon. Vapaajäähdytyksen nimellinen maksimiteho on 40 MW (KJ-tilasto 2016. 2017), mutta tämä riippuu järven lämpötilasta (ks. luku 4.6). Kun järiveden lämpötila nousee kesällä, tuotetaan korvaava jäähdysteho kompressoreilla. Jäähdytyslaitoksen toinen vaihe valmistui keväällä 2017, jolloin toimintansa aloitti 8 MW:n tehoinen kompressorilaitos. Nykyisten suunnitelmien mu-

kaan Kaupinojan kaukojäähdytyslaitoksen kompressorikapasiteetti rakennetaan vaiheittain 40 MW:n tehoiseksi yksiköksi ja sen toimittaa Oilon Scancool. (Tampereelle keskitetty kaukojäähdytys 2015.)

Kaupinojan kompressorilaitoksen valmistuessa vanhat kaukojäähdytyskontit jäävät vähäisempään käyttöön, jolloin on asiallista tarkastella, voidaanko osalle konteista kehittää uusia käyttömahdollisuuksia. On myös arvioitava, voidaanko kontit myydä toisille tahoille. (Jäähdytyksen kylmyys tulee nyt Näsijärven syvänteestä 2016.)

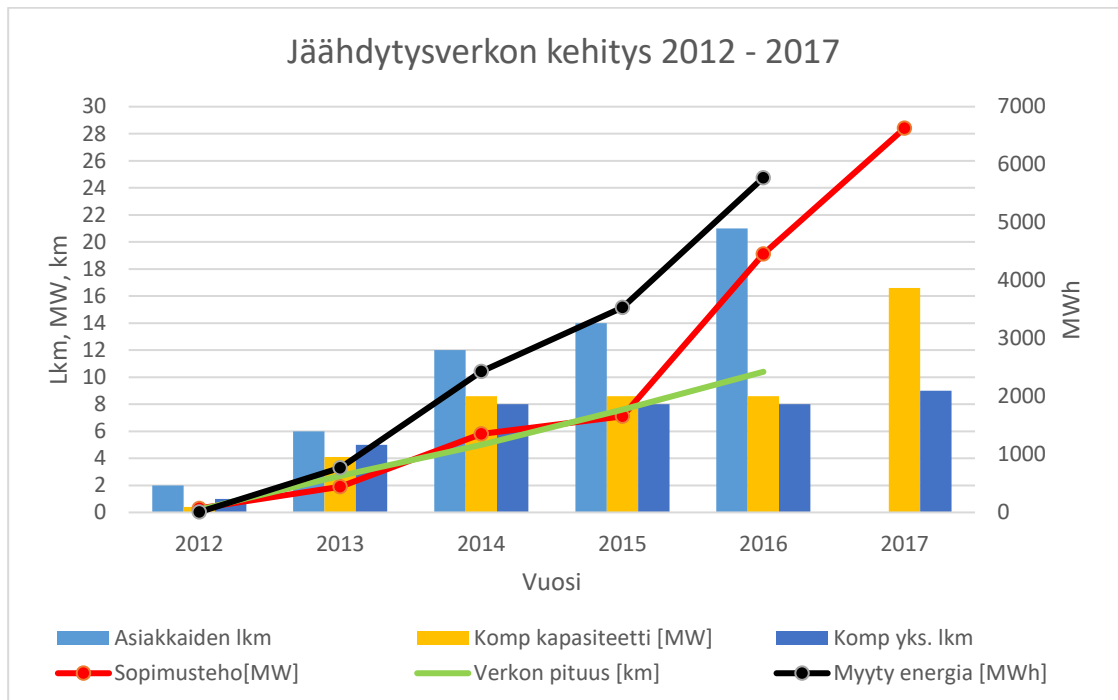
### 3.3 Jäähdytysverkon kasvuodotukset

Tampereen Sähkölaitoksen kaukojäähdytyksen liiketoiminnan teknistä tilastointia on löydettävissä Energiateollisuus Ry:n aineistoista. Taulukkoon 1 on kerätty vuodesta 2012 alkaen löytyviä arvoja jäähdytysverkon kehityksestä. Vuoden 2016 arvot ovat peräisin Sähkölaitoksen sisäisistä tiedoista, ja vuoden 2017 sopimusteho on sisäinen arvio. Vuoden 2017 kompressorikapasiteettiin on laskettu olemassa olevien jäähdytyskonttien lisäksi Kaupinojan uuden kompressorilaitoksen teho. Asiakkaiden lukumäärästä, myydystä energiamäärästä tai verkon pituudesta ei ole saatavilla tarkkaa arviota. On huomioitavaa, että vapaajäähdytystä ei ole tässä taulukossa huomioitu.

Taulukko 1. Tampereen jäähdytysverkon tunnusluvut vuosittain (muokattu: KJ-tilasto 2011-2015; KJ-tilasto 2016; Tampereen Sähkölaitos.)

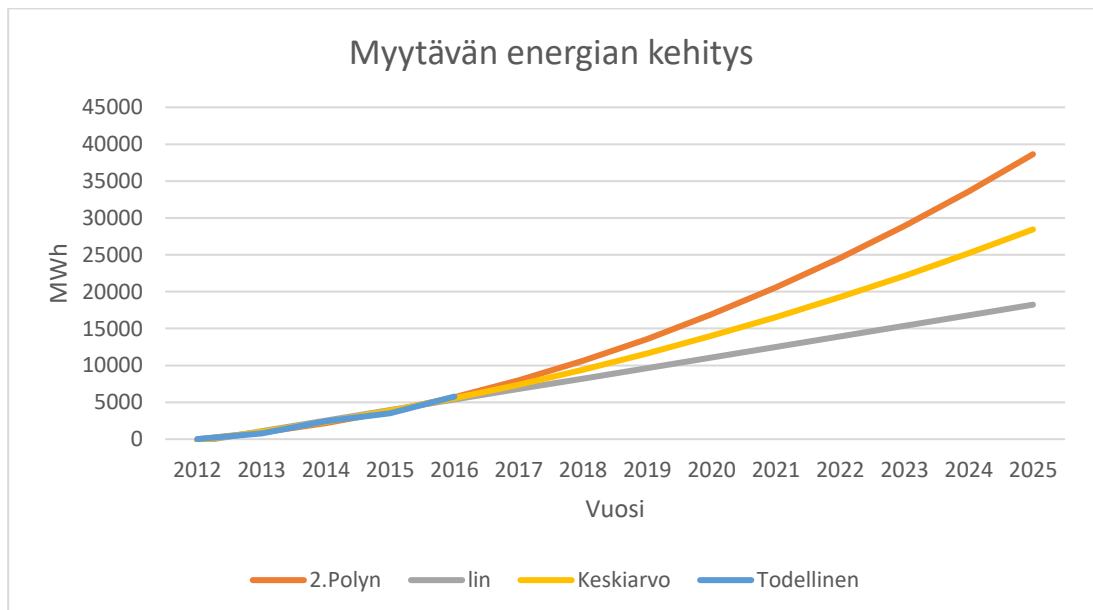
	Asiakkaiden lkm	Sopimusteho[MW]	Myyty energia [MWh]	Komp. kapasiteetti [MW]	Komp. yks. lkm	Verkon pituus [km]
2012	2	0,3	6	0,4	1	0,2
2013	6	1,9	766	4,1	5	2,7
2014	12	5,8	2429	8,6	8	5
2015	14	7,1	3535	8,6	8	7,6
2016	21	19,1	5774	8,6	8	10,4
2017		28,4		16,6	9	

Taulukon 1 arvoista on koostettu kuvaaja (ks. kuvio 6), josta nähdään jäähdytysverkon selkeä kasvu kaikilla osa-alueilla.



Kuvio 6. Tampereen jäähdytysverkon kehitys. (muokattu: KJ-tilasto 2011-2015; KJ-tilasto 2016; Tampereen Sähkölaitos.)

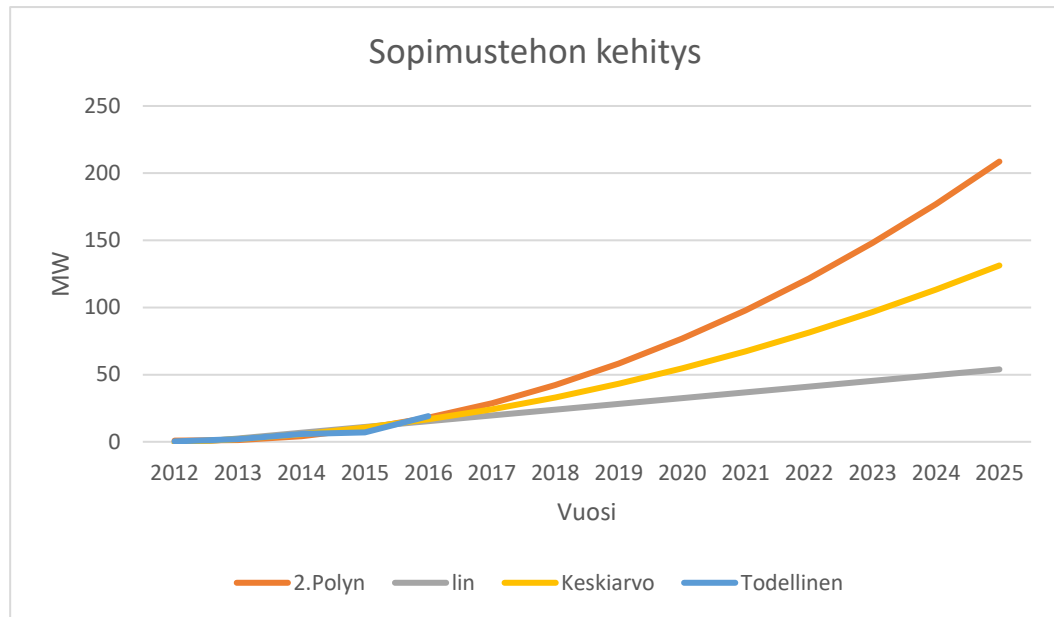
Taulukon 1 arvojen perusteella on tehty ennustekäyriä. Sovittaminen on tehty lineaarisesti sekä 2. asteen polynomifunktiolla. On huomioitavaa, että lineaarinen kasvukäyrä antaa tasaisen kasvun ennusteen ja 2. asteen polynomifunktio kuvaa kiihtyvää kasvua. Vertailun vuoksi edellä mainittujen funktioiden arvoista on laskettu myös keskiarvot. Tämän lisäksi kuvioissa on huomioitu jo toteutuneet arvot.



Kuvio 7. Myytävän jäähdytysenergian ennuste

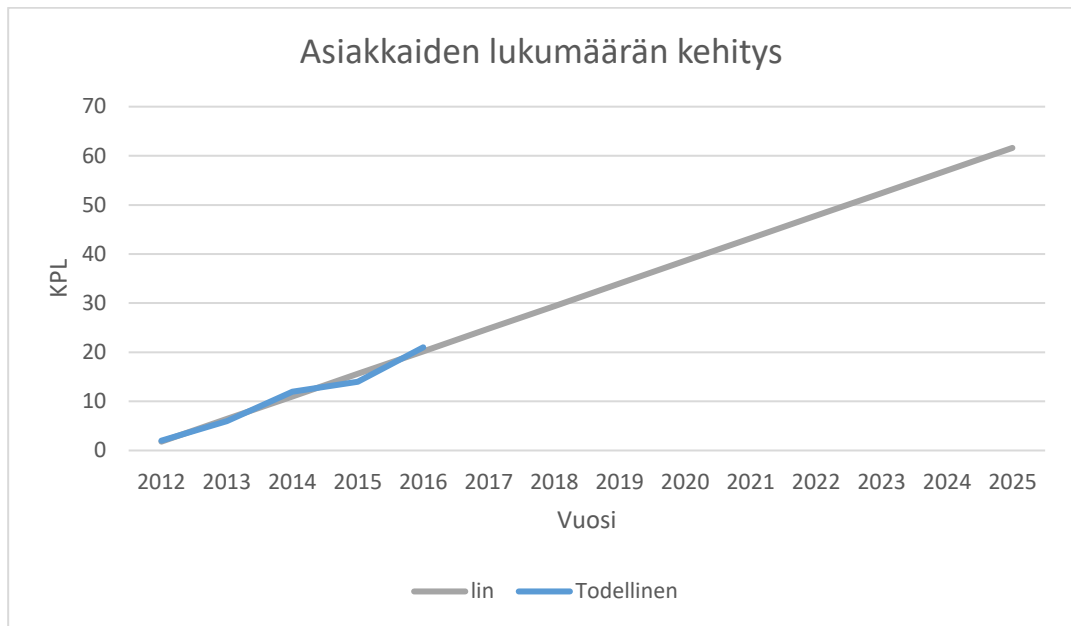


Kuviosta 7 voidaan nähdä, että myyty energiamäärä on ollut lievästi kiihtyvässä kasvussa. Tämän vuoksi polynomisovitus ja lineaarinen sovitus eroavat toisistaan melko paljon. Kuvion 7 kaltaisessa tilanteessa kaukaisemmat ennusteet eivät ole välttämättä kovin tarkkoja. Voidaan kuitenkin arvioida, että toimitettu energiamäärä on vuoteen 2020 mennessä kaksinkertaistunut nykyisestä tilanteesta.



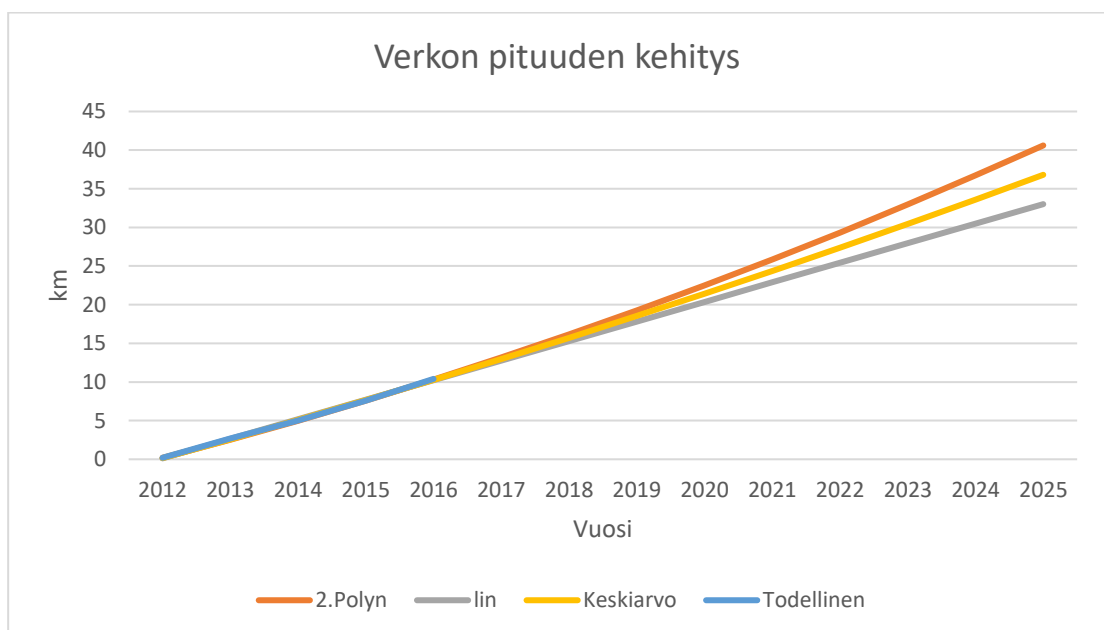
Kuvio 8. Sopimusten yhteen lasketun jäähdytystehon ennuste

Kuviossa 8 on esitetty, miten asiakkaiden yhteenlaskettu sopimusteho tulee kasvamaan. Ennusteen hajonta polynomisovituksen ja lineaarisen sovituksen välillä kasvaa voimakkaasti pidemmällä aikavälillä. Tästä voidaan todeta, että ennusteen tarkkuus myös kärsii. Huomioitavaa on, että sopimustehon kasvaa portaittaisesti uusien asiakkaiden liittyessä verkkoon. Tästä johtuen tarkka ennustaminen on vaikeampaa. Sopimusteho on kuitenkin todennäköisesti kaksinkertaistunut vuoteen 2020 mennessä.



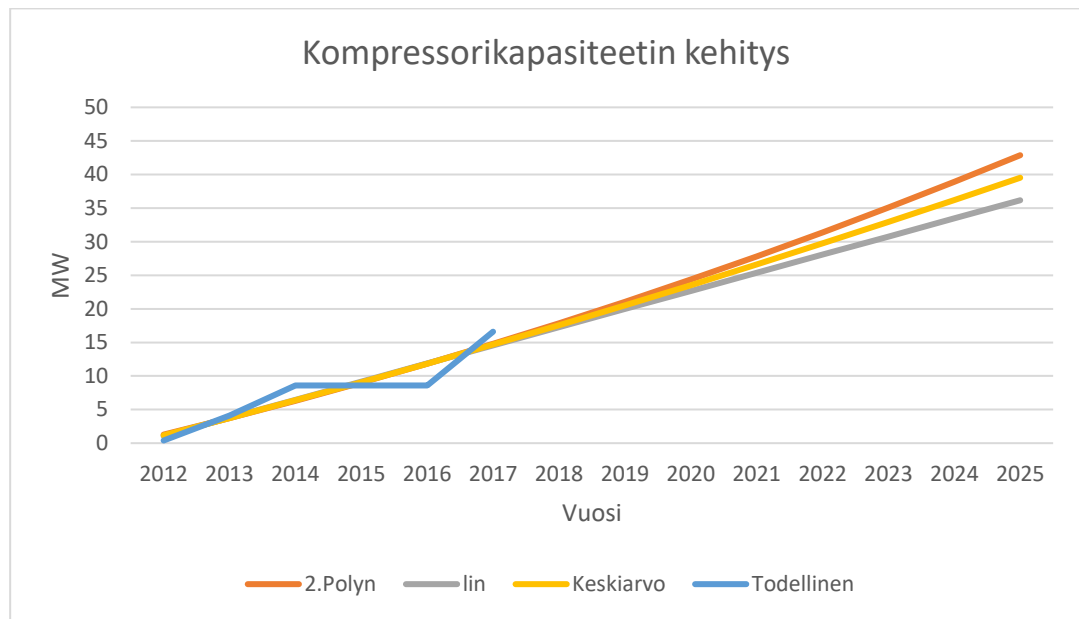
Kuvio 9. Jäähdytysasiakasmäärän ennuste

Kuviossa 9 on esitetty pelkästään lineaarinen kehitys asiakasmäärän kasvulle. Tämä johtuu polynomisovituksen suuresta eroavaisuudesta lineaariseen sovitukseen nähdessä. Kuvion 9 perusteella voidaan todeta asiakkaiden määrän kasvun olevan erittäin lineaarinen. Tästä johtuen voidaan olettaa ennustuksen olevan hieman tarkempi myös pidemmällä aikavälillä. Nykyinen asiakasmäärä on todennäköisesti kaksinkertaistunut vuosien 2020 – 2021 aikana.



Kuvio 10. Jäähdytysverkon pituuden ennuste

Kuvio 10 esittää jäähdytysverkon pituuden kasvun tulevina vuosina. Ennuste on polynomi- ja lineaarisen sovituksen välillä hyvin yhtenevä. Voidaankin todeta pituuden kehityksen olevan melko tarkka ennuste. Ennuste mukailee muiden ennusteiden arviota siitä, että nykyinen pituus (10 km) on kaksinkertaistunut vuoteen 2020 mennessä.



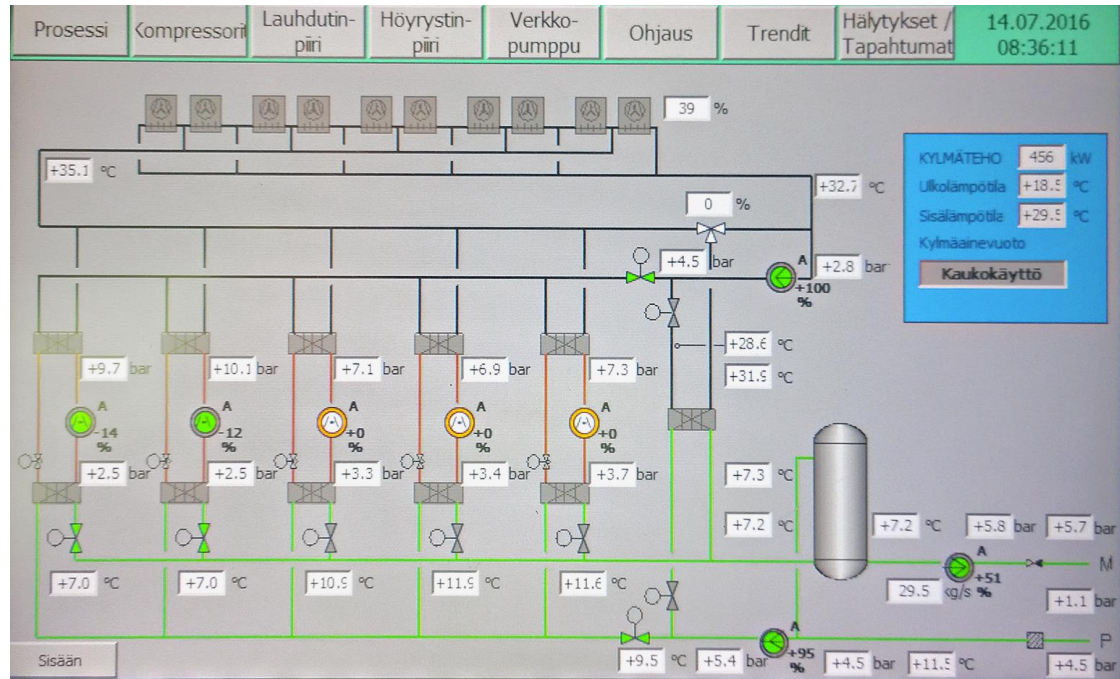
Kuvio 11. Kompressorikapasiteetin kasvun ennuste

Kuvion 11 perusteella nähdään, kuinka kompressorikapasiteetti kasvaa todellisudessa portaittain. Kuvio ei huomioi vapaajäähdytyksestä saatavaa tehoa, ja tämän vuoksi ennusteella voidaan parhaiten arvioida kesällisen piikkikuorman vaatimaa tehoa. Pitkällä aikavälillä tarkasteltuna kompressoriteho kasvaa kuitenkin lineaarisesti, vaikkakin todellisten uusintainvestointien ajoittaminen ennusteeseen on vaikeaa.

Ennustekäyrien perusteella voidaan todeta, että Tampereen Sähkölaitoksen jäähdytysverkko tulee kasvamaan oleellisesti jo lähivuosien aikana. Asiakasmäärän kasvu vaatii lisää kompressoritehoa, jolla pyritään vastaamaan kesien piikkikuormituksiin. Kaupinojalta saatavan vapaajäähdytyksen oletetaan kattavan talvi-, syksy- ja kevät-aikojen peruskuorman vielä pitkään. Jos järjestelmään lisätään jäähdytysakku, voitaisiin sitä käyttää ensin pitkäaikaisena energiavarastona ja myöhemmin lyhytaikaisten piikkien tasaamiseen.

### 3.4 Jäähdytyskontit

Jäähdytyskontit ovat rakenteeltaan modulaarisia ja yhdessä kontissa on useita kompressoreja. Kontin perustana on kylmäainepiiri, joka jäähdyttää kaukojäähdytysverkkoa (vesipiiri). Ylimääräinen lämpö poistetaan ympäröivään ilmaan glykolipiirin kautta (ks. kuvio 12).



Kuvio 12. SRW07 -jäähdytyskontin paikallislogiikkanäyttö

Kaukojäähdytyskontteja on sijoitettu kaupungille useisiin eri paikkoihin. Tyypillisesti ne sijaitsevat tärkeiden jäähdytyskohteiden läheisyydessä. Tämä on seurausta jäähdytysverkon alkuajoilta. Jäähdytyskontteja käytetään nykyään huippu- tai varatehon tuotantoon. Jäähdytyskontit on rakennettu yhteneviksi merikonttien kanssa. Tämä mahdollistaa niiden helpohkon siirtämisen paikasta toiseen. Merikonttiin verrattuna ylimääräistä jäähdytyskonteissa on niiden katolta löytyvät glykoli-ilma-lämmönvaihtimet, jotka tulee irrottaa kuljetuksen ajaksi (ks. kuvio 13).



Kuvio 13. Ratapihan jäähdytyskontit

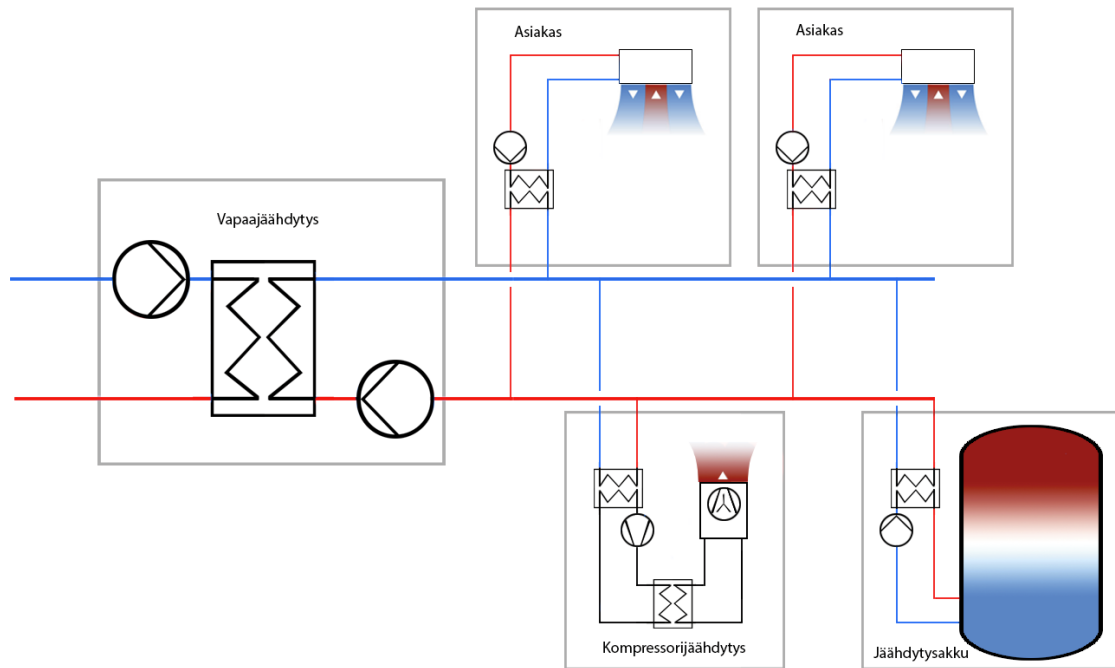
## 4 Kaukojäähdytyksen teoria

### 4.1 Jäähdytysverkon toimintaperiaatteet

Kaukojäähdytysliiketoiminnan tavoitteena on toimittaa asiakkaille jäähdytysenergiaa. Keskitetyn tuotannon laitoksessa jäähdytetty vesi siirtyy putkistossa asiakkaiden lämmönvaihtimiin ja sieltä takaisin. Asiakkaina ovat tyypillisesti suuret kiinteistöt, sairaalat ja suuret tietokonepalvelinsalit. Perinteisesti vastaavissa kohteissa jäähdytys tuotetaan kiinteistökohtaisilla ilmastointilaitteilla (air-conditioning). Termi viittaa ilmanvaihtoon, ja huomionarvoista on, että yleisimmin jäähdytysenergia siirretään loppukäyttäjille ilman välityksellä. (Kaukojäähdytys n.d.)

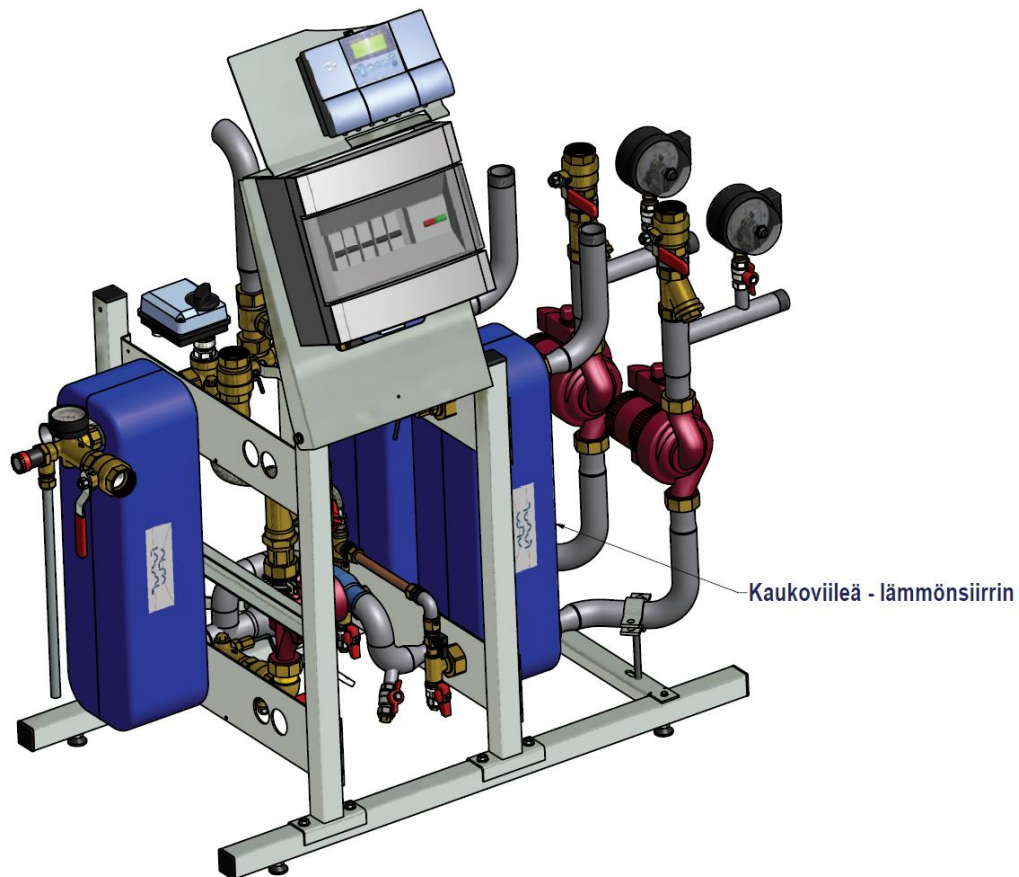
Kaukojäähdytysjärjestelmässä lämmönsiirto tapahtuu putkiston, pumppujen ja lämmönvaihtimien avulla (ks. kuvio 14). Jäähdytysenergia siirtyy tuotantolaitoksista (vapajäähdytys, kompressori, absorptio) runkoverkkoon. Asiakkailta poistettu lämpö palautuu runkoverkkoa pitkin takaisin tuotantolaitoksille. Kuviossa 14 ympyrät kuvaavat pumppuja, jotka siirtävät nestettä nuolen osoittamaan suuntaan. Nelikulmiot

kuvaavat lämmönvaihtimia, joiden läpi lämpö siirtyy toiseen nestekiertoon. Asiakkaan päätelaitteet ovat puhallinkonvektoreita, joista jäähdytysenergia siirretään kiinteistön sisäilmaan. Runkoverkon kapasiteetti on suuri ja asiakkaat yhdistetään siihen pienemmillä siirtolinjoilla. Verkon komponenttien koko skaalautuu halutun jäähdytystehon mukaan, ja on tyypillisesti asiakkailta pienempi kuin tuotantolaitoksilla.



Kuvio 14. Kaukojäähdytysjärjestelmän periaate

Kaukojäähdytyksellä on monia hyötyjä perinteisiin ilmastointilaitteisiin verrattuna. Kaukojäähdytys on energiatehokkaampi järjestelmä kiinteistökohtaisiin ilmastointilaitteisiin verrattuna ja säästää kiinteistön sähkönkulutusta. Koska kompressoreja ja jäähdyttimiä ei tarvita, tilaa vapautuu muuhun käyttöön (ks. kuvio 15). Samalla poistuu melu, värinä sekä visuaalinen haitta. Jäähdytyksen toimitusvarmuus kasvaa, sillä kylmää voidaan tuottaa verkon monilla eri laitoksilla. Huolto- ja kunnossapitotyöt ovat kaukojäähdytysyrityksen vastuulla, mikä lisää luotettavuutta. (Kaukojäähdytys n.d.)



Kuvio 15. Kiinteistökohtainen kaukojäähdytyslaitteisto (Kaukojäähdytyksen dokumentit n.d.)

#### 4.2 Lämmönsiirron perusteet

Lämmön siirtymiseen materiaalien välillä vaaditaan aina lämpötilaero, jonka suuruus vaikuttaa suoraan lämmönsiirtotehoon. Lämpö siirtyy termodynamiikan toisen pääsäännön mukaan aina korkeammasta lämpötasosta matalampaan. Jäähdytyslaitteet kiertävät näennäisesti tämän säännön käyttämällä ylimääräistä energiaa eli työtä lämmönsiirtoon, jolloin lämpö voi virrata myös alemmasta tasosta ylemmälle. (Boles & Çengel 2015, 285 – 286.)

Aineen lämpötila määräytyy siihen sitoutuneen energian mukaan. Tuntuva energia (Sensible Heat) eli lämpöliike on aineen molekyylien liike-energiaa. Latentti energia (Latent Heat) määräytyy aineen faasin mukaan. Tuntuva ja latentti energia muodostavat yhdessä lämpöenergian käsitteen. (Boles ym. 2015, 56 – 57.)

Lämmönsiirron mekanismeja on kolme: johtuminen, kulkeutuminen ja säteily. Johtumisessa energia siirtyy suurienergisemmiltä partikkeleilta toisille kosketuksen kautta. Kulkeutumisessa lämpö siirtyy kiinteän pinnan ja liikkuvan fluidin (neste tai kaasu) välillä. Säteilyssä energia siirtyy sähkömagneettisen säteilyn avulla ilman väliainetta. (Boles ym. 2015, 62.)

Aineen lämmittämiseen vaadittu energia (tuntuva energia)  $Q$  [J] voidaan laskea yhtälöllä 1.

$$Q = mc\Delta T \quad (1)$$

missä  $m$  = massa [kg]

$c$  = ominaislämpökapasiteetti [ $\frac{J}{kg \cdot K}$ ] tai [ $\frac{J}{kg \cdot ^\circ C}$ ]

$\Delta T$  = lämpötilamuutos [ $^\circ C$ ] tai [K]

Yhtälöön 1 voidaan massan tilalle sijoittaa massavirta, jolloin lämmönsiirtoteho  $\dot{Q}$  [ $\frac{J}{s}$ ] voidaan laskea yhtälön 2 avulla.

$$\dot{Q} = \dot{m}c\Delta T \quad (2)$$

missä  $\dot{m}$  = massavirta [ $\frac{kg}{s}$ ]

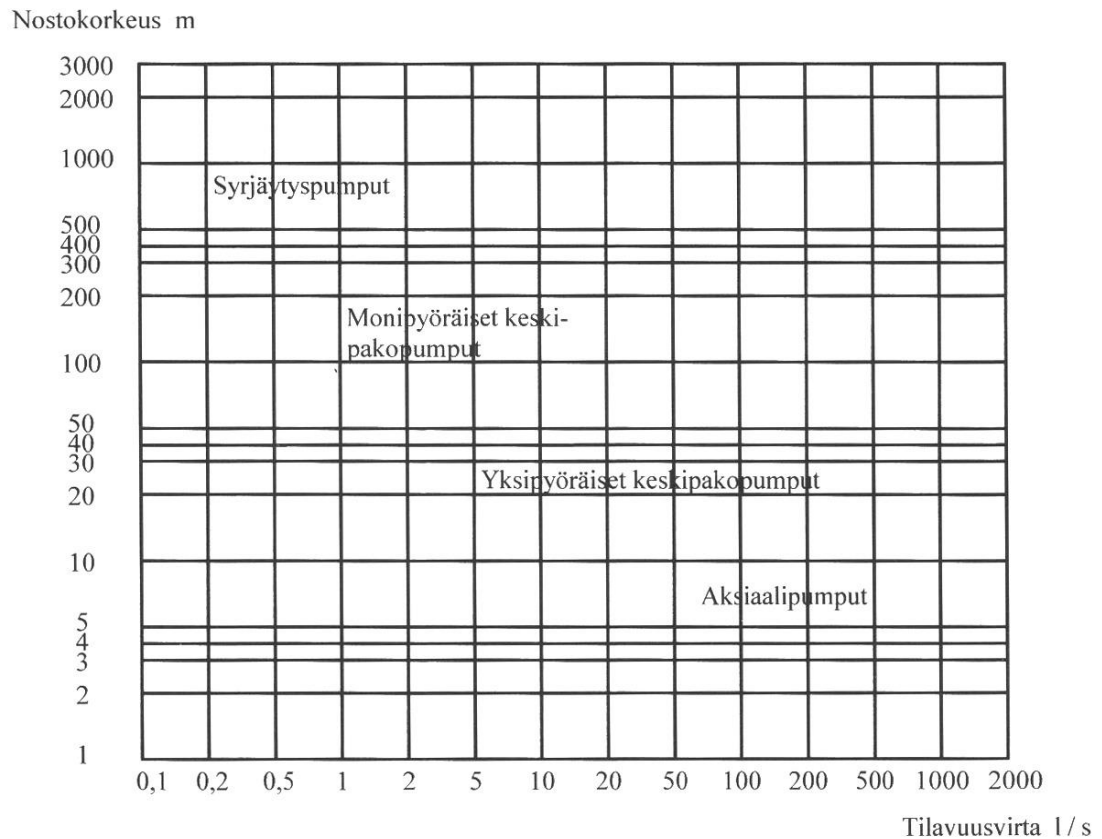
Faasimuutoksiin vaadittava latentti energia on aineelle tyypillinen ominaisuus. Latentti energia tulee kyseeseen vedellä esimerkiksi silloin, kun jää sulaa nesteeksi tai neste höyrystyy kaasuksi. Jään sulamislämpö on  $333 \frac{kJ}{kg}$  ja veden höyrystymislämpö  $2256 \frac{kJ}{kg}$ . Latenttia energiaa voidaan verrata tuntuvaan energiaan ratkaisemalla yhtälö 1 sijoittamalla siihen yksi kilo vettä ( $c = 4,186 \frac{kJ}{kg \cdot ^\circ C}$ ) 10 celsiusasteen lämpötilaerolla:

$$Q = 1 \text{ kg} \cdot 4,186 \frac{kJ}{kg \cdot ^\circ C} \cdot 10 \text{ } ^\circ C = 41,86 \text{ kJ}$$



### 4.3 Pumppauksen perusteet

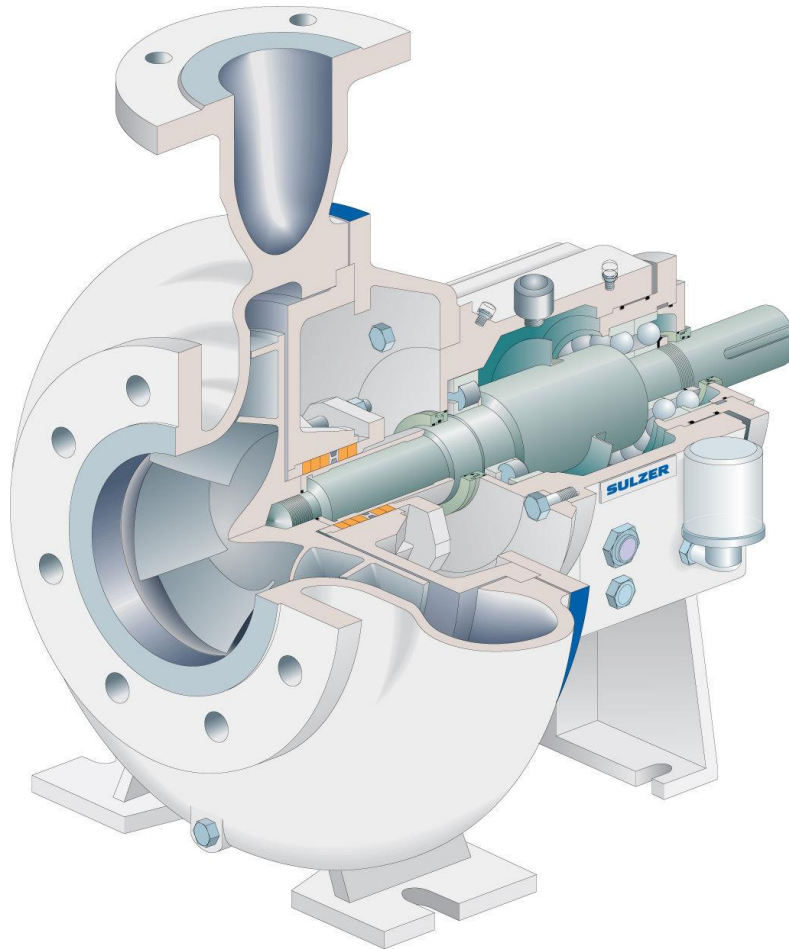
Fluidien, kuten nesteiden, siirtoon vaaditaan pumppausta. Pumppu on kone, joka muuttaa pumpulle syötettyä mekaanista pyörimisenergiaa pumpattavan nesteen massavirraksi ja paineeksi. Pumppausprosessi suunnitellaan halutulle pumppausmäärälle, nopeudelle sekä nostokorkeudelle (ks. kuvio 16). (Boles ym. 2015, 58.)



Kuvio 16. Pumppujen toiminta-alueet (Huhtinen, Korhonen, Pimiä & Urpalainen. 2013, 134.)

Pumput jaetaan toimintaperiaatteensa mukaan kahteen ryhmään: syrjäytyspumppuihin ja dynaamisiin pumppuihin. Syrjäytyspumppujen toiminta perustuu syrjäytyseliimen tekemään työhön, jossa elin siirtää nestettä imupuolelta painepuolelle syrjäytystilavuutensa mukaan. Toisin sanoin pumppu toimii panostoimisesti, kuten mäntäpumppu. Dynaamiset pumput muuttavat mekaanisen pyörimisenergian nesteen liike- ja paine-energiaksi. Dynaamisissa pumpuissa ei ole vastaavaa syrjäytystilavuutta, vaan ne toimivat jatkuvatoimisesti. (Huhtinen ym. 2013, 134 – 136.)

Energiateollisuudessa yleisimmin käytetty pumpputyyppejä on keskipakopumppu (ks. kuvio 17). Se muodostuu työtä tekevästä juoksupyörästä sekä sille suunnitellusta koteloinnista eli pesästä. Neste virtaa pumppuun imulinjasta ja päätyy juoksupyörän keskelle. Juoksupyörä työntää nesteen kohti pesän ulkoreunaa, antaen sille nopeusenergiaa. Nopeus muuttuu paineeksi ja neste ohjautuu ulos painelinjaan. (Huhtinen ym. 2013, 136.)



Kuvio 17. Sulzer-keskipakopumppu (CPT ANSI Process Pumps-pdf. n.d.)

Pumppujen ominaisuudet määräytyvät niiden fyysisten ominaisuuksien perusteella. Pumpun tilavuusvirtaan, nostokorkeuteen ja hyötysuhteeseen vaikuttavat muun muassa pesän ja juoksupyörän koko, juoksupyörän pyörimisnopeus sekä pumpun tiiveys. Juoksupyörätyyppi valitaan pumpattavan aineen viskositeetin ja kiintoainepitoisuuden mukaan. Puhtaalla vedellä voidaan käyttää suljettuja juoksupyöriä,

mutta viskoosisemmat ja likaisemmat nesteet vaativat avoimempaa juoksupyörää.  
(Huhtinen ym. 2013, 140, 148, 151.)

Pumpun vaatima mekaaninen pyörimisteho  $P$  [W] on laskettavissa yhtälöllä 3.

$$P = \frac{\rho g H \dot{V}}{\eta} \quad (3)$$

missä  $\rho$  = pumpattavan aineen tiheys [ $\frac{kg}{m^3}$ ]

$g$  = putoamiskiihtyvyys [ $9,81 \frac{m}{s^2}$ ]

$H$  = nostokorkeus [ $m$ ]

$\dot{V}$  = tilavuusvirta [ $\frac{m^3}{s}$ ]

$\eta$  = pumpun hyötysuhde

Nostokorkeus  $H$  [ $m$ ] voidaan määrittää yksinkertaisella hydrostaattisen paineen yhtälöllä 4.

$$H = \frac{\Delta p}{\rho g} \quad (4)$$

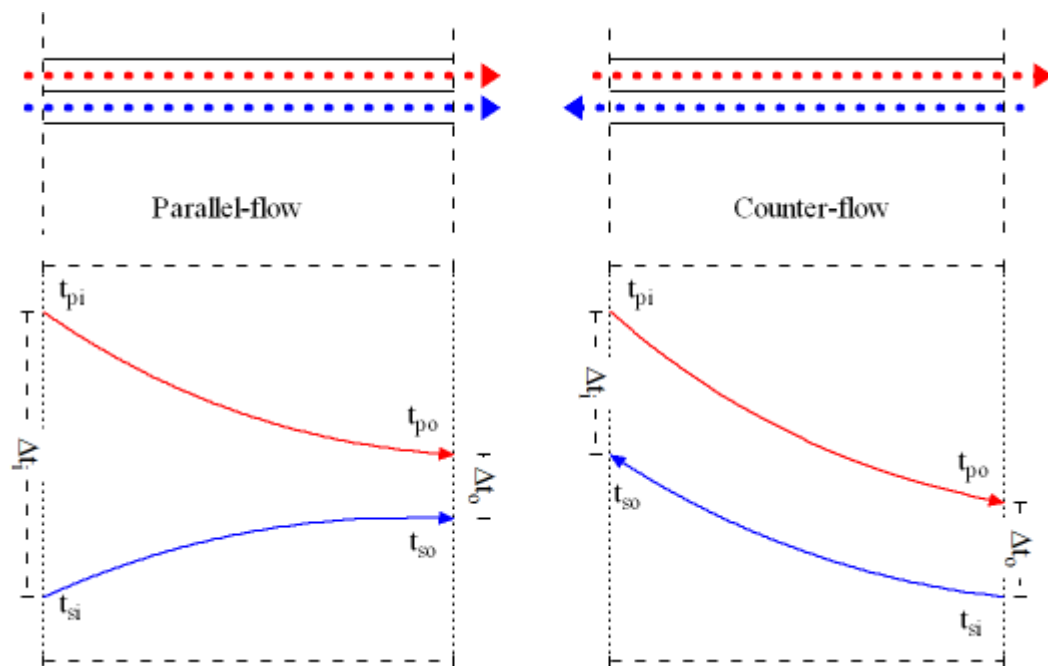
missä  $\Delta p$  = imu- ja painelaipan välinen paine-ero [ $Pa$ ]

Pumpun tulee ylittää nostokorkeuden lisäksi kaikki muut painehäviöt. Näitä muodostuu putkistossa jokaisessa mutkassa, liitoksessa sekä kuristuksissa. Myös putken pituus vaikuttaa suoraan painehäviöön. (Russell 2014)

Pumpun sisäiset häviöt aiheutuvat muun muassa takaisinvirtauksista ja vuodoista. On kuitenkin huomion arvoista, että mitä tiiviimmäksi ja paremmaksi pumppu tehdään, sitä kalliimpi se tyypillisesti on. (Evans 2012)

#### 4.4 Lämmönvaihdinten toimintaperiaate

Lämmönvaihtimien idea on siirtää lämpöä virtaavalta fluidilta toiselle sekoittamatta niitä. Lämmönvaihdintyyppejä on monia, joista kaksi päätyyppiä ovat myötä- ja vastavirtalämmönvaihtimet. Kuviosta 18 voidaan huomata kuinka vastavirtalämmönvaihtimesta ulostuleva lämmitettävä virtaus voi olla suuremmassa lämpötilassa kuin poistuva jäähtynyt virtaus. Vastavirtavaihtimella päästään huomattavasti korkeampaan lämpötilaan kuin myötävirtavaihtimella. (Boles ym. 2015, 238.)



Kuvio 18. Myötä- ja vastavirtalämmönvaihtimien periaate (Arithmetic and Logarithmic Mean Temperature Difference n.d.)

Lämmönsiirtoteho  $\dot{Q}$  [ $\frac{J}{s}$ ] lämmönvaihtimessa lasketaan yhtälöllä 5.

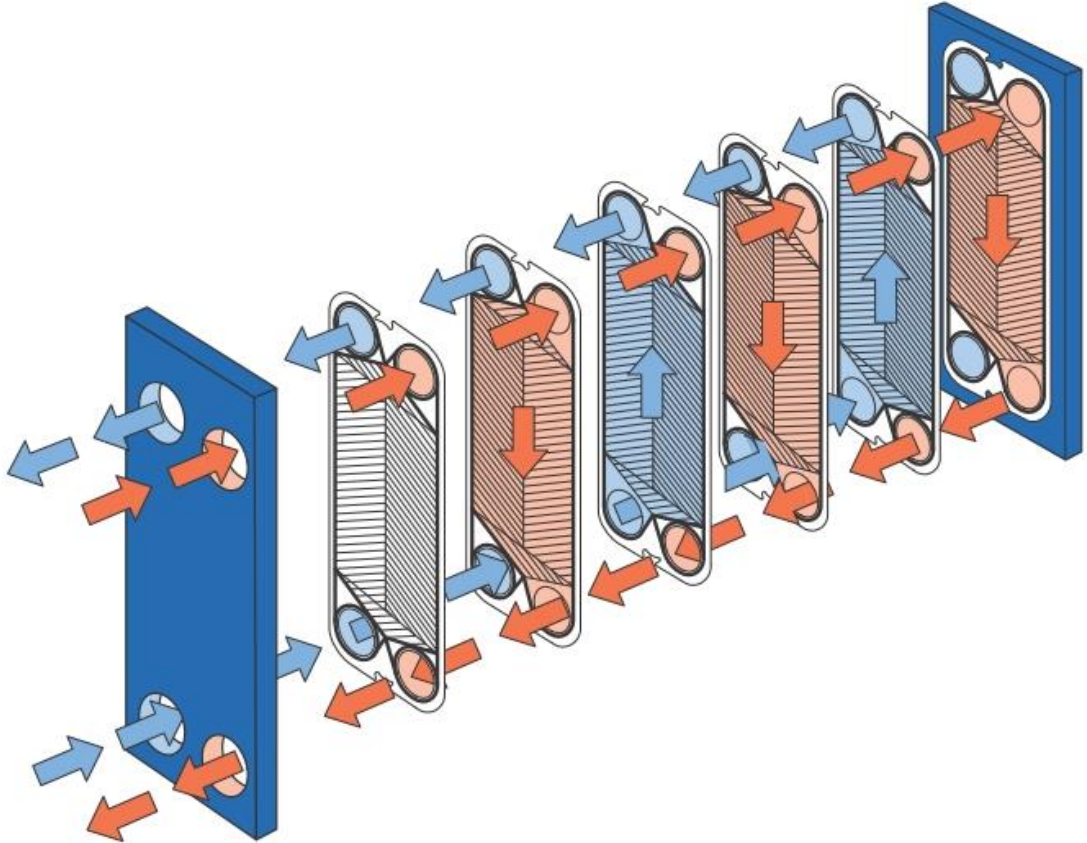
$$\dot{Q} = UA_s \Delta T_{lm} \quad (5)$$

missä  $U$  = kokonaislämmönsiirron kerroin [ $\frac{W}{m^2 K}$ ]

$A_s$  = lämmönsiirron ala [ $m^2$ ]

$\Delta T_{lm}$  = logaritminen keskilämpötilaero [ $K$ ]

Koska kaukojäähdytysverkossa lämpötilaerot ovat melko pienet, lämmönvaihtimen valintaan vaikuttavat merkittävästi lämmönvaihtimen koko ja materiaali yhtälön 5 mukaisesti. Levylämmönvaihtimen rakenne (ks. kuvio 19) mahdollistaa suuren lämmönsiirtoalan tilavuuteensa verrattuna.



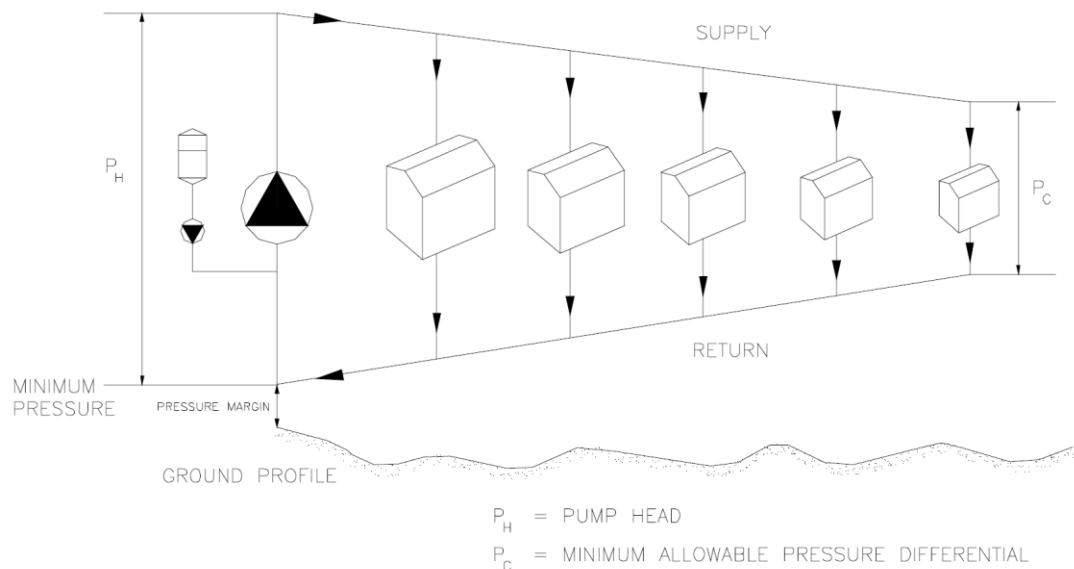
Kuvio 19. Levylämmönvaihtimen virtaukset (How gasketed plate heat exchangers work n.d.)

Levylämmönvaihdin muodostuu tiivistein erotetuista, toisiinsa puristetusta levyistä. Rakenne mahdollistaa hyvät edellytykset huollolle, kunnossapidolle sekä modifikaatioille. Pääasiallisin syy levypakan avaamiselle on lämmönvaihdinpintojen likaantuminen. Likaantuminen aiheuttaa suoraa haittaa lämmönsiirtoteholle. Puhdistamiseen voidaan käyttää useita erityyppisiä pesuaineita, kuten happamia tai emäksisiä aineita. Pesuaineen ja menetelmän valintaan vaikuttaa oleellisesti lämmönsiirrossa käytetyn fluidin ominaisuudet. (Kirjavainen 2013)

## 4.5 Verkon tasapainottaminen

Kaukojäähdytysverkon ohjaus on peruseriaatteiltaan sama, kuin kaukolämmityksessäkin. Laitoksella oleva pumppu tuottaa verkon asiakkaille paineen, joka määräytyy verkon haastavimman (tyypillisesti viimeisen) kulutuskohteen mukaan. Paine-ero tulee olla jokaisella asiakkaalla minimivaatimusten mukainen, jotta luvattu lämmönsiirtoteho voi toteutua. (Mildenstein & Skagestad 2002, 14.)

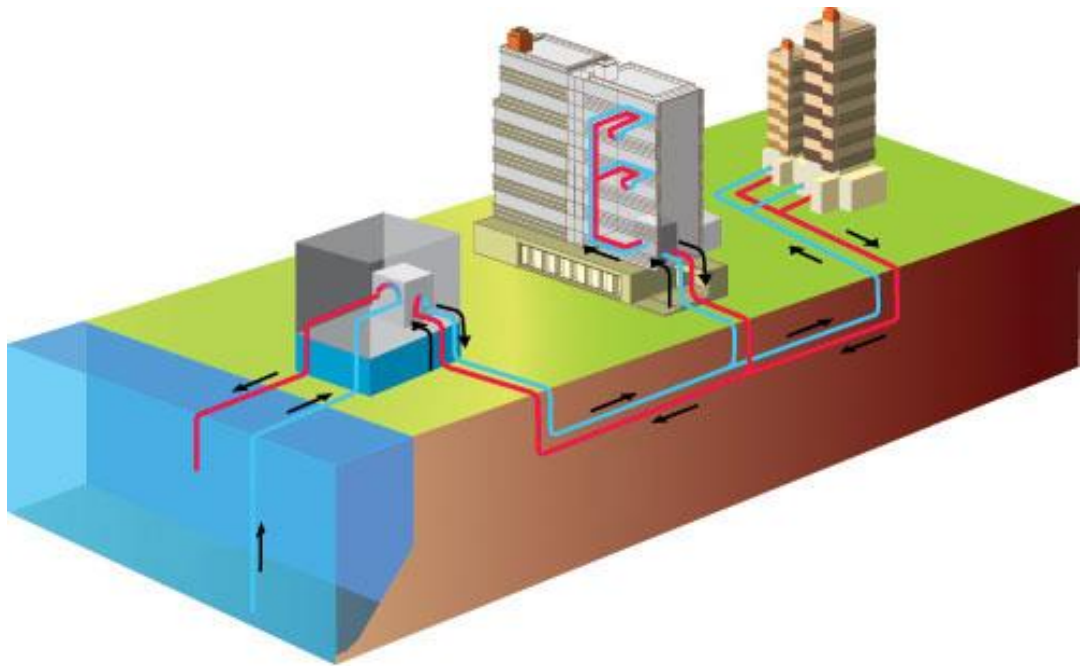
Käytännön haaste muodostuu maan pinnanmuodoista ja korkeuseroista, jotka tulee ottaa pumpaamisessa huomioon. Pumpun imupuolelle eli verkon paluupuolelle tulee jättää tarpeeksi painetta kavitaation ehkäisemiseksi. Kavitaatiossa paine pumpun impuolella laskee niin paljon, että pumpattava neste kaasuuntuu ja aiheuttaa voimakkaita paineiskuja pumpulle. Tämä aiheuttaa ennenaikaista kulumista ja laitteistovaurioita. Verkoston siirtolinjat tulee suunnitella siten, että kuvion 20 kaltaiset painetasot toteutuvat. Jos verkossa on useita painetta tuottavia pisteitä, tulee niiden määrä ja sijainti ottaa ohjauksessa huomioon. Verkon painetasot sekoittuvat liian suuren läpivirtauksen vuoksi, mikä voi aiheutua säätöongelmasta tai vuodosta. (Koskelainen, Saarela & Sipilä. 2006, 338 – 341.)



Kuvio 20. Kaukojäähdytysverkon painekuvaaja (Mildenstein & Skagestad 2002, 14.)

## 4.6 Vapaajäähdytys

Vapaajäähdytyksessä jäähdytysenergiaa saadaan ilmaiseksi luonnon omista lähteistä (ks. kuvio 21). Kylmää saadaan esimerkiksi meristä, joista, järvistä, maaperästä sekä ulkoilmasta. Lämpönielun eli kylmänlähteen massa ja energia ovat niin suuret, että sen lämpötila ei oleellisesti muutu, vaikka sinne vapautetaan jäähdytysasiakkaalta peräisin oleva ylimääräinen lämpö. (Boles ym. 2015, 277.)

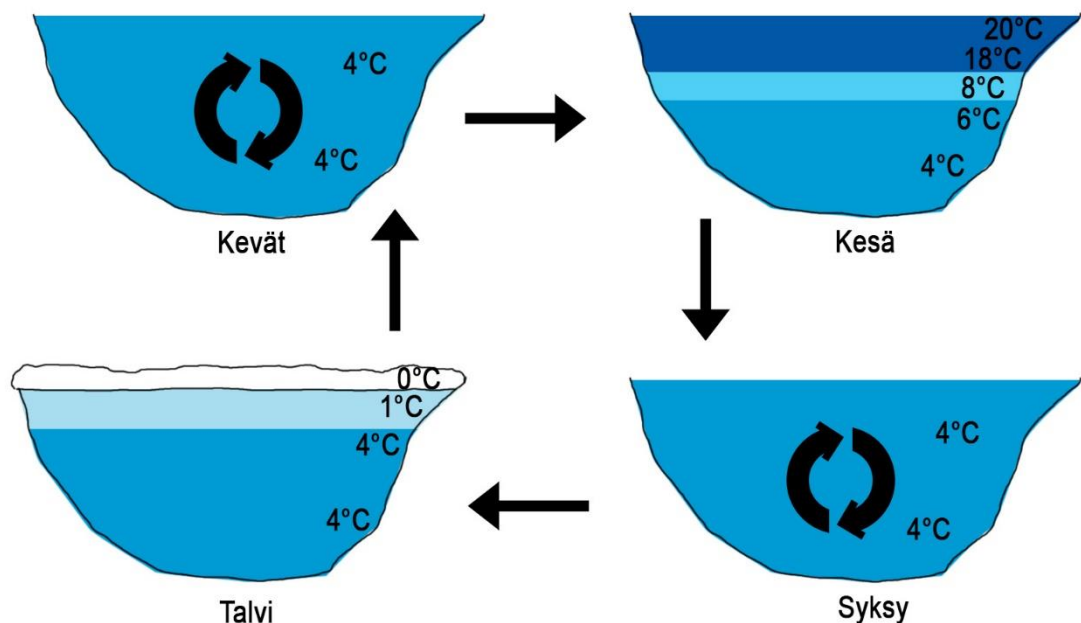


Kuvio 21. Vapaajäähdytys vedestä (muokattu: Seawater Air Conditioning (SWAC) 101)

Jäähdytysenergia siirretään lähteestä lämmönvaihtimien kautta jäähdytyspiiriin. Lämmönvaihtimet ja pumppaus suoritetaan kaukojäähdytysasemalla, josta säädetään ja ohjataan verkkoa. Vapaajäähdytykseen perustuvan järjestelmän mitoitus perustuu kylmänlähteen ominaisuuksiin, kuten lämpötilaan ja lämpötilakiertoon. Tyypillisesti vapaajäähdytyksen rinnalle vaaditaan huippu- ja varakäyttöä varten lämpöpumppumenetelmiä. Vapaajäähdytys on hyvä tapa tuottaa jäähdytyksen peruskuormaa hyvällä hyötysuhteella.

## 4.7 Järvi jäähdytysenergian lähteenä

Järvien lämpötilat vaihtelevat vuosittain monista syistä ja ilmiöistä johtuen. Suomen järvet ovat pääasiassa dimiktisiä. Dimiktisen järven vesi sekoittuu kahdesti vuodessa, keväisin ja syksyisin tapahtuvien täyskiertojen aikaan (ks. kuvio 22). Kesäisin järvien vesi kerrostuu lämpötilan mukaan, pintaveden ollessa lämpimämpää ja pohjaveden viileämpää. Tämä johtuu veden tiheys eroista (ks. liite 9). Talvella järvivesi on kerrostunut toisinpäin, jäätyvän 0 asteisen veden ollessa pinnassa ja tiheimmän 4 asteisen veden ollessa pohjalla. (Korhonen 2002)



Kuvio 22. Järven vuotuinen lämpökierto

Järven syväne pysyy teoriassa 4 asteisena ympäri vuoden. Todellisuudessa kyseinen lämpötila vaatii kuitenkin syvyyttä 30 - 50 metriä (Boehrer & Schultze 2008). Tampereella imuputken ollessa noin 20 metrissä, imuveden lämpötila vaihtelee hieman järven vuotuisen lämpötilakierron mukaisesti. Liitteessä 10 on esitetty Tampereen Sähkölaitoksen automaatiojärjestelmästä peräisin oleva järviveden imulämpötila. Kuvasta selviää, että jäähdytykseen käytettävä järvivesi on talviaikana noin 6 kuukautta vuodesta alle 4 °C, minimilämpötilan ollessa noin 1,8 °C joulutammikuun välisenä aikana. Kesällä järviveden lämpötila nousee noin 16 °C:een. Lämpötilan noususta johtuen vapaajäähdytyksen lisäksi tarvitaan kompressorijäähdytystä.



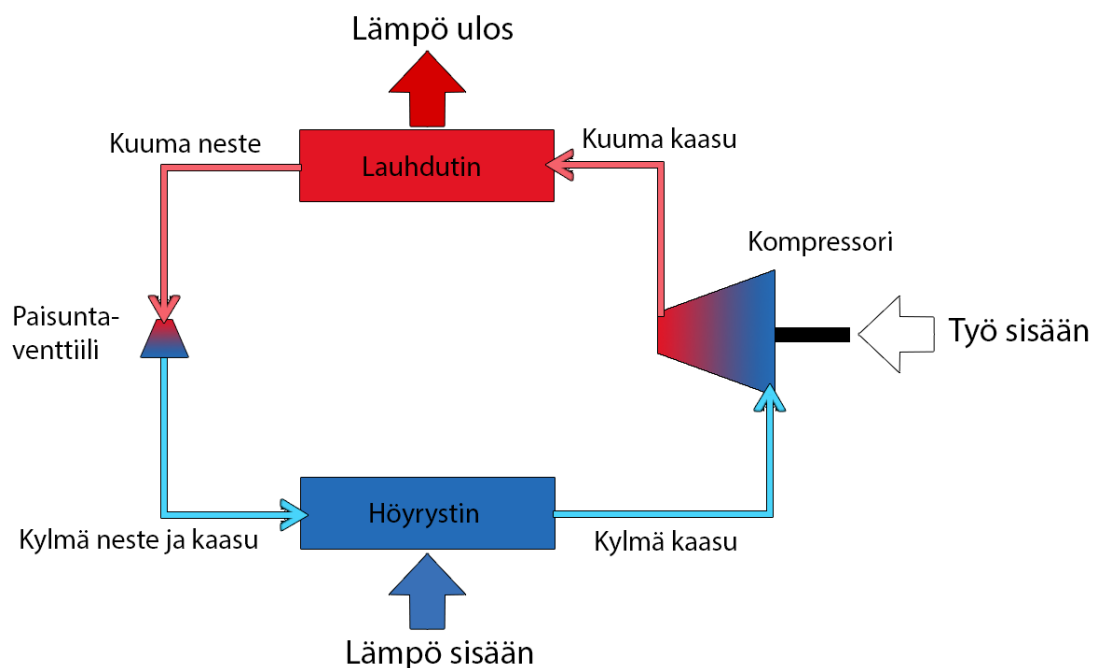
## 4.8 Yleisimmät lämpöpumpputekniikat

Kaukojäähdytyskäytössä yleisimmät lämpöpumpputekniikat ovat kompressorijäähdytys- ja absorptiojäähdytys. Lämpöpumppu on lämpövoimakoneen vastakohta ja sen toiminta perustuu kiertoaineen ominaisuuksiin. Järjestelmän energiatehokkuutta kuvaa COP (coefficient of performance) arvo, joka voidaan määrittää sekä lämmön että kylmän tuotannolle. (Boles ym. 2015, 607 – 608.)

### 4.8.1 Kompressorijäähdytys

Kompressorijäähdytyksessä lämpöä pumpataan kylmäsäiliöstä lämpösäiliöön soveltuvan kiertoaineen ja kompressorin avulla (ks. kuvio 23). Kompressorin toimii tyypillisesti sähkömoottorikäytöllä. Jäähdytettävän tilan lämpö siirtyy kiertoaineeseen höyrystimellä. Kompressorin nostaa kiertoaineen paineen ja lämpötilan niin korkeaksi, että kiertoaineen ylimääräinen lämpö poistuu lauhduttimen kautta ympäröivään tilaan. Jäähdytyskierron kylmin alue on paisuntaventtiilin jälkeinen tuorekylmä linja. (Boles ym. 2015, 610 – 611.)

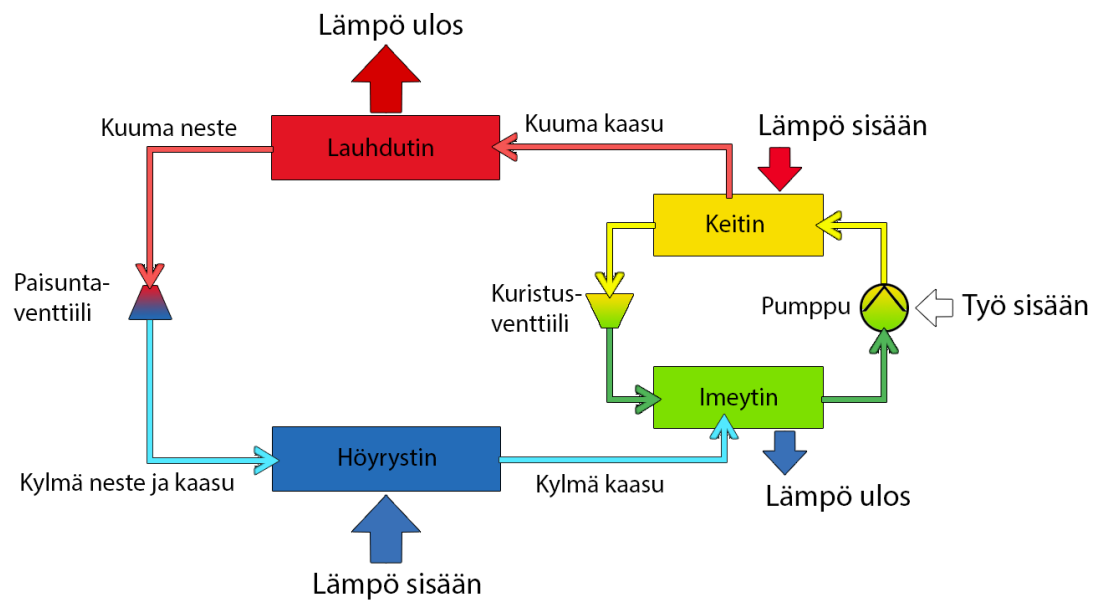
Kaukojäähdytyskäytössä kompressorijärjestelmillä jäähdytetään kaukojäähdytysverkon vettä. Ylimääräinen lämpö voidaan poistaa esimerkiksi järvivedeen tai ilmaan.



Kuvio 23. Lämpöpumppuprosessi

#### 4.8.2 Absorptiojäähdytys

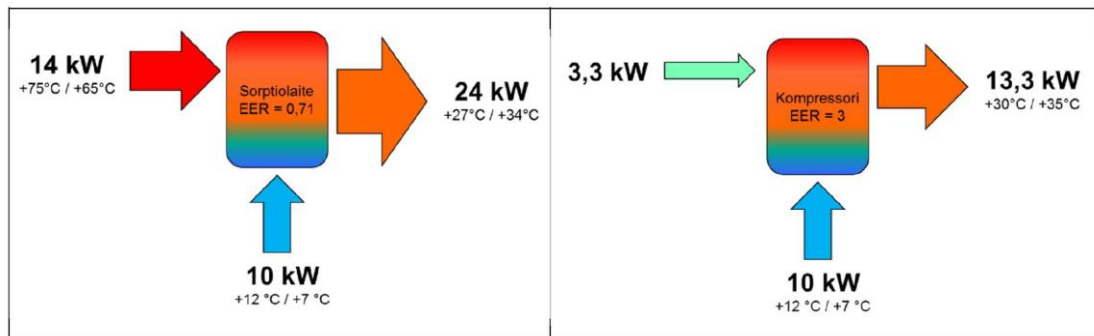
Absorptiojäähdytyksen periaate on sama, kuin kompressorijäähdytyksessä, mutta kompressorin tekemä työ on korvattu pumpulla ja ylimääräisellä lämmöllä, joka tuodaan järjestelmään keittimen kautta (ks. kuvio 24). Tämän lisäksi kiertoaineita on kaksi. Yleisimmin käytetty kiertoainepari on vesi ja ammoniakki. Aineista toinen toimii liuottimena ja toinen kylmäaineena. Liuotin (vesi) kiertää imeytin-keitinpiiriä ja kylmäaine (ammoniakki) kiertää lauhdutin-höyrystinpiiriä. Ammoniakki liukenee veden imeyttimessä, jolloin seos on nestemäisessä muodossa. Tällöin sen paine voidaan nostaa pumpulla kompressorin sijaan. Keittimessä ammoniakki höyrystyy vedestä ja siirtyy lauhduttimelle. Vesi palautuu kuristusventtiilin kautta imeyttimelle. (Boles ym. 2015, 633 – 635.)



Kuvio 24. Absorptiojäähdytysprosessi

#### 4.8.3 Hyötysuhde ja käytännön valintaperusteet

Lämpöpumppujen COP-kerroin kertoo saadun hyötyenergian ja käytetyn energian suhteen (Boles ym. 2015, 608.). Eurooppalaisessa standardissa kylmän tuotannolle käytetty COP-kerroin on nimeltään EER (energy efficiency ratio) (Airaksinen, Laitinen & Rämä 2016, 19.). EER-kerroin vaihtelee käytetyn tekniikan, olosuhteiden ja laskutavan mukaan (ks. kuvio 25).



Kuvio 25. Sorptio- ja kompressoriprosessin tyypilliset käyttöarvot (Airaksinen ym. 2016, 23.)

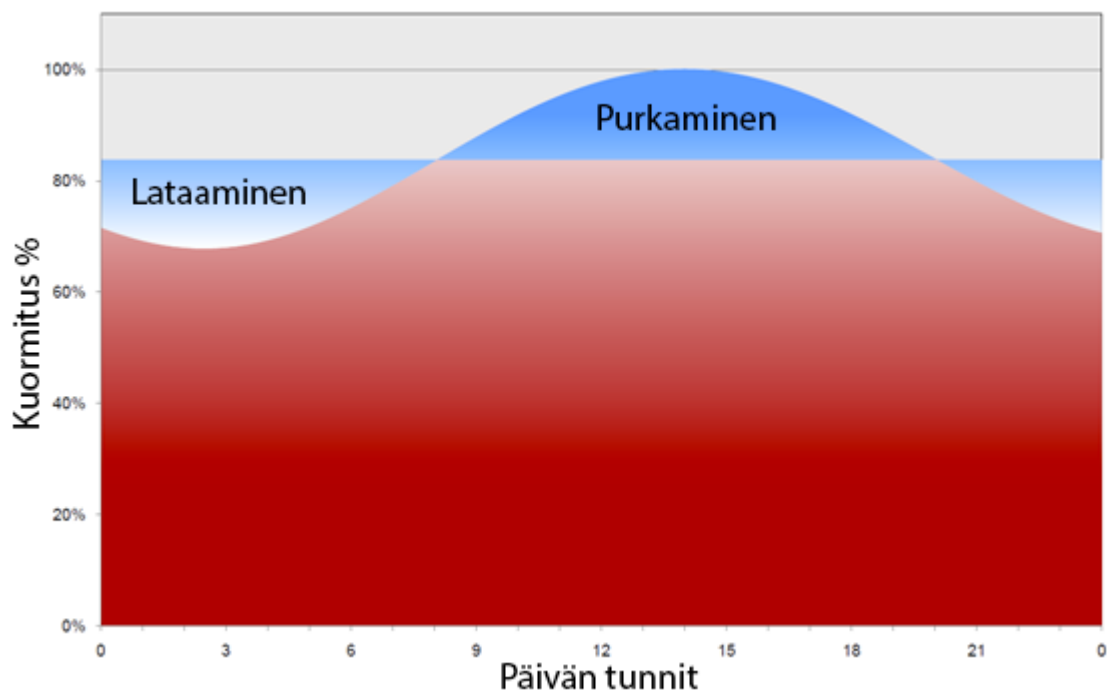
Jos sorptioprosessia verrataan kompressoriprosessiin, voidaan todeta, että molemmat tuottavat ylimääräistä lämpöä jäädytyksen ohella. Jos lämpöä ei pystytä hyödyntämään uudelleen on kyseessä suora häviötehoa.

Absorptioprosessi vaatii toimiakseen paljon halpaa lämpöä tarpeeksi korkeassa lämpötasossa. Lämpimissä maissa lämmönlähde on tyypillisesti aurinkoenergia. Suomessa pääasiallisena lämpönä käytetään kaukolämpöä. Tällöin absorptioprosessin taloudelliseen kannattavuuteen vaikuttaa suoraan kaukolämmön tuotanto, primäärienergia ja päästöoikeudet. Absorptioprosessi vaatii suhteessa vain vähän sähköä, jolloin sähkönkäytön suhde kylmän tuotantoon on pieni. Absorptiolaitteisto vaatii vain vähän mekaanisia liikkuvia osia, minkä ansiosta huoltokustannukset ovat alhaiset. Absorptioprosessi pudottaa lämpöenergian lämpötason oleellisesti alemmaksi (ks. kuvio 25 Sorptiolaite), jolloin ylijäämälämmön hyödyntäminen voi olla haasteellista.

Kompressorijäähdytyksen kylmäkerroin on tyypillisesti sorptioprosessia parempi. Tämä ei kuitenkaan aina tarkoita parempaa taloudellista kannattavuutta. Kompressorikäytöt hyötyvät edullisesta sähköstä ja niiden kiertoaine voidaan valita helpommin vaadittavien lämpötilojen mukaan. Absorptiokoneiden kiertoaineiden valintaan vaikuttaa keittimelle tulevan energian lämpötila. Kompressorikäyttöjen huoltokustannukset ovat korkeammat monimutkaisemmasta rakenteesta johtuen.

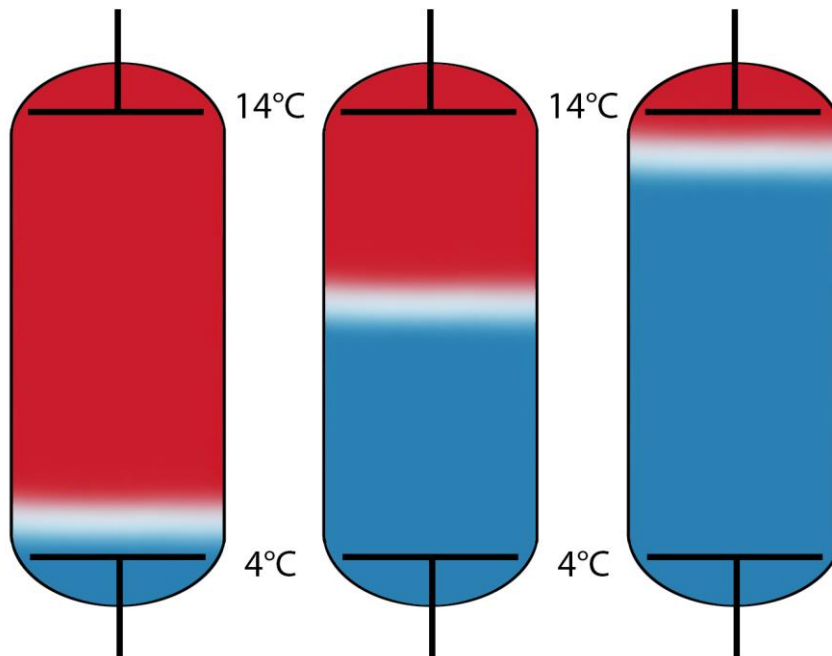
#### 4.9 Kaukojäähdytysakun teoria

Jäähdytyksen yhteyteen liitetty kylmävarasto (thermal energy storage, TES) säilöo energiaa myöhempää käyttöä varten. Lämpimissä maissa kompressorikäyttöisiin järjestelmiin voidaan yhdistää jääakku. Akkua ladataan öisin ja puretaan päivän kulutus- huippujen ajan (ks. kuvio 26). Periaate on kuorman tasapainottaminen, jolloin aktiivisia jäähdytyslaitteita ei tarvitse mitoittaa suurimman piikkikuorman mukaan. Akun avulla voidaan pienentää kompressorien ja/tai absorptiolaitteiden käyttö- ja hankintakustannuksia sekä parantaa energiatehokkuutta. (Sioros 2002, 3 – 4.)



Kuvio 26. Kuorman tasapainottaminen (muokattu: Rugel 2009)

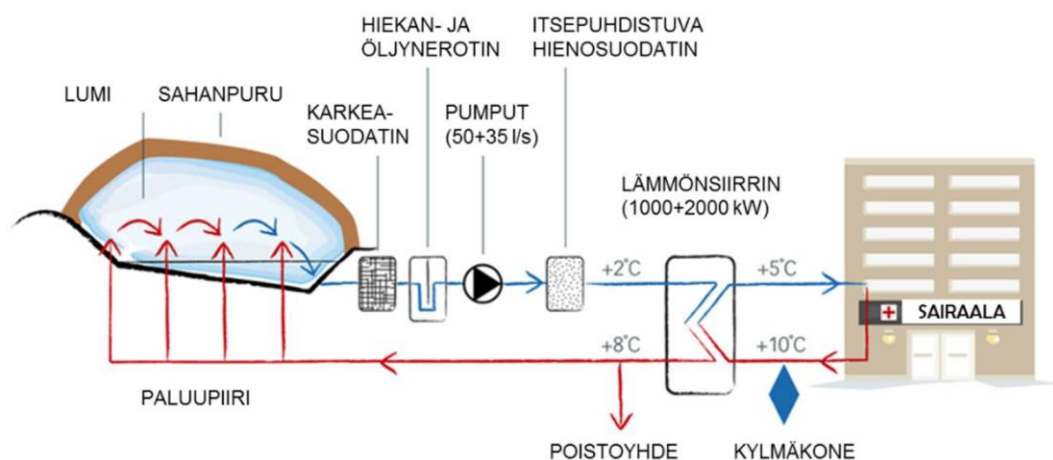
Yleisimmin lämmön tai kylmän varastointiin käytetään vettä. Tällöin veden lämpötilakerrostuminen tulee ottaa huomioon ja hyödyntää parhaalla mahdollisella tavalla (ks. kuvio 27). Kun kylmäakkua ladataan, tulee koko säiliö saada mahdollisimman alhaiseen lämpötilaan, jolloin säiliön koko kapasiteetti saadaan käyttöön. Latausvaiheessa säiliöön syötetään kylmää vettä pohjalta, jotta lämmennyt vesi nousee pintaan tiheyserosta johtuen. Purkausvaiheessa kylmää vettä otetaan käyttöön säiliön alaosasta ja lämmintä palautetaan säiliön yläosaan. Purkauksessa on huolehdittava, ettei sekoittumista tapahdu, jotta kylmätaso ja energiasisältö säilyvät. Kylmän ja lämpimän kerroksen välistä kerrosta nimitetään termokliiniksi ja tunnetaan myös nimillä harppauskerros ja gradienttikerros. Sekoittumisen ehkäisemiseksi säiliöön tulee asentaa virtauksen ohjaimet sekä ylhäälle että alhaalle. Virtaussuuttimien (diffuusorit) tärkein tehtävä on jakaa sisään tuleva massavirta tasaisesti säiliön alalle ja alentaa nopeutta niin paljon, että lämpötilakerrostuneisuus säilyy. Suutinkapasiteetti tulee suunnitella halutulle massavirralla, toisin sanoen halutulle lämmönsiirtoteholle. Mitä ohuemmaksi lämpötilan gradienttikerros saadaan, sitä enemmän akulla on todellista kapasiteettia. (Bahnfleth & Musser 2001, 31 – 32.)



Kuvio 27. Lämpötilakerrostuminen säiliön eri käyttövaiheissa

Jäähdytysakun tekniikka on käytännössä hyvin samankaltainen, kuin kaukolämpöakuilla. Akku voidaan kytkeä verkkoon joko suoralla kytkennällä, tai epäsuorasti lämmönvaihtimien kautta. Pienistä lämpötilaeroista johtuen lämmönsiirto voi käytännössä olla haasteellista akun ja verkon välillä, varsinkin lämmönvaihtimiin perustuvissa järjestelmissä. Kaukolämpöakuissa ongelmana on latauksen loppuvaihe, jossa säiliön lämpötila on hyvin lähellä kaukolämpöverkosta tulevaa lämpötilaa. Purkamisvaiheessa lämpötilaero on myös pieni, jolloin varastoitu lämpö ei siirry kaukolämpöverkkoon. Priimaamisella tarkoitetaan kaukolämpöjärjestelmissä sitä, että akkuun varastoitua vettä lämmitetään uudelleen korkeampaa lämpötasoon, jotta energia siirtyy akusta verkkoon. Kaukojäähdytysjärjestelmissä priimaaminen on vastaavasti varastoidun kylmän jäähdyttämistä alempaan lämpötasoon esimerkiksi kompressorijäähdyttimillä. Ongelman taustalla sekä lämpö- että kylmäakuissa on varastoinnin lämpöhäviöt ja lämpötilakerrostumisen haasteet.

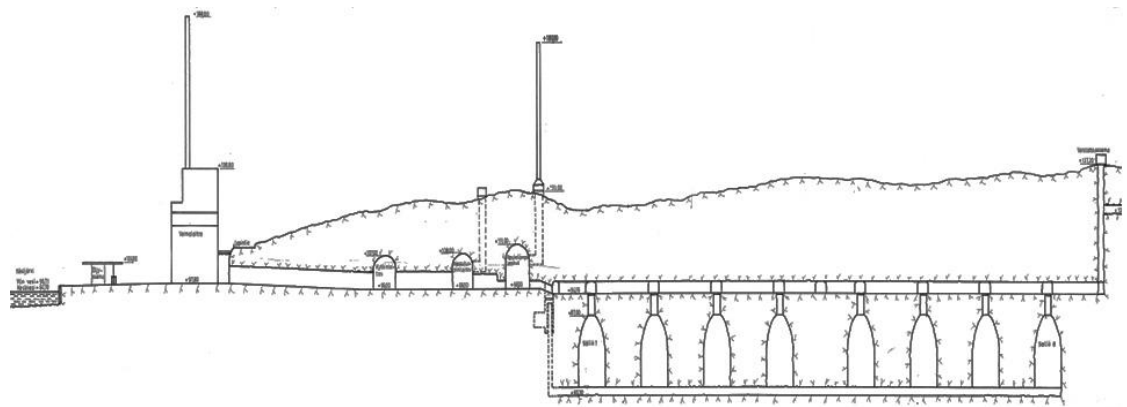
Lumen ja jään avulla toteutettu vapaajäähdytys voi olla yksi kuormantasapainotuksen muoto (ks. kuvio 28). Jää ja lumi toimivat pitkäaikaisena kylmävarastona (seasonal thermal energy storage, STES). Tällaisessa ratkaisussa lunta säilötään talven aikana ja sen sisältämää jäähdytysenergiaa hyödynnetään kesällä. Järjestelmää täydennetään tarvittaessa lämpöpumpuilla käyttöpaikan ja tekniikan mukaan. Kyseisessä ratkaisussa lumen jäähdytysenergia hyödynnetään sulamisen kautta. Hyvänä puolena on lumen matala lämpötila verrattuna järvivedeen.



Kuvio 28. Vapaajäähdytys lumella (Airaksinen ym. 2016, 41.)

## 5 Kalliovarasto

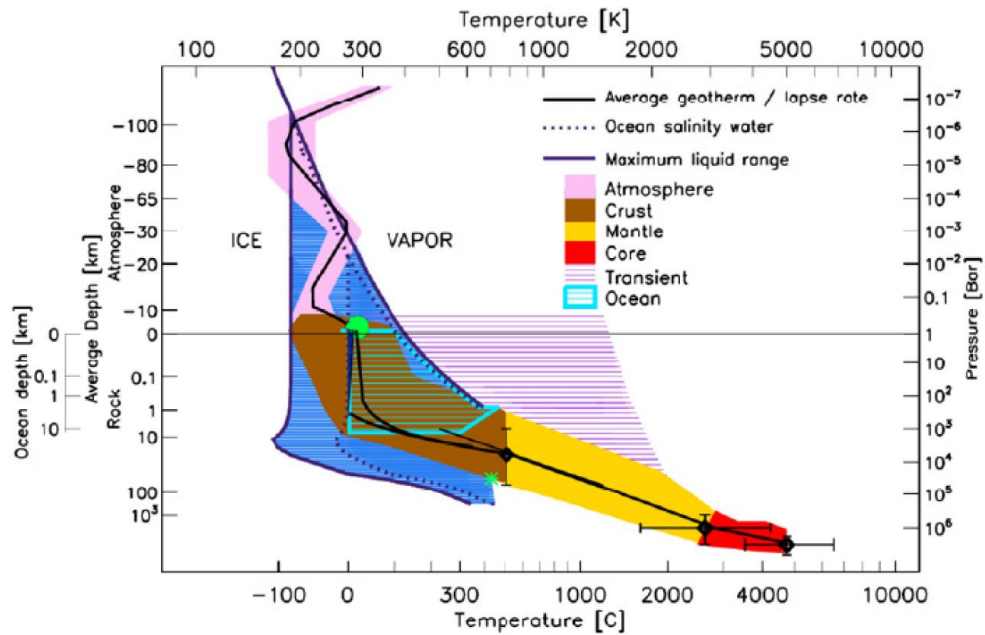
Tampereen Sähkölaitoksen Naistenlahden voimalaitoksen läheisyydessä sijaitsee kallioluolasto, joka on havainnollistettu kuviossa 29. Luolastossa sijaitsee öljyä polttava lämpökeskus. Tämän lisäksi kallioon on louhittu suuret öljyn varastosäiliöt (rock cavern oil storage) (ks. liite 11). Jotta öljysäiliöt voidaan muuttaa jäähdytysakuiksi, tulee säiliöt puhdistaa öljystä sekä arvioida pitääkö kalliorakennetta vahvistaa esimerkiksi betoni-injektoinnilla tai pulttauksilla. Öljyn laatu vaikuttaa puhdistusmenetelmien valintaan. Kallion lämpötekniset ominaisuudet on myös arvioitava häviöiden minimoimiseksi.



Kuvio 29. Luolaston havainnekuva (Tampereen Sähkölaitos)

### 5.1 Öljyn ominaisuudet ja jalostus

Raakaöljy on hiilivetyseos, joka on peräisin satoja miljoonia vuosia vanhojen merikasvien ja -eläinten biomassasta. Tuhansien vuosien saatossa biomassa on painunut ja sedimentoitunut merten pohjiin, hajonnut kemiallisesti sekä siirtynyt geologisten toimintojen vaikutuksista, muodostaen öljyesiintymiä. Öljyn muodostumiseen on vaikuttanut oleellisesti maankuoressa esiintyvä korkea paine (1 - 100 000 bar) ja lämpötila (0 - 500 °C) syvyydestä riippuen (ks. kuvio 30). (Speight 2014, 14.)



Kuvio 30. Maan kerrosten lämpötila ja paine syvyyden suhteen (Jones & Lineweaver 2010)

Raakaöljyn hiilivetykoostumus vaihtelee esiintymästä riippuen. Öljyn pääkomponentit ovat alkaanit, sykloalkaanit, aromaattiset hiilivedyt sekä asfalteenit. Keskimääräiset massaosuudet on esitetty taulukossa 2. Kemialliselta koostumukseltaan öljy on noin 85 prosenttisesti hiiltä ja noin 14 prosenttisesti vetyä, viimeisen prosentin ollessa typpeä, happea, rikkiä ja metalleja (Maaöljy n.d). Raakaöljyn laadusta riippuen tiheys vaihtelee  $850 - 950 \text{ kg/m}^3$  välillä. (Speight 2014, 13.)

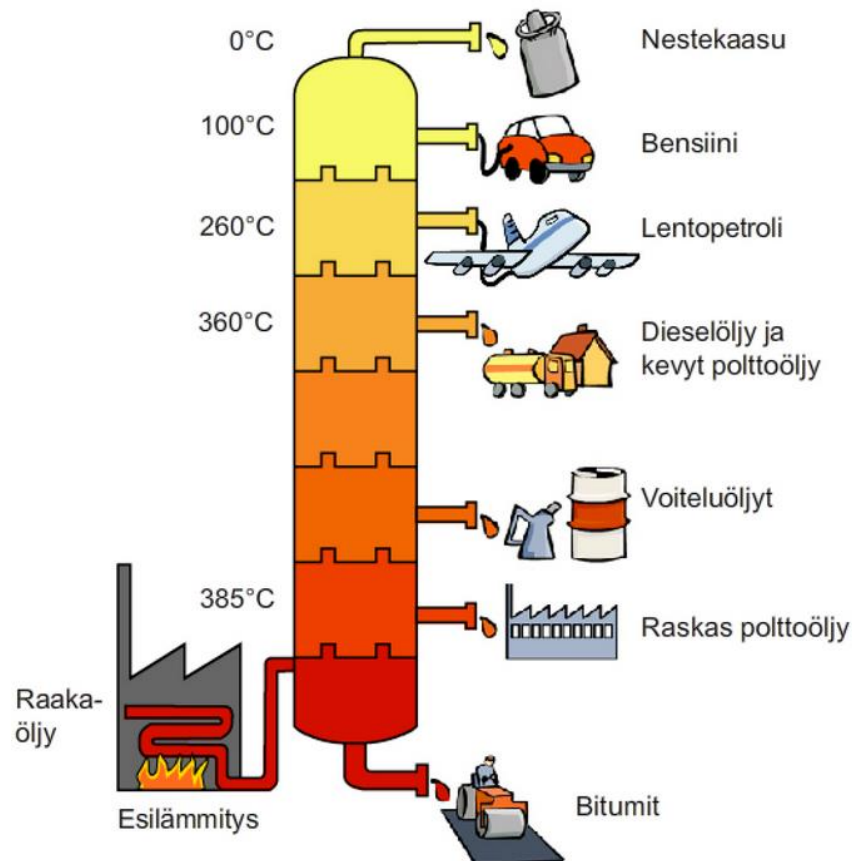
Taulukko 2. Hiilivetyjen osuudet raakaöljyssä (Petroleum n.d.)

Massaosuudet	Keskiarvo	Haarukka
Alkaanit	30 %	15-60%
Sykloalkaanit	49 %	30-60%
Aromaattiset	15 %	3-30%
Asfalteeni	6 %	jäännös

Hiilivetyjen massa määräytyy hiiliketjun pituuden ja ketjun kemiallisten sidosten laadun mukaan. Tislaaminen on prosessi, jossa voidaan erottaa toisiinsa liuenneita aineita lämmön avulla. Ilmiö perustuu aineiden massaan ja höyrystymispisteeseen. Mitä kevyempi hiilivety on kyseessä, sitä matalammassa lämpötilassa se tyypillisesti



höyrystyy ja tästä muodostuu öljynjalostuksen päätuotteet massa- ja viskositeettijärjestykseensä. Prosessi vaatii kuitenkin useita tislaukertoja, että tisetasot erottuvat toisistaan tarpeeksi hyvin (ks. kuvio 31). Tämänkään jälkeen tislauketo ei ole välttämättä täydellistä ja tietty tisle saattaa sisältää myös kevyempiä ja raskaampia jäämiä.

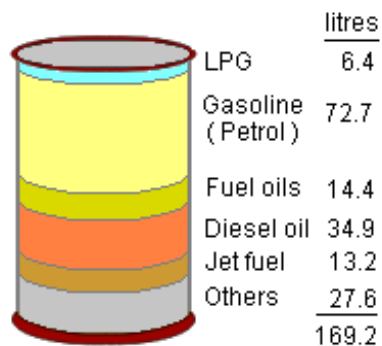


Kuvio 31. Raakaöljyn tisleet (Kaksonen, Posti & Tepponen 2012)

Kevyet tisleet sisältävät pienempiä molekyylejä. Näille tyypillisiä ominaisuuksia ovat alhainen kiehumispiste, alhainen viskositeetti ja helppo syttyvyys. Kaikista kevyimmät tisleet ovat kaasuja. Raskaat tisleet (suuret molekyylit) kiehuvat korkeassa pisteessä, ovat todella viskoosisia ja syttyvät huonosti. Kaikista raskaimmat öljyn komponentit ovat kiinteitä aineita. Keskitisleet ovat nesteitä, kuten bensiiniä, dieseliä sekä voiteluöljyä. (Fractional distillation n.d)

Tislauksen lisäksi öljynjalostuksessa käytetään muita keinoja haluttujen jalosteiden valmistamiseen. Perinteisessä tislusprosessissa syntyy kaikkia tisleitä, mutta jos raskaista tisleistä halutaan tehdä kevyempiä, tarvitaan krakkausta (cracking). Krakkauksessa pitkiä hiilimolekyylejä katkotaan lyhemmiksi ja pääasiallinen tarkoitus on saada prosessista enemmän bensiiniä. Syy oli bensiinin ja muiden kevyempien tisleiden kysynnän kasvu ensimmäisen maailman sodan jälkeen. Krakkausta voidaan suorittaa sekä lämmöllä että kemiallisilla katalyyteillä. Viskositeettihajotus (viscosity breaking) on menetelmä, jolla voidaan nostaa diesel ja polttoöljy tisleiden saantia laskemalla raskaampien tisleiden viskositeettia. Koksauk (coking) on hidas jatkuva lämpöprosessi, joka yhdistää tislauksen ja krakkauskeinoja tarkoituksenaan maksimoida arvokkaat keskitisleet. (Speight 2014, 396 – 404.)

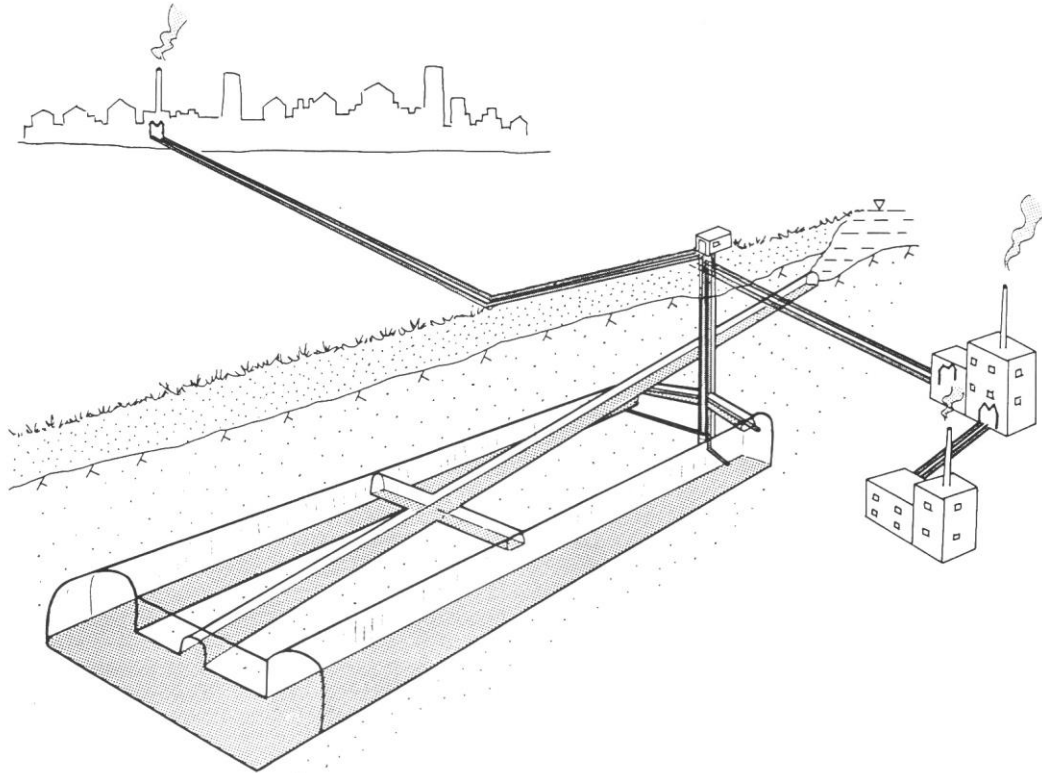
Varsinkin bensiinin laadun nostamiseksi on kehitetty myös oktaanilukua nostavia keinoja, kuten reformointi, polymerisointi sekä alkalointi. Polttoaineiden rikki- ja happipitoisuutta on myös laskettu useilla eri menetelmillä ja on oleellinen osa nykyistä öljynjalostusta. (Speight 2014, 10.) Keskimääräiset jalostusprosessin tuoteosuudet on esitetty kuviossa 32.



Kuvio 32. Keskimääräiset saannot per raakaöljy barreli (muokattu: Beychok n.d.)

## 5.2 Öljysäiliöiden louhinta ja käyttö

Kalliovaraston louhinta aloitetaan huoltotunnelin louhinnalla. Tunnelin kautta suoritetaan kaikki muu louhintatyö. Itse säiliöiden louhinta suoritetaan ylhäältä alaspäin. Tämän vuoksi huoltotunnelista on reittejä säiliöön usealle eri korkeudelle (ks. kuvio 33). (Geostock 2016)



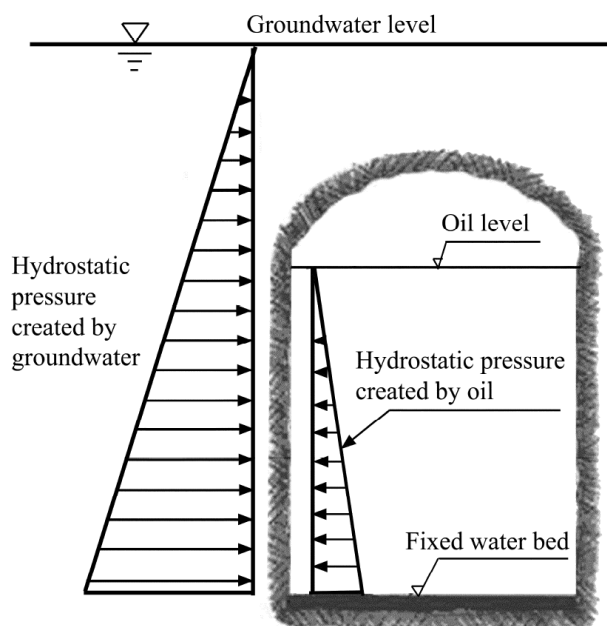
Kuvio 33. Oulun kalliovarasto (Sipilä 1989)

Kalliosäiliöiden tarkoituksena on toimia suurena öljyvarastona. Kaksi tyypillisintä käyttötapaa ovat pitkäaikainen varastointi sekä puskurivarastointi. Puskurivarastot liittyvät öljynjalostusketjuun ja ovat esimerkiksi rannikolle sijoitettuja säiliöitä, joihin voidaan purkaa nopeasti täydessä kuormassa oleva tankkerialus. Puskurit tyhjenee jakelukanavia myöten hitaammalla tahdilla. (Pienaar 2010, 231.)

Pitkäaikainen varasto toimii yksittäisenä suurena energiavarastona, tyypillisesti voimalaitoksen välittömässä läheisyydessä. Kyseisellä järjestelyllä voidaan turvata poikkeustilojen energiantuotanto, jos primäärisen polttoaineen saanti on estynyt. (Eri-tyislainsäädäntö n.d.)

Öljyn turvallinen varastointi perustuu pohjaveden paineeseen. Öljy kelluu säiliössään vesipatjan päällä. Lisäksi kalliosäiliön seinämissä oleva pohjaveden paine tulee saada korkeammaksi kuin säiliössä olevan öljyn paine. Tällöin öljy on ympäröity jokaiselta suunnalta jossain määrin vedellä, jolloin öljy ei pääse valumaan tai imeytymään kallioperään tai pohjaveteen (ks. kuvio 34). Jos luontainen pohjaveden paine ei ole riittävä, voidaan säiliön ympärille porata reikiä, joihin pumpataan paineistettua vettä. Menetelmää kutsutaan vesiverhoksi. (Geostock 2016)

Veden hallinta on oleellinen osa kalliovaraston käyttöä. Ylimääräinen vesi halutaan poistaa säiliöstä, mutta pakollinen vesimäärä vaaditaan turvallista käyttöä varten. Öljyn pinnan hallintaan on olemassa kaksi eri menetelmää riippuen siitä, pumpataanko öljy säiliöstä pinnasta vai pohjalta. Kuvion 34 mukaan vesipatja on kiinteällä tasolla ja öljyn taso vaihtelee. Pumppaus tehdään säiliön pohjalta ja säiliön yläosa täyttyy ilmalla säiliön tyhjetessä. Toinen tapa on, että öljyn pinta on kiinnitetty säiliön yläpäähän ja vesipatjan paksuus vaihtelee. Öljy pumpataan pinnasta ja säiliö täyttyy vedellä öljymäärän vähetessä. Raskas polttoöljy ja raakaöljy pysyvät kalliosäiliön normaaleissa lämpötiloissa (5 - 6 °C) jähmeänä ja vaativat täten esilämmityksen pumppaamista varten. Esilämmitys on oleellinen putkien tukkeutumisen ehkäisemiseksi. (Oil Storage In Rock Caverns n.d.)



Kuvio 34. Kalliosäiliön hydrostaattikka (Lu 2010)

### 5.3 Kallioperä

Kallioperän ominaisuuksia on tarkasteltava kahdesta syystä. Ensimmäinen on luolaston rakenteellinen kestävyys ja turvallisuus kaukojäähdytyskäytössä. Toinen on kallioperän vaikutus jäähdytysakun kapasiteettiin. Jos kallioperä on lämpimämpi kuin varastoitava vesi, vähentää kallioperän lämpö akun kapasiteettia. Jos kallio on viileämpi, tai pystytään jäähdyttämään akkuveden lämpötilaan, saadaan akkuun veden lisäksi ylimääräistä kapasiteettia.

Suomen kallioperä kuuluu Fennoskandian kilpeen ja on erittäin vanhaa kalliota. Sen ikä on 570 - 4600 miljoonaa vuotta (Turunen n.d.). Tampereen kalliovarasto sijaitsee alueella, jonka kallioperä koostuu amfiboliitista ja tuffiitista (Maankamara, ks. liite 12). Amfiboliitti on metamorfinen kivi, joka on Suomessa yleinen kivilaji. Amfiboliitin fysikaaliset ominaisuudet ovat listattu taulukossa 3. Tuffiitti on sedimenttikiven ja vulkaanisen aineen seos, jossa vulkaanisen aineen (tuhkan) osuus on 25-75 %. (Lehtinen, Nurmi & Rämö 1998, 45.) Tuffiitin tiheys hyvin lähellä amfiboliitin tiheyttä (ks. liite 13). Tuffiitin lämmön johtavuus on noin 2 W/(K·m).

Taulukko 3. Amfiboliitin lämpötekniset ominaisuudet (Muokattu: Airo & Kiuru 2012, 33.; Eppelbaum, Kutasov & Pilchin 2014, 104.; Patrikainen 1983, 11, 25.)

Amfiboliitin ominaisuudet		
Tiheys [ $\rho$ ]	2700 - 3100	kg/m <sup>3</sup>
Ominaislämpökapasiteetti [ $c$ ]	700 - 800	J/(Kg·K)
Lämmönjohtavuus [ $\lambda$ ]	2,4 - 3,3	W/(K·m)

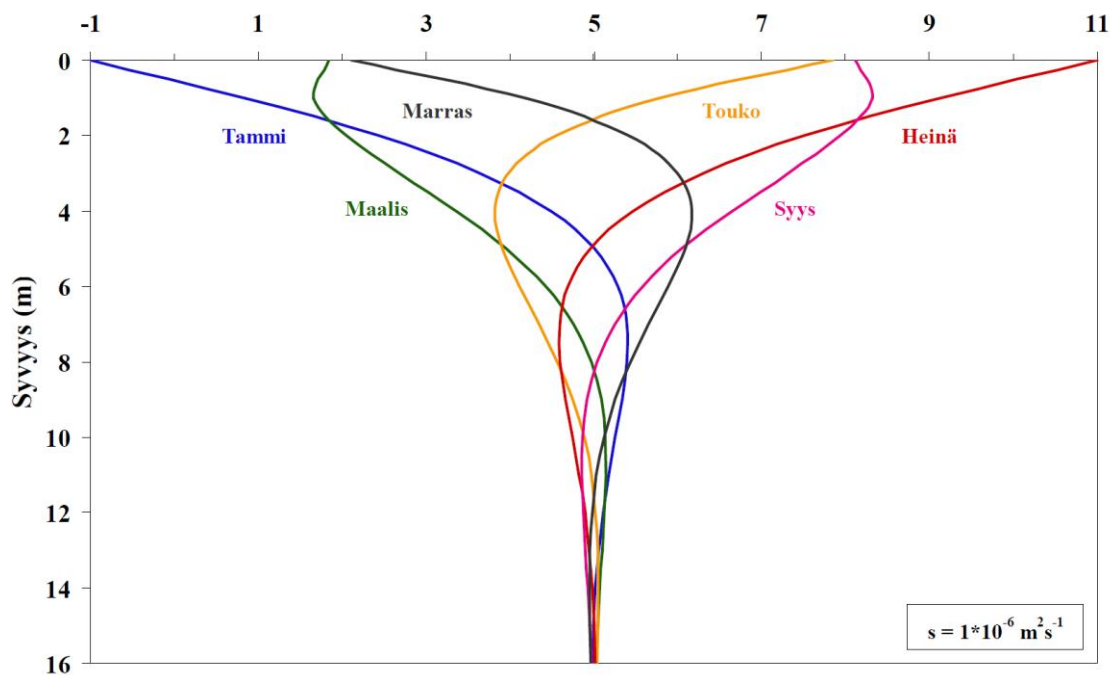
Terminen diffuusiokerroin  $\alpha$  [ $\frac{m^2}{s}$ ] on luku, joka lasketaan tiheyden, ominaislämpökapasiteetin ja lämmönjohtavuuden perusteella yhtälöllä 6. Se kuvaa aineen jäähtymistä tai lämpenemistä ympäristön lämpötilaan. Suurempi kerroin kertoo nopeammasta lämmönsiirrosta ympäristöön nähden.

$$\alpha = \frac{\lambda}{\rho \cdot c} \quad (6)$$

Missä  $\lambda$  = Lämmönjohtavuus  $\left[ \frac{W}{K \cdot m} \right]$

Sijoittamalla taulukon 3 arvot yhtälöön 6, saadaan amfiboliitin termisen diffuusioker-  
toimen arvojoukko:  $1,11 - 1,52 \cdot 10^{-6} \frac{m^2}{s}$ . Vaihteluväli on oikean suuntainen, tutki-  
musarvoon  $1,24 \cdot 10^{-6} \frac{m^2}{s}$  verrattuna (Äikäs 1999). Luku on noin kymmenen kertaa  
suurempi veden kertoimeen ( $0,14 \cdot 10^{-6} \frac{m^2}{s}$ ) nähden, jonka perusteella voidaan pää-  
tellä, että kalliolla on edellytykset viilentyä akun lataamisen ohessa.

Suomen kallioperän keskimääräinen pintalämpötila vaihtelee paikkakunnittain (ks.  
liite 14.) ja vuoden ajoittain (ks. kuvio 35.) Lämpötila kuitenkin tasaantuu noin 10 - 20  
metrin syvyydessä ja nousee tätä syvemmällä noin 8 - 15 °C/km (Huusko 2015).  
Näistä tiedoista voidaan päätellä, että Tampereen kalliovaraston luontainen lämpö-  
tila on 4 - 10 °C välillä. Kalliovarasto on todellisuudessa kuitenkin hieman lämpi-  
mämpi, noin 15 °C. Tieto on peräisin Tampereen Sähkölaitoksen polttoaineiden hal-  
littajärjestelmästä, josta löytyy ulospumpatun öljyn lämpötila.



Kuvio 35. Ilman lämpötilan vaikutus kalliion lämpötilaan. (Leppäharju 2008)

Kaukojäähdytyskäyttö ei aiheuta kalliolle suuria rasituksia pienistä lämpötilaeroista  
johtuen. Kaukojäähdytysverkon paluovesi on noin 14 - 16 °C ja menovesi 8 °C. Teo-  
reettinen minimilämpötila menovedelle on 0 °C. Jäähdytysakun käyttölämpötilat ovat

hyvin lähellä kallioperän luontaista lämpötilaa. Tästä voidaan todeta, että kalliorakenne ei välttämättä tarvitse rakenteellista vahvistusta.

Jos kallioluolaa käytetään kaukolämpöakkuna, sen käyttölämpötila on huomattavasti korkeampi (60 - 100 °C). Tällöin kallioon kohdistuva lämpökuorma saa aikaan paikallisen lämpölaajenemisen ja kallion tai maan pinnan kohoamisen. (Pöyry Oy 2014, 10 – 11.)

Kallioluola altistuu äärimmäiselle kylmyydelle, jos siellä säilötään nesteytettyä maakaasua. Nesteytetyn maakaasun lämpötila normaali-ilmanpaineessa on noin -160 °C. Kallioon kohdistuu lämpenemiseen verrattavaa räsitusta, mutta kylmän tapauksessa laajenemisen sijaan supistumista. Pohjavesi jäätyy säiliön ympärille suojaavaksi kuoreksi. Tämä aiheuttaa kallion rakoihin laajenemista. Edellä mainittujen ääriolosuhteiden vuoksi kallion vahvistaminen betoni-injektoinnilla, pulttauksilla ja ruiskubetonoinnilla on tärkeä toimenpide.

#### 5.4 Puhdistaminen

Yleensä öljynpuhdistaminen tulee kyseeseen silloin, kun tapahtuu öljyvahinko. Tyypillisimpiä öljyvahinkoja ovat maaperän likaantuminen vuotavan säiliön takia, merialueen likaantuminen tankkerin tai öljynporauslautan onnettomuudessa sekä edellä mainituista aiheutuva rantojen likaantuminen. Veden päälle tapahtunut vuoto on yleensä helpompi rajata ja saada hallintaan puomituksilla. Maalla tapahtuvassa vuodossa öljy voi pahimmillaan valua maaperän läpi pohjavesikerroksen päälle. Ison maa-alueen saastuessa ainut keino on pilaantuneen maa-aineksen poisto. Maan päällisistä vuodoista vaikeimmat tisleet ovat keskiraskaat diesel, kevytpolttoöljy sekä petrooli. Raskaat öljyalaadut ovat vaikeimpia vesialueilla. Öljy leviää maaperässä yleensä vain muutamien satojen neliömetrien alueelle vuodon määrästä riippuen. Jos öljy pääsee pohjaveteen asti, kasvaa likaantunut alue nopeasti neliökilometrien kokoiseksi. Maaperän ollessa huonosti vettä läpäisevää (moreenia, silttiä, kalliota), öljyn imeytyminen estyy, mutta se voi kulkeutua hallitsemattomasti. (Öljyn käyttäytyminen maaperässä 2013.)

Öljyn puhdistamiseen on olemassa useita menetelmiä, jotka vaihtelevat tisleen ja olosuhteiden mukaan. Ne voidaan jakaa poistaviin menetelmiin sekä hajottaviin menetelmiin. Käsien ja koneellisesti tehdyt mekaaninen työ sekä peseminen kuuluvat poistaviin menetelmiin. Hajottavat keinot ovat esimerkiksi polttaminen paikalla, dispersio ja biologinen hajoaminen. (Vahinkojätteen keräämisen organisointi rannoilla ja puhdistusmenetelmät 2011, 10 – 15.)

Kalliosäiliöitä on Suomessa puhdistettu tarpeen vaatiessa. Oulussa öljysäiliöt on muutettu kaukolämpöakuiksi 1990-luvulla. Oulun kalliovarastossa säilytettiin teollisuusbensiniä. Kevyemmät tisleet ovat helpommin poistettavissa reaktiivisuutensa ja höyrystyvyytensä ansiosta. Oulun tapauksessa bensiniä voitiin höyrystää ja polttaa soihdussa. Mekaanista puhdistusta ei vaadittu, eikä säiliössä tarvinnut puhdistusvaiheessa fyysisesti käydä. (Huumo 2017)

Kotkan Katariinassa sijaitsee kalliovarastot, joissa on säilytetty diesel-öljyä. Luolat on puhdistettu vuonna 2007. Puhdistuksen seuranta jatkuu edelleen, bakteerikannan poistaessa viimeiset dieseljäämät. (Pöyry Oy 2014, 5.)

Raskaan polttoöljylle tyypilliset ominaisuudet ovat suuri tiheys (920 - 1020 kg/m<sup>3</sup>), suuri kinemaattinen viskositeetti (5 - 30 Pa·s 15 °C) ja korkea jähmepiste. Ominaisuuksiensa takia raskas polttoöljy on tavallisissa sääoloissa (0 - 25 °C) erittäin jähmeässä tai kiinteässä muodossa. Raskas polttoöljy voi sisältää vettä raskaampia aineita, kuten bitumia ja asfalteenia. (Ansell, Dicks, Guenette, Moller, Santner & White. 2001, 3.)

Raskaan öljyn päästessä kontaktiin kiinteisiin pintoihin, sillä on tapana kiinnittyä lujaasti. Öljyyntyneen kiviaineen pesuun voidaan käyttää kerosiinia tai muita soveltuvia liuottimia. Alhaisten lämpötilojen vuoksi pumppaaminen ja imeminen ilman liuotusta ovat lähes mahdotonta. Muita keinoja ovat dispersioaineet, painepesu, höyrypesu ja hiekkapuhallus. (Ansell ym. 2001, 7 – 8.)



## 6 Jäähdytysenergiapotentiaali

Jäähdytyskäytössä kalliovarasto täytettäisiin kokonaisuudessaan vedellä ja jäähdytetäisiin talven aikana niin viileäksi, kuin on jäähdytysverkon vapaajäähdytyksellä mahdollista. Kesällä, järven lämpötilan noustessa, vapaajäähdytyksestä saatava teho pienenee, jolloin nykyisessä järjestelmässä huipputeho tuotetaan kompressoreilla. Jäähdytysakku liitettäisiin jäähdytysverkkoon lämmönvaihtimen kautta. Seuraavassa laskussa minimilämpötilan oletetaan olevan 4 °C. Akkuun palaavan veden lämpötila on kaukojäähdytysverkon paluulinjan lämpöinen, eli noin 16 °C. Lämmönvaihtimen asetuudeksi voidaan valita 2 °C, jolloin lämpötilaeroksi saadaan 10 °C. Lämpötilat on havainnollistettu kuviossa 36. Kalliovaraston teoreettinen energiasisältö saadaan laskettua yhtälön 1 avulla. Kalliovaraston tilavuus on 280 000 m<sup>3</sup>, josta voidaan laskea vedelle massa tiheyden avulla.

$$\begin{aligned}
 Q &= mc\Delta T \\
 &= 280\,000\,000\text{kg} \cdot 4,182 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}} \cdot 10^\circ\text{C} \\
 &= 11\,709\,600\,000\text{ kJ} \approx 3\,250\text{ MWh}
 \end{aligned}$$

Kun edellä laskettu energiamäärä jaetaan esisuunnittelussa valitulla siirtoteholla 5 MW, saadaan arvio akun käyttöajasta.

$$\frac{3\,250\text{MWh}}{5\text{MW}} = 650\text{h} \approx 27\text{vrk}$$

Energialle voidaan määrittää karkea hinta vertaamalla sitä kompressoreilla tuotettuun jäähdytykseen. Laskussa kompressoreiden kylmäkertoimeksi EER on valittu keskimääräistä jäähdytyslaitteistoa kuvaava arvo 2 ja sähkön hinnan oletetaan olevan 100 €/MWh.

$$\frac{3\,250\text{MWh}}{2} \cdot 100 \frac{\text{€}}{\text{MWh}} = 162\,500\text{€}$$

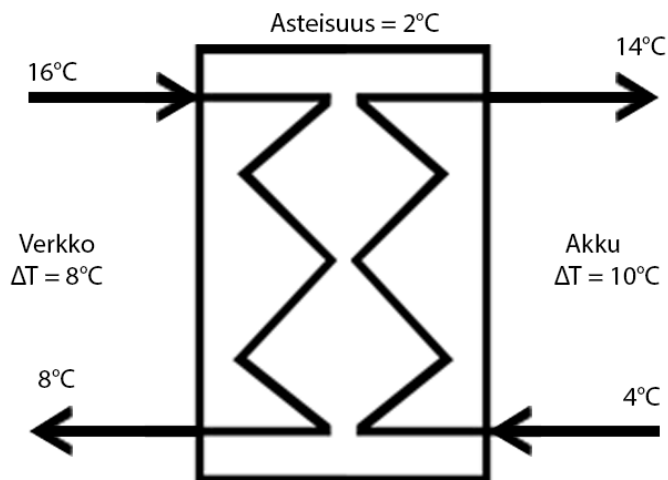
Yhtälöllä 2 voidaan ratkaista lämmönvaihtimelta (ks. kuvio 36) vaadittavat massavirrat 5 MW siirtoteholla, kun yhtälö ratkaistaan massavirran suhteen. Lämpötilaero on lämmönvaihtimen verkon ja akun puolella erisuuruiset.

$$\dot{Q} = \dot{m}c\Delta T$$

$$\dot{m} = \frac{\dot{Q}}{c\Delta T}$$

$$\dot{m}_{\text{verkko}} = \frac{5000 \frac{\text{kJ}}{\text{s}}}{4,182 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}} \cdot 8^\circ\text{C}} = 149,4500 \dots \frac{\text{kg}}{\text{s}} \approx 150 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

$$\dot{m}_{\text{akku}} = \frac{5000 \frac{\text{kJ}}{\text{s}}}{4,182 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}} \cdot 10^\circ\text{C}} = 119,5600 \dots \frac{\text{kg}}{\text{s}} \approx 120 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$



Kuvio 36. Akkupiirin ja jäähdytysverkon yhdistävä lämmönvaihdin

On kuitenkin huomion arvoista, että lämpötilaero vaikuttaa radikaalisti akun kapasiteettiin. Kapasiteettia voisi kasvattaa nostamalla lämpötilaeroa. Ensimmäinen keino on jäähdyttää akku alhaisempaan lämpötilaan. Puhtaalla vedellä 0 °C olisi alhaisin

mahdollinen lämpötila, mutta liitteen 10 perusteella voidaan todeta käytännön minimin olevan noin 2 °C. Toinen keino olisi antaa palaavan linjan veden lämmitä hieman korkeampaan lämpötilaan, esimerkiksi 20 °C:een. Toisaalta lämmön siirtymistä akkupiiriin ja jäähdytysverkon välillä voidaan parantaa hyvällä lämmönvaihtimella, jonka asteisuus on mahdollisimman alhainen. Taulukkoon 4 on laskettu lämpötilaerojen vaikutus akun kapasiteettiin yhtälön 1 avulla. Taulukon avulla voidaan nopeasti havainnoida esimerkiksi lämpötilaeroista, lämmönvaihtimen asteisuudesta tai kallion lämmittävästä vaikutuksesta aiheutuvia häviöitä.

Taulukko 4. Lämpötilaero ja kapasiteetti

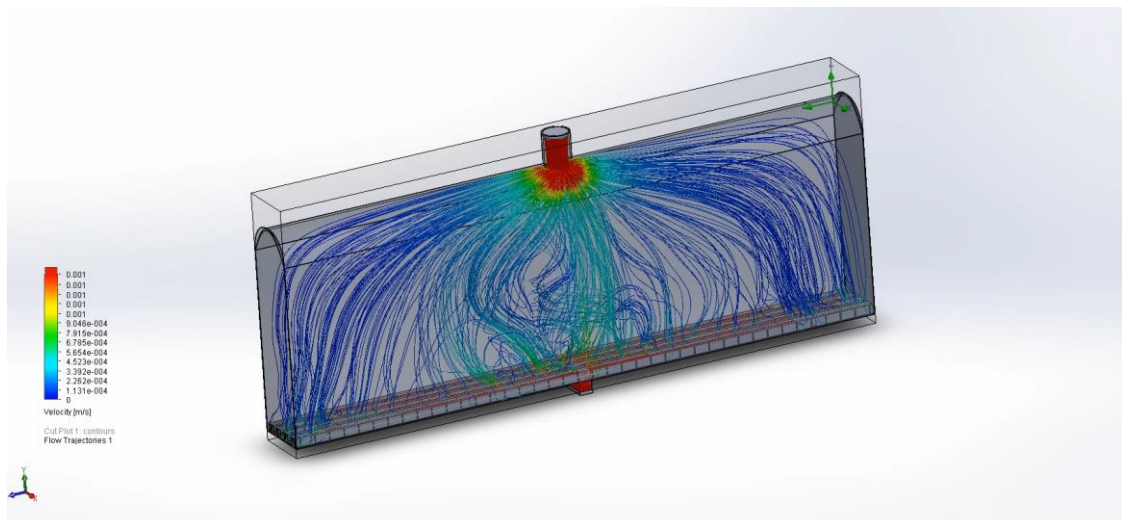
$\Delta T$ [°C]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Energia [MWh]	325	651	976	1301	1626	1952	2277	2602	2927	3253
$\Delta T$ [°C]	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Energia [MWh]	3578	3903	4228	4554	4879	5204	5530	5855	6180	6505

## 7 Laitteisto ja suunnitelmat

Nykyisin Naistenlahden kalliovarastossa säilytetään raskaan öljyn sijaan kevyttä öljyä. Tämän vuoksi on arvioitu, että kalliosäiliöiden seinämät ovat todennäköisesti puhdistuneet jonkin verran kevyemmän öljyn liottavien ominaisuuksien ansiosta. Kalliosäiliöiden täydellinen puhdistaminen arvioidaan olevan suuri investointi ja työnä erittäin haasteellinen. Tämä vaatisi, että säiliöt pumpataan tyhjiksi öljystä ja vedestä. Tämän jälkeen säiliöt tulisi tuulettaa huolellisesti. Myös rakennusaikaiset louhinta- ja huoltotunnelit tulisi avata uudelleen. Varsinainen puhdistustyö vaatisi todennäköisesti tehokkaiden liuottimien ja imujärjestelmien käyttöä. Öljyn raskaimpien komponenttien poistoon vaadittaisiin oletettavasti mekaanista työtä. Pohjan osalta voitaisiin käyttää esimerkiksi harjakoneita, mutta seinien puhdistaminen vaatisi hyvän työtaso- tai henkilönostinjärjestelmän. Toisaalta seinien puhdistaminen voisi onnistua myös kelluvan lautan päältä, jos säiliöitä ei tyhjennetä vedestä täysin. Voidaan kuitenkin todeta, että työ olisi joka tapauksessa turvallisuusnäkökulmasta erittäin haasteellinen. Kalliosäiliöiden öljyjäämistä johtuen akkujärjestelmä tulisi erottaa kaukojäähdytysverkosta lämmönvaihtimilla. Akkupiiriin olisi todennäköisesti hyödyllistä lisätä öljynerotusjärjestelmä tai vastaavat suodattimet.

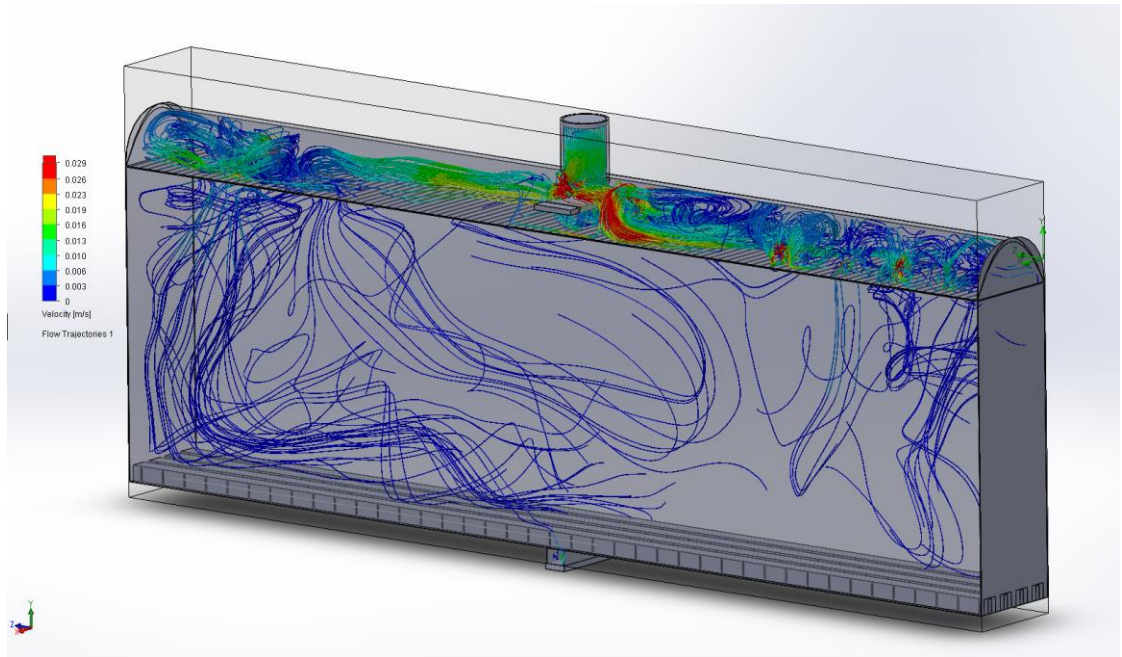
## 7.1 Virtauksenohjaimet

Jotta säiliöistä saataisiin optimaalinen hyöty jäähdytysakkukäytössä, tulisi niihin rakentaa virtauksen ohjaimet oikeanlaisen lämpötilakerrostumisen aikaansaamiseksi. Olettamusta tarkasteltiin mallintamalla yksi muodoiltaan karkeasti todellisuutta vastaava säiliö SolidWorks 3D-mallinnusohjelmalla ja simuloimalla virtausta ohjelman avulla. Tarkastelusta voidaan todeta, että säiliön virtaukset ilman diffuusoreita käyttäytyvät erittäin epähalutulla tavalla. Latausvaiheessa virtaus nousisi pohjan keski-osasta suoraan ylös, säiliön kattoon asti. Tällöin säiliön reuna-alueiden vesimassat jäisivät käytännössä paikoilleen. Kuviossa 37 säiliön pohjaan on mallinnettu yksinkertainen virtauksen ohjaimena toimiva koururakenne. Kourut jakavat virtauksen tasaisesti koko säiliön pohjan alalle. Ideana on, että kylmä vesi työntää lämpimän kerroksen ylös, josta se voidaan pumpata ulos säiliöstä.



Kuvio 37. Lataussykli, virtaus alhaalta ylös

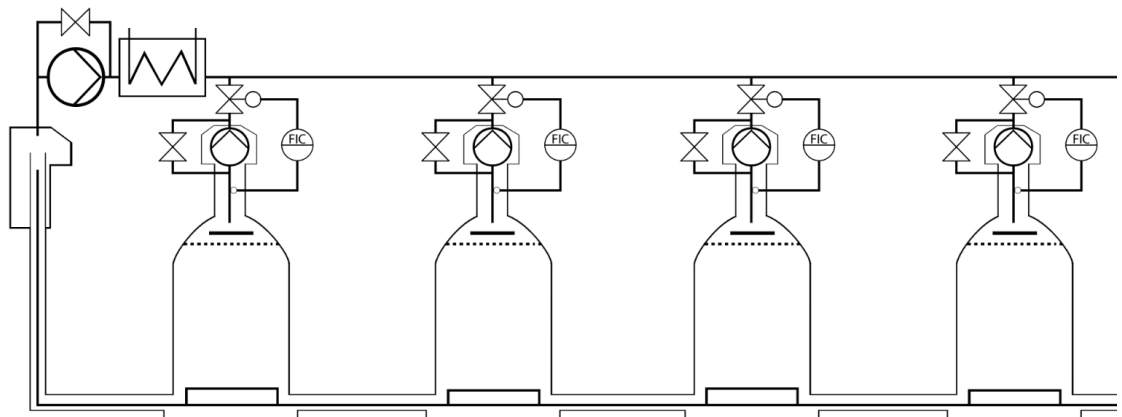
Purkamisvaiheessa lämpötilakerrostuminen on kaukojäähdytysakulla vieläkin oleellisempää. Kun lämmennyt vesi (14 °C) palaa säiliön yläosaan, on erittäin haluttua, ettei sekoittumista tapahdu. Sekoittumisen vuoksi säiliön kylmin lämpötila (0-4 °C) voidaan menettää ja jäljelle jää ns. väljähtynyttä energiaa (6-10 °C). Kuviossa 38 on esitetty tilanne, jossa säiliön yläosaan on mallinnettu yksinkertainen ritilärakenne, sekä yksi virtauslevy suoraan tuloputken alapuolelle. Näillä on pyritty tilanteeseen, jossa sisään tulevan virtaus menettää nopeutensa säiliön yläosaan, sekoittumatta alapuolella olevaan kylmään veteen. Tavoitteena on tasainen lämpötilakerrostuminen.



Kuvio 38. Purkaussykli, virtaus ylhäältä alas

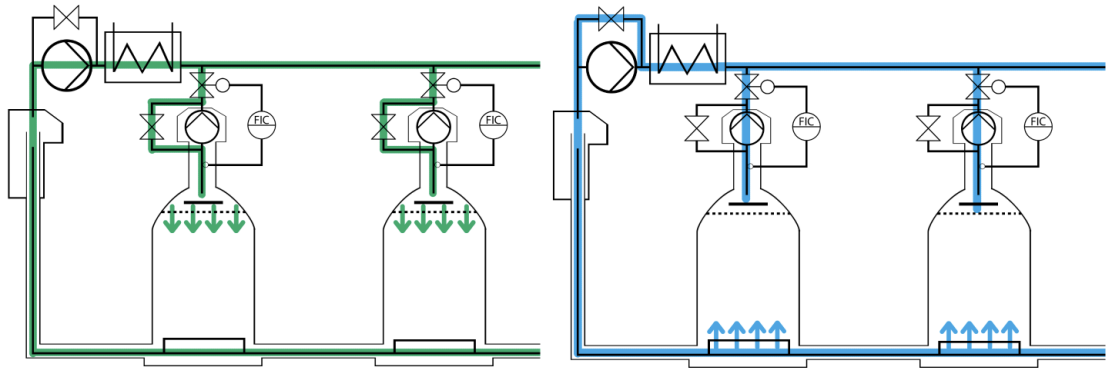
## 7.2 Perussäätö

Kylmäakun lataamista ja purkausta varten vaaditaan oikeanlainen säätösystemi, jotta vesimassa liikkuu halutulla tavalla. Kuviossa 39 on esitetty yksi esimerkki järjestelmästä, jolla lataus ja purku voidaan suorittaa tarvittaessa säiliö kerrallaan.



Kuvio 39. Esimerkijärjestelmän yleiskaavio

Lataamisessa pinnasta pumpataan lämmintä vettä pois säiliöstä. Tämä johdetaan lämmönvaihtimen kautta takaisin säiliöiden pohjaan. Jos jokaisella säiliöllä on samankokoinen pumppu, jotka pyörivät samalla kierrosnopeudella, voidaan olettaa massavirran olevan sama (ks. kuvio 40, oikea). Tällöin kaavioon piirretyt säätöventtiilit voidaan pitää täysin avoinna. Myös lämmönvaihtimen yhteydessä oleva pumppu voidaan ohittaa. Kierrosnopeuserusteista tehonsäätöä varten pumppujen sähkökäytöt tulee varustaa taajuusmuuttajilla.



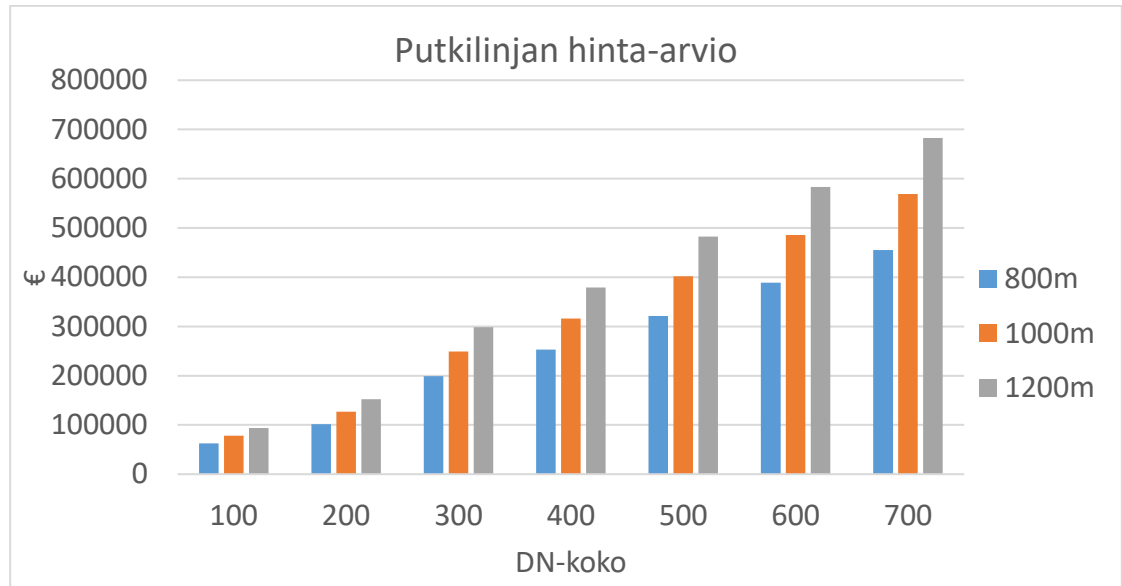
Kuvio 40. Nestekierto purkamisen ja lataamisen yhteydessä

Purkamisvaiheessa (ks. kuvio 40, vasen) säiliökohtainen pumppaus voidaan ohittaa, ja käytössä on yksi suuri pumppu. Tällöin massavirta säädetään kuristusventtiileillä. Tilanne vastaa teorialtaan kappaleessa 4.4 esitettyä verkon tasapainotusta, mutta säiliöiden tapauksessa mittasuhteet ovat erilaiset. Ideana on, että jokaiselle säiliölle saadaan tarvittaessa sama lämmönsiirtoteho. Toisaalta järjestelmä mahdollistaa säiliöiden käyttämisen myös yksittäin, kun halutut säiliöt suljetaan kuristusventtiileillä.

### 7.3 Siirtolinja

Kalliovaraston liittäminen kaukojäähdytysverkkoon vaatii noin 1 kilometrin pituisen putkilinjan. Linjan hintaa ja siirtokapasiteettia on arvioitu karkeasti kaukolämpöputkien mitoitusperiaatteiden mukaan. Kaukolämpöputket mitoitetaan sellaiselle massavirralle, että veden nopeus ei oleellisesti ylitä nopeutta 2 m/s. Tällä halutaan minimoida lämpöhäviöitä. Putkilinjojen hinnat ovat laskettu Energiateollisuus Ry:n tilaston datan perusteella, johon on kerätty toteutettujen kaukolämpöputki-investointien kustannukset. On huomioimisen arvoista, että kaukojäähdytysputket eivät välttä-

mättä vaadi yhtä suuria eristepaksuuksia ja lämpötilaerojen ollessa matalammat. Tämän vuoksi lämpöhäviöitäkään ei muodostu kaukolämpöjärjestelmiin verrattavia määriä. Kuviossa 41 on esitetty hinta-arvio putkille kokoluokissa DN-100 –DN-700 linjan pituuden ollessa 1000 m ± 200 m.



Kuvio 41. Putkilinjan hinta-arvio. (muokattu: Sirola 2016)

Suunniteltua 5 MW:n tehoa on skaalattu seuraavassa laskelmassa aina 50 MW:iin asti. Taulukon 5 arvot on laskettu DN putkikokojen poikkipinta-alan ja jäähdytyksen lämmönsiirtotehon avulla, olettaen lämpötilaeroksi 8 °C. Taulukkoon on merkattu vihreällä korostuksella karkeasti 2 m/s nopeusalue ja keltaisella 5 m/s nopeusalue.

Taulukko 5. Virtauksen nopeudet putkikoon ja jäähdytystehon suhteen

DN	5MW	10MW	20MW	30MW	40MW	50MW	kg/s
	150	300	600	900	1200	1500	
100	16,65	33,18	66,36	99,54	132,71	165,89	m/s
200	4,33	8,62	17,24	25,86	34,49	43,11	
300	1,95	3,89	7,78	11,68	15,57	19,46	
400	1,23	2,45	4,91	7,36	9,82	12,27	
500	0,78	1,55	3,10	4,65	6,20	7,75	
600	0,54	1,07	2,14	3,22	4,29	5,36	
700	0,39	0,78	1,57	2,35	3,14	3,92	





Taulukon 6 värikoodaus on tehty vuosittaisen energiankulutuksen (k€/a) ja pumppujen yleisen saatavuuden mukaan. Vihreällä olevat pumpput ovat helposti saatavilla ja ovat käyttökustannuksiltaan hyväksyttäviä. Keltaisella koodatut pumpput ovat saatavilla, mutta niiden käyttökustannukset nousevat korkeammiksi. Oranssilla merkattuja pumppuja ei ole käytännössä saatavilla, jolloin investointikustannukset nousevat oletettavasti suuremmiksi.

Taulukon 6 tietojen perusteella voidaan todeta heti, että yhden pumpun järjestelmää ei kannata mitoittaa yli 30MW jäähdytystehoja ajatellen. Taulukon arvoista on huomioitava, että vuotuiset käyttökustannukset eivät kuvaa tilannetta kaukojäähdytysjärjestelmän osana, sillä luvut on laskettu olettaen pumppujen olevan päällä vuoden ympäri. Tällöin luku kuvaa enemmän pumppausjärjestelmän hyötysuhdetta. Tämän perusteella voidaan todeta, on kannattavampaa käyttää yhtä tai kahta isompaa pumppua, kuin useaa pienempää. Toisaalta 8 pienempää pumppua on helpompi asentaa ahtaaseen luolastoon. Pumppausjärjestelmällä ei ole suuria vaatimuksia imukorkeuden suhteen, sillä pumppaaminen voidaan suorittaa ns. pintapumppaamisena suoraan suurista säiliöistä. Nostokorkeuden tulee riittää luolaan asennettavalle lämmönvaihtimelle, joten senkään suhteen vaatimukset eivät ole erityisen suuret.

Yksikkökohtaista hankintahintaa voidaan pienentää sähkökäytön osalta sillä, että yhteen taajuusmuuttajaan liitetään kaksi tai useampi sähkömoottori. Vaatimuksena on se, että pumppujen moottorit ovat tyypiltään ja kuormiltaan samat.

Lämmönvaihtimien mitoituksessa pääasiallinen tekijä on massavirta. Painetaso on sekä jäähdytysverkossa että akkupiirissä oletettavasti niin matala (8bar), että lähes jokainen teollisuuskäyttöön suunniteltu lämmönvaihdin ylittää vaatimukset (16bar). Saatavilla olevista lämmönvaihtimista koostettiin valintataulukko eri tehotasojen mukaan. Taulukossa 7 on esitetty Alfa Lavalin levylämmönvaihtimien arvoja suunnitelluilla kaukojäähdytystehoilla. Taulukkoon on korostettu vihreällä ne vaihdintyytit, joiden kappalemäärä määrättyä tehoaluetta ajatellen on noin 1-4kpl.

Taulukko 7. Saatavilla olevien lämmönvaihtimien kapasiteetti tarkastelu (muokattu Overview of Alfa Laval AQ range 2016)

m <sup>3</sup> /hr	bar	kpl 5MW	kpl 10MW	kpl 20MW	kpl 30MW	kpl 40MW	kpl 50MW
14	16	38,57	77,14	154,29	231,43	308,57	385,71
58	25	9,31	18,62	37,24	55,86	74,48	93,10
72	25	7,50	15,00	30,00	45,00	60,00	75,00
180	25	3,00	6,00	12,00	18,00	24,00	30,00
430	30	1,26	2,51	5,02	7,53	10,05	12,56
700	30	0,77	1,54	3,09	4,63	6,17	7,71
800	30	0,68	1,35	2,70	4,05	5,40	6,75
900	30	0,60	1,20	2,40	3,60	4,80	6,00
1800	25	0,30	0,60	1,20	1,80	2,40	3,00
2000	30	0,27	0,54	1,08	1,62	2,16	2,70
3600	25	0,15	0,30	0,60	0,90	1,20	1,50

## 8 Johtopäätökset

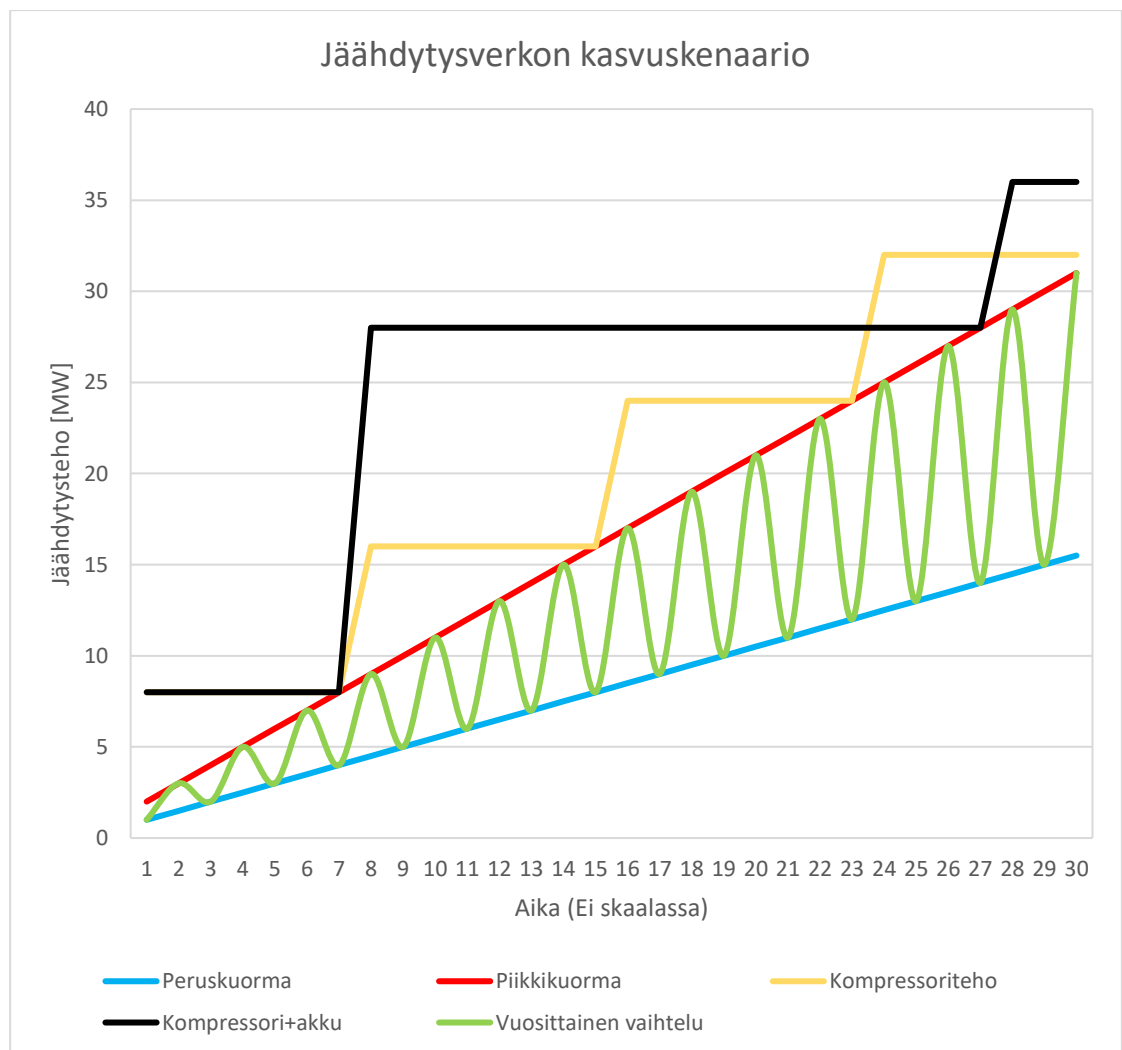
Laitteistoteknisen tarkastelun perusteella voidaan suurimmat tutkitut tehotasot 40 ja 50 MW rajata pois. Rajaamisen pääsyyt ovat vaatimukset suurelle siirtolinjalle pumpauskapasiteetille. Nämä nostavat investointikustannuksia huomattavasti. Toinen syy suuren siirtotehon hylkäämiselle on kaukojäähdytysverkon teho: akkujärjestelmän suuresta siirtokapasiteetista ei ole hyötyä verkon kapasiteetin ollessa melko pieni.

Siirtokapasiteetiltaan 20 – 30 MW:n järjestelmää voidaan pitää järkevänä ylärajana. Tällaiselle järjestelmälle olisi helposti saatavilla vaadittavia pumppuja ja lämmönvaihtimia. Myös siirtolinjan koko voisi olla hieman pienempi: 20 MW:n järjestelmä saattaisi toimia jopa DN-400–DN-500 kokoisella siirtolinjalla. Päätelmän taustalla on kaukojäähdytyksen tyypillinen kuormituksen jakautuminen: kesäiset kulutushuiput ovat melko lyhytaikaisia verrattuna vuoden muuhun kulutukseen, jolloin siirtolinjassa voitaisiin hetkellisesti sallia keskimääräistä suuremmat virtausnopeudet.

20 MW:n siirtokapasiteetti olisi järkevämmän kokoinen nykyiseen kaukojäähdytysverkkoon ja riittävän suuri, jotta sitä voitaisiin hyödyntää tulevaisuudessakin. Jos 20 MW:n siirtotehoa verrataan nykyiseen Kaupinojalta saatavaan kompressoritehoon

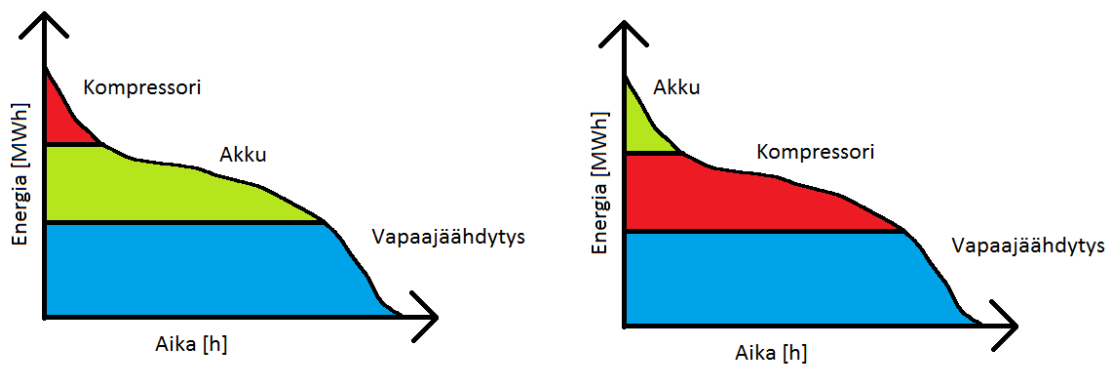
(piikkitehoon) 8 MW, olisi akun siirtokapasiteetti 2,5-kertainen. Nykyisten asiakkaiden koko sopimusteho 20 MW voitaisiin tuottaa akulla. 20 MW:n siirtoteholla akun tyhjeneminen kestäisi noin 6,7 vuorokautta.

Jäähdytysverkon tehontarve tulee kasvamaan tulevaisuudessa ja tätä varten Kaupinojan lopullisen kompressoritehon on alustavasti arvioitu olevan 40 MW. Voidaan olettaa, että kompressorikapasiteettia kasvatetaan porrastetusti. Kuviossa 42 on esitetty kuvitteellinen skenaario, jossa jäähdytysakulta saatavaa piikkitehoa verrataan pelkästään kompressoreilla tuotettuun huipputehoon. Jäähdytysakun avulla uusien kompressorien hankintaväliä voitaisiin pidentää.



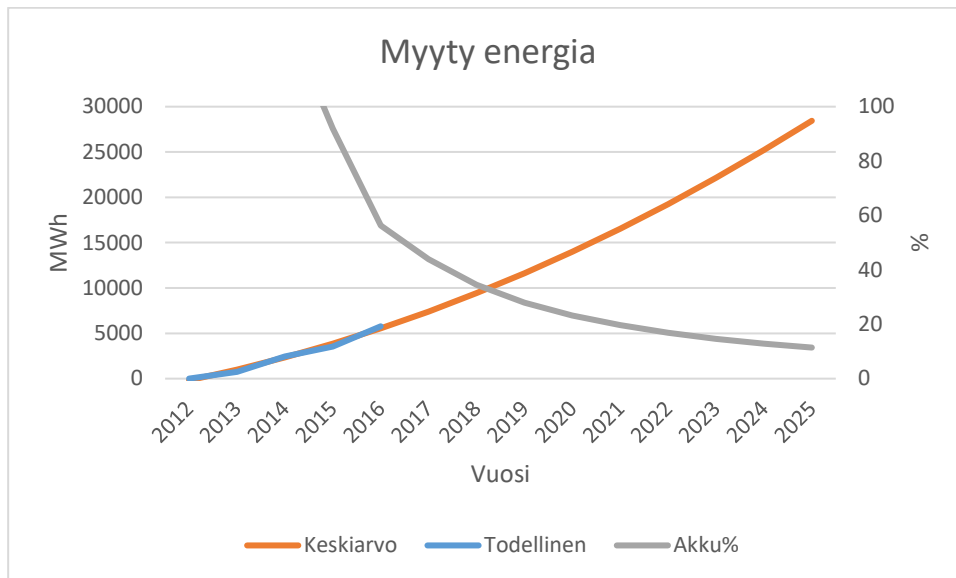
Kuvio 42. Jäähdytysverkon kasvuskenaario

Jäähdytysakkua voitaisiin käyttää joko pitkäaikaisena varastona tai lyhytaikaisten piikkien tasaamiseen. Ajotapaan vaikuttaa oleellisesti vaadittava piikkikuorma ja piikkikuormissa vaadittu energiamäärä. Voidaan olettaa, että aluksi akun kapasiteetti olisi melko suuri verkon kapasiteettiin nähden. Tällöin akulla voitaisiin helpommin vastata kesän kulutushuippuihin ja akun energiamäärä riittäisi hyvin. Jäähdytysverkon kapasiteetin kasvaessa, akkukapasiteetin prosentuaalinen osuus laskisi oleellisesti. Tällöin akun ajoprofiili voitaisiin muuttaa päivittäisten kuormien tasaamiseen. Ajotavan muutosta on havainnollistettu kuviossa 43.



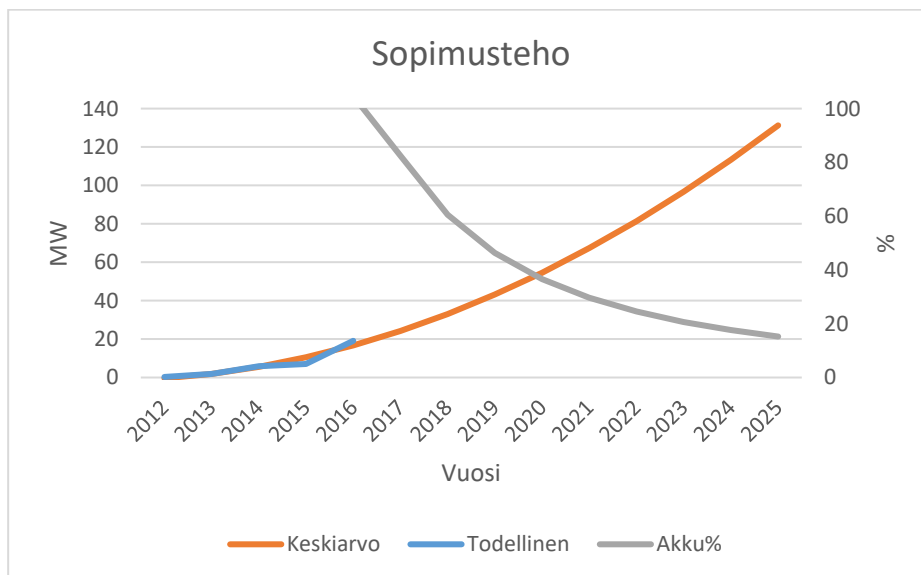
Kuvio 43. Tuotantoprofiilin muutos

Tuotantorakenteen muutosta voidaan arvioida kappaleessa 3.2 esitettyjen ennusteiden perusteella. Kun myytävään energiamäärään ja sopimustehon kehittymiseen suhteutetaan akusta saatava energiamäärä ja tehotaso, voidaan arvioida akun merkitystä tulevaisuudessa. Kuvioissa 44 ja 45 on oletettu, että akun kapasiteetti on 3 250 MWh ja siirtoteho 20 MW. Nämä perustuvat laitteistoteknisiin arvioihin toimivasta ja helposti saatavilla olevasta järjestelmästä.



Kuvio 44. Akun energiasisältö verrattuna myytävän energian kehitykseen

Kuvion 44 perusteella voidaan sanoa, että akun energiasisältö on merkittävä suhteessa myytävään energiamäärään. Vielä 2020- 2025 luvuilla prosenttiosuuden voi arvioida olevan 20 % tuntumassa.



Kuvio 45. Akun tehon osuus suhteessa sopimustehon kehitykseen

Kuvion 45 perusteella voidaan todeta akulle valitun 20 MW: siirtotehon riittävän hyvin, ollen vuonna 2020 noin 35 %. Sopimustehon kehitys kuvaa pahinta mahdollista piikkikuorman kasvua ja todellisuudessa kulutushuiput eivät ole sopimuksien yhteenlasketun siirtotehon tasolla.

## 9 Pohdinta

Opinnäytetyön olivat perustiedon hankkiminen ja teknisten ratkaisuiden löytäminen. Tavoitteista pystyttiin pitämään melko hyvin kiinni. Vanhat öljysäiliöt voidaan muuttaa jäähdytysakuiksi. Muutostyön suurin investointi on todennäköisimmin kallioluolaston muutostyö, joka kattaisi puhdistuksen ja säiliöiden putkitukset. Samaan yhteyteen voidaan todeta, että mitä suurempi siirtoteho akkujärjestelmälle rakennetaan, sitä monipuolisemmin jäähdytysakku voidaan käyttää.

Opinnäytetyön suurin rajoitus on kallion puhdistus- ja vahvistustarpeen arviointi. Säiliöistä noin puolet ovat vielä täynnä öljyä ja öljystä tyhjät säiliöt ovat täynnä vettä. Tämä luo pahimman haasteen investoinnin arviointiin, koska säiliöiden todellisesta tilaa ei pysty fyysisesti tarkastamaan ilman sukeltamista. Muutosinvestoinnin kannattavuuteen vaikuttaa oleellisesti se, pystyykö säiliöitä hyödyntämään ilman puhdistustoimenpiteitä.

Siirtolinja jäähdytysverkon ja luolastonvälillä on myös oleellisen suuri investointi. Tätä investointia helpottaisi, jos kaukojäähdytysverkko saisi uusia asiakkaita Lapinniemi-Naistenlahti-Koukkuniemialueelta.

Opinnäytetyön puitteissa on löytynyt hyvää perustietoa kallioteknisiin asioihin. Tietoa voidaan hyödyntää jatkoselvityksissä ja suunnittelussa. Opinnäytetyössä on laskettu ja arvioitu akun energia- ja tehokapasiteettia. Näiden perusteella voidaan valita haluttu siirtoteho akun ja jäähdytysverkon välille. Valintojen tueksi on esitetty arvioita jäähdytysverkon kehityksestä.

Työssä on käytetty monipuolisesti lähteitä. Lämmönsiirto ja öljyteknikka ovat vanhoja ja hyvin tunnettuja tieteen osa-alueita, joista on saatavilla hyvin erilaisia teoksia. Kalliosäiliöistä ja niiden muutostöistä pyrittiin hakemaan kokemuseräistä tietoa ja sitä on Suomessa melko hyvin saatavilla, koska saman tyyppisiä kohteita on Suomessa useita.

Jäähdytysakkuja on käytössä Suomessa useita Energiateollisuus Ry:n tilastoinnin mukaan. Näistä kohteista voidaan hankkia helposti lisätietoja tarvittaessa. Jäähdytysakkujen teoria on maailmalla hyvin tunnettua ja aiheesta löytyy paljon tutkimuksia.

Investoinnin kannattavuuteen vaikuttaa hankintakustannuksen lisäksi oleellisesti jäähdytysakusta saatava rahallinen tuotto. Kannattavuuteen vaikuttaa pääasiassa piikkikuorman ja peruskuorman todellinen tarve ja sen kasvu. Opinnäytetyön puitteissa on määritetty akkuun varastoidulle energialle hinta (noin 160 k€). Hinnan oletus on se, että sillä korvataan kesällä tuotettavaa kompressorien perustehoa. Akkuun säilötyn energian arvo voi olla kuitenkin paljon suurempi, jos sillä korvataan piikkikuormassa vaadittua tehoa, jota ei saada muualta kuin akusta. Tämä tarkoittaa tilannetta, jossa akun kapasiteetilla voidaan korvata kompressori-investointeja.

Tulosten perusteella voidaan sanoa, että kompressori-investointien korvaaminen akkuinvestoinnilla on todennäköisesti mahdollista. Korvaustilanteessa rajaksi muodostuu piikkikuormituksessa vaadittu energiamäärä, toisin sanoen se, riittääkö akku kattamaan kaikki kesälliset kulutushuiput.

Kannattavuuden arvioinnissa ja jatkoselvityksessä on määritettävä kasvukäyrä piikkikuormituksessa vaaditulle energiamäärälle. Arvioon tulee huomioida piikkikuorman hinta. Tämän perusteella voidaan määrittää, mitä tehoa akulla kannattaa taloudellisessa mielessä korvata.

Tarkan takaisinmaksuajan määrittämiseksi tulee valita haluttu siirtoteho akun ja jäähdytysverkon välille, selvittää kallioluolan puhdistus ja vahvistustoimenpiteet sekä selvittää akkuun säilötyn energian todellinen tuotto eri tilanteissa.

## Lähteet

Airaksinen, M., Laitinen, A. & Rämä, M. 2016. Jäähdytyksen teknologiset ratkaisut. Espoo: VTT.

Airo, M.L. & Kiuru, R. 2012. Petrofysiikan perusteet. Report Series in Geophysics No 68. Helsinki: Helsingin yliopisto.

Aluehallintoviraston päätös 50/2013/2. Viitattu 31.1.2017. [http://www.avi.fi/documents/10191/56864/Issavi\\_paatos\\_50\\_2013\\_2\\_2013\\_06\\_18.pdf/1c6c4b37-d91e-42c6-9ad6-2493d8b7c27c](http://www.avi.fi/documents/10191/56864/Issavi_paatos_50_2013_2_2013_06_18.pdf/1c6c4b37-d91e-42c6-9ad6-2493d8b7c27c)

Ansell, D.V., Dicks, B., Guenette, C.C., Moller, T.H., Santner, R.S. & White, I.C. 2001. A Review of The Problems Posed by Spills of Heavy Fuel Oils. Florida: 2001 International Oil Spill Conference. Viitattu 31.1.2017  
<http://www.itopf.com/knowledge-resources/documents-guides/document/a-review-of-the-problems-posed-by-spills-of-heavy-fuel-oils-2001/>

Arithmetic and Logarithmic Mean Temperature Difference. N.d. The Engineering ToolBox – verkkosivuston artikkeli. Viitattu 27.3.2017.  
[http://www.engineeringtoolbox.com/arithmetric-logarithmic-mean-temperature-d\\_436.html](http://www.engineeringtoolbox.com/arithmetric-logarithmic-mean-temperature-d_436.html)

Bahnfleth, W.P. & Musser, A. 2001. Parametric Study of Charging Inlet Diffuser Performance in Stratified Chilled Water Storage Tanks with Radial Diffusers: Part 1–Model Development and Validation. London: HVAC&R Research

Beychok, M. N.d. Petroleum refining processes. ChemEngineering- verkkosivuston artikkeli öljynjalostuksesta. Viitattu 28.3.2017. <https://chemengineering.wikispaces.com/Petroleum+refining+processes>

Boehrer, B. & Schultze, M. 2008. Stratification Of Lakes. Reviews of Geophys., 46, RG2005. Viitattu 16.3.2017.  
<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2006RG000210/abstract>

Boles, M. & Çengel, Y. 2015. Thermodynamics: An Engineering Approach. 8.edition. New York: McGraw-Hill Education.

CPT ANSI Process Pumps-pdf. N.d. Sulzer- pumppuvalmistajan pdf-dokumentti. Viitattu 1.2.2017. [http://www.sulzer.com/fi/-/media/Documents/ProductsAndServices/Pumps\\_and\\_Systems/Single\\_Stage\\_Pumps/Brochures/CPTANSIProcessPumps\\_E00517.pdf](http://www.sulzer.com/fi/-/media/Documents/ProductsAndServices/Pumps_and_Systems/Single_Stage_Pumps/Brochures/CPTANSIProcessPumps_E00517.pdf)

Eppelbaum, L., Kutasov, I. & Pilchin, A. 2014. Applied Geothermics. New York: Springer.



Erityislainsäädäntö. N.d. Huoltovarmuuskeskuksen kooste polttoaineiden varmuusvarastointia koskevasta lainsäädännöstä. Viitattu 6.4.2017. <https://www.huoltovarmuuskeskus.fi/toimialat/energiahuolto/erityislainsaadanto/>

Evans, J. 2012. Centrifugal Pump Efficiency—What Is Efficiency? Pumps & Systems-lehden verkkoartikkeli 2/2012. Viitattu 13.3.2017. <http://www.pumpsandsystems.com/topics/pumps/pumps/centrifugal-pump-efficiency-what-efficiency>

Fractional distillation. N.d. BBC GCSE Bitesize-opetusmateriaalin artikkeli. Viitattu 28.3.2017. [http://www.bbc.co.uk/schools/gcsebitesize/science/aqa\\_pre\\_2011/rocks/fuelsrev3.shtml](http://www.bbc.co.uk/schools/gcsebitesize/science/aqa_pre_2011/rocks/fuelsrev3.shtml)

Geostock - Underground Storage in Mined Rock Cavern. 2016. Dokumenttiansimaatio kalliosäiliöiden louhinnan työvaiheista. Julkaistu 8.11.2016. Viitattu 6.4.2017. <https://www.youtube.com/watch?v=3tXPRaMbGV0>

Grundfos Product Center. N.d. Grundfos Oy:n pumpunvalintaohjelma versio 1.25.28. Viitattu 9.5.2017. <https://product-selection.grundfos.com/front-page.html?time=1494324968830&qcid=168152152>

Historia. N.d. Tampereen Sähkölaitoksen verkkosivut. Viitattu 11.10.2016. <https://www.tampereensahkolaitos.fi/yritysjaymparisto/toimintamme/historia/Sivut/default.aspx#.V--Z2PpRVhE>

How gasketed plate heat exchangers work. N.d. AlfaLaval-lämmönvaihtimien infosisivusto. Viitattu 1.2.2017. <http://www.alfalaval.us/microsite/gphe/tools/how-gphes-work/>

Huhtinen, M., Korhonen, R., Pimiä, T. & Urpalainen, S. 2013. Voimalaitostekniikka. Helsinki: Opetushallitus.

Huusko, A. 2015. Suomen geoenergiavarannot. Geologian tutkimuskeskus GTK. Viitattu 6.4.2017. <http://docplayer.fi/4751173-Suomen-geoenergiavarannot-asmo-huusko-geologian-tutkimuskeskus-gtk-asmo-huusko-gtk-fi.html>

Jones, E.G. & Lineweaver, C.H. 2010. Pressure-temperature Phase Diagram of the Earth. ASP Conference Series, Vol. 430, 145 – 151. Australian National University.

Jäähdytyksen kylmyys tulee nyt Näsjärven syvänteestä. 2016. Uutinen Sähkölaitoksen verkkosivustolla. Julkaistu 24.3.2016. Viitattu 1.2.2017. <https://www.tampereensahkolaitos.fi/yritysjaymparisto/ajankohtaista/Sivut/J%C3%A4hdytyksen-kylmyys-tulee-nyt-N%C3%A4sjarven-syv%C3%A4nteest%C3%A4.aspx>

Kaksonen, K.V., Posti, J. & Tepponen, M. 2012. Aarre maan syvyyksistä –verkkokoulutus sivusto. Taloudellinen tiedotustoimisto TAT. Viitattu 3.3.2017 <https://www.tat.fi/aarre/oljyn-jalostus/tislaustorni/>

Kaukojäähdytyksen dokumentit. N.d. Helen oy:n verkkosivu kaukojäähdytyslaitteisiin liittyen. Viitattu 28.3.2017. <https://www.helen.fi/jaahdytys/ammattilaiset/kaukojaahdytyksen-dokumentit/>

Kaukojäähdytys. N.d. Energiateollisuus Ry:n verkkosivusto. Viitattu 31.1.2017. [http://energia.fi/perustietoa\\_energia-alasta/energiantuotanto/kaukojaahdytys](http://energia.fi/perustietoa_energia-alasta/energiantuotanto/kaukojaahdytys)

Kaukojäähdytysverkosto. N.d. Kuva Tampereen Sähkölaitoksen verkkosivustolla. Viitattu 13.3.2017. <https://www.tampereensahkolaitos.fi/kaukolampojaahdytysjamaa-kaasu/kaukojaahdytys/Kaukoj%c3%a4%c3%a4hdytysverkosto/Sivut/default.aspx>

Kaupinojan vedenpuhdistuslaitos. N.d. Tampereen Veden verkkosivut. Viitattu 31.1.2017. <http://www.tampere.fi/vesi/toiminta/hankkeet/kaupinojanvedenpuhdistuslaitos.html#teknisiatietoja>

Kirjavainen, M.2013. Lämmönsiirtimen huolto on asiantuntijatyötä. Promaint- verkolehden artikkeli. Julkaistu 11.12.2013. Viitattu 17.3.2017. <http://promaint-lehti.fi/Laite-ja-korjaustekniikat/Lammonsiirtimen-huolto-on-asiantuntijatyota>

KJ-tilasto 2011 - 2015. N.d. Energiateollisuus Ry:n tilastot vuosilta 2011- 2015. Viitattu 11.5.2017. <http://188.117.57.25/tilastot-ja-julkaisut/kaukolampotilastot/kaukojaahdytys>

KJ-tilasto 2016. 2017. Energiateollisuus Ry:n tilasto vuodelta 2016. Julkaistu 4.5.2017. Viitattu 11.5.2017. [http://energia.fi/ajankohtaista\\_ ja\\_ materiaalipankki/materiaalipankki/kaukojaahdytysstilasto.html#material-view](http://energia.fi/ajankohtaista_ ja_ materiaalipankki/materiaalipankki/kaukojaahdytysstilasto.html#material-view)

Korhonen, J. 2002. Suomen vesistöjen lämpötilaolot 1900-luvulla. Helsinki: Suomen ympäristökeskus.

Koskelainen, L., Saarela, R. & Sipilä, K. 2006. Kaukolämmön käsikirja. Helsinki: Energiateollisuus.

Lehtinen, M., Nurmi, P. & Rämö, T. 1998. Suomen kallioperä: 3000 vuosimiljoonaa. Helsinki: Suomen Geologinen Seura ry.

Lu. M. 20.11.2010. Rock engineering problems related to underground hydrocarbon storage. Trondheim, Norway: SINTEF Rock Engineering

Lämpötila- ja sadetilastoja vuodesta 1961. N.d. Ilmatieteenlaitoksen verkkosivusto, asetukset Tampere ja Vuosi. Viitattu 11.10.2016. <http://ilmatieteenlaitos.fi/tilastoja-vuodesta-1961>

Maaöljy. N.d. Wikipedian suomenkielinen artikkeli raakaöljystä. Viitattu 28.3.2017. <https://fi.wikipedia.org/wiki/Maaöljy>

Metso DNA. Tampereen Sähkölaitoksen automaatiojärjestelmä. Viitattu 13.9.2016.

- Mildenstein, P. & Skagestad. B. 2002. District Heating and Cooling Connection Handbook. International Energy Agency. Viitattu 4.3.2017 <http://www.districtenergy.org/assets/CDEA/Best-Practice/IEA-District-Heating-and-Cooling-Connection-Handbook.pdf>
- Nord Pool Spot –sähköpörssin kuukausikeskiarvot. 2016. Liitekuvio 9 Tilastokeskuksen verkkosivustolla. Päivitetty 7.9.2016. Viitattu 11.10.2016. [http://www.stat.fi/til/ehi/2016/02/ehi\\_2016\\_02\\_2016-09-07\\_kuv\\_006\\_fi.html](http://www.stat.fi/til/ehi/2016/02/ehi_2016_02_2016-09-07_kuv_006_fi.html)
- Oil Storage In Rock Caverns. N.d. Skanska & Sentab. Dokumenttivideo kalliosäiliöiden louhinnasta 1950 - 60-luvuilla. Viitattu 5.4.2017. <https://www.youtube.com/watch?v=vqXINeRIG4k>
- Overview of Alfa Laval AQ range.2016. Alfa Lavalin pdf-esite AQ-sarjan lämmönvaihtimista. Julkaistu 25.10.2016. Viitattu 9.5.2017. <http://www.alfalaval.com/products/heat-transfer/plate-heat-exchangers/gasketed-plate-and-frame-heat-exchangers/alfaqa/>
- Patrikainen, P. 1983. Suomen kivilajien merkittävimmät materiaaliominaisuudet ydinjätteen loppusijoituksen kannalta. Espoo: Geologinen tutkimuslaitos.
- Petroleum. N.d. Wikipedian englanninkielinen artikkeli raakaöljystä. Viitattu 28.3.2017. <https://en.wikipedia.org/wiki/Petroleum>
- Pienaar, W.J. 2010. Logistics aspects of petroleum pipeline operations. Stellenbosch University. South Africa. Viitattu 29.3.2017 <https://www.jtscm.co.za/index.php/jtscm/article/viewFile/69/65>
- Pöyry Oy.2014. Kotkan kaupunki- Uusiutuvan energian kuntakatselmus –projekti. Julkaistu 10.12.2014. Viitattu 6.4.2017. [https://www.kotka.fi/instancedata/prime\\_product\\_julkaisu/kotka/embeds/kotkawwwstructure/24039\\_KatariinanAkkuJulkinen.pdf](https://www.kotka.fi/instancedata/prime_product_julkaisu/kotka/embeds/kotkawwwstructure/24039_KatariinanAkkuJulkinen.pdf)
- Rugel, G.2009. District Cooling with Ice Storage in Hot Climates. EVAPCO. PDF-diaesitys 13.10.2009. Viitattu 28.3.2017. [http://www.districtenergy.org/assets/pdfs/09Cooling\\_Dubai/1A2RUGELDistrictCoolingwithIceStorageinHotClimates.pdf](http://www.districtenergy.org/assets/pdfs/09Cooling_Dubai/1A2RUGELDistrictCoolingwithIceStorageinHotClimates.pdf)
- Russell, D. 2014. Calculating Piping Losses and Their Effect on Pumping. Modern Pumping Today- lehden verkkoartikkeli 06/2014. Viitattu 13.3.2017. <http://www.modernpumpingtoday.com/calculating-piping-losses-effect-pumping/>
- Seawater Air Conditioning (SWAC) 101. N.d. OTE Corporation- yhtiön verkkosivusto. Viitattu 13.3.2017. <http://otecorporation.com/technology/swac-101-how-does-it-work/>
- Sioros, D. 2002. Integrated Solutions for Energy & Facility Management. Lilburn, GA: The Fairmont Press, Inc.

Sipilä, K. 1989. Oulun kalliolämpövarasto. Osa 1. Lämpövaraston käyttö ja hankkeen kannattavuus. Espoo: Valtion teknillinen tutkimuskeskus.

Sirola, V. 2016. Energiateollisuus Ry:n tilasto kaukolämpöverkkojen rakennuskustannuksista. Julkaistu 20.10.2016. Viitattu 9.5.2017.

[http://energia.fi/ajankohtaista\\_ja\\_materiaalipankki/materiaalipankki/kaukolampojohtojen\\_rakentamiskustannukset.html#material-view](http://energia.fi/ajankohtaista_ja_materiaalipankki/materiaalipankki/kaukolampojohtojen_rakentamiskustannukset.html#material-view)

Speight, J.G. 2014. The Chemistry and Technology of Petroleum. 5. edition. Florida: CRC Press Taylor & Francis Group

Tammervoima Oy perustettiin. 11.11.2011. Tiedote Tammervoima Oy:n verkkosivustolla. Viitattu 31.1.2017.

<http://www.tammervoima.fi/news/19/67/Tammervoima-Oy-perustettiin.html>

Tampereelle keskitetty kaukojäähdytys. 2015. Oilon Scancool Oy:n verkkosivusto. Julkaistu 27.8.2015. Viitattu 31.1.2017. <http://www.oilon.com/scancool/uutiset/tampereelle-keskitetty-kaukojaehdytys/>

Tampereen Sähkölaitoksen konsernirakennetta tiivistetään. 2015. Uutinen Tampereen Sähkölaitoksen verkkosivustolla. Julkaistu 18.6.2015. Viitattu 31.1.2017

<https://www.tampereensahkolaitos.fi/yritysjaymparisto/ajankohtaista/Sivut/S%3%A4hk%3%B6laitoksen-konsernirakennetta-tiivistet%3%A4%3%A4n.aspx#.V--bzfpRVhE>

Tilinpäätös 2015. Pdf-tiedosto Tampereen Sähkölaitoksen verkkosivustolla. Viitattu 11.10.2016.

<https://www.tampereensahkolaitos.fi/yritysjaymparisto/toimintamme/tunnusluvut/Documents/Tilinpaa%CC%88a%CC%88to%CC%88s%202015%20tiivistelma.pdf>

Turunen, M. N.d. Suomen kallioperä. Verkkoartikkeli Geologia.fi -sivustolla. Viitattu 6.4.2017. <http://www.geologia.fi/index.php/2011-12-21-12-30-30/2011-12-21-12-39-11/2011-12-21-12-39-38/suomen-kallioperae>

Vahinkojätteen keräämisen organisointi rannoilla ja puhdistusmenetelmät 2011. SÖKÖ II -manuaali. Kotka: Kymenlaakson ammattikorkeakoulun julkaisuja

Vuosiraportti 2015. Pdf-tiedosto Tampereen Sähkölaitoksen verkkosivustolla. Viitattu 31.1.2017.

<https://www.tampereensahkolaitos.fi/yritysjaymparisto/toimintamme/tunnusluvut/Documents/Vuosikertomus%202015.pdf>

Vuosiraportti 2016. Pdf-tiedosto Tampereen Sähkölaitoksen verkkosivustolla. Viitattu 3.5.2017.

<https://www.tampereensahkolaitos.fi/yritysjaymparisto/toimintamme/tunnusluvut/Documents/Vuosikertomus%202016.pdf>

Äikäs, K. 1999. Romuvaaran kallioperän luokittelu loppusijoitustilojen rakennettavuuden kannalta. Työraportti 99-59. Helsinki: Posiva Oy.

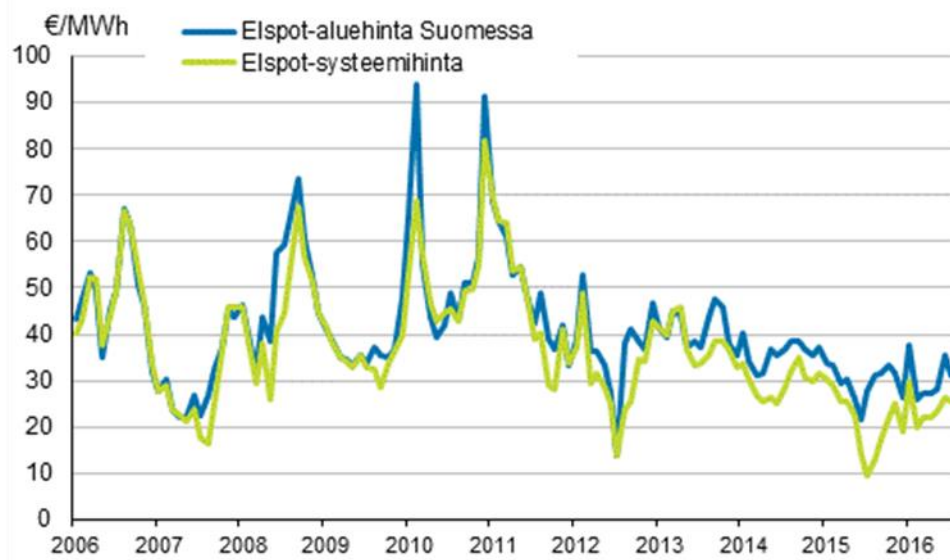
Öljyn käyttäytyminen maaperässä.2013. Suomen ympäristökeskuksen artikkeli öljyvahingoista. Julkaistu 16.8.2013. Viitattu 6.4.2017. [http://www.ymparisto.fi/fi-FI/Vesi/Oljy\\_ja\\_kemikaalivahinkojen\\_torjunta/Oljyvahinkojen\\_torjunta\\_maaalueilla/Oljyn\\_kayttaytyminen\\_maaperassa](http://www.ymparisto.fi/fi-FI/Vesi/Oljy_ja_kemikaalivahinkojen_torjunta/Oljyvahinkojen_torjunta_maaalueilla/Oljyn_kayttaytyminen_maaperassa)

## Liitteet

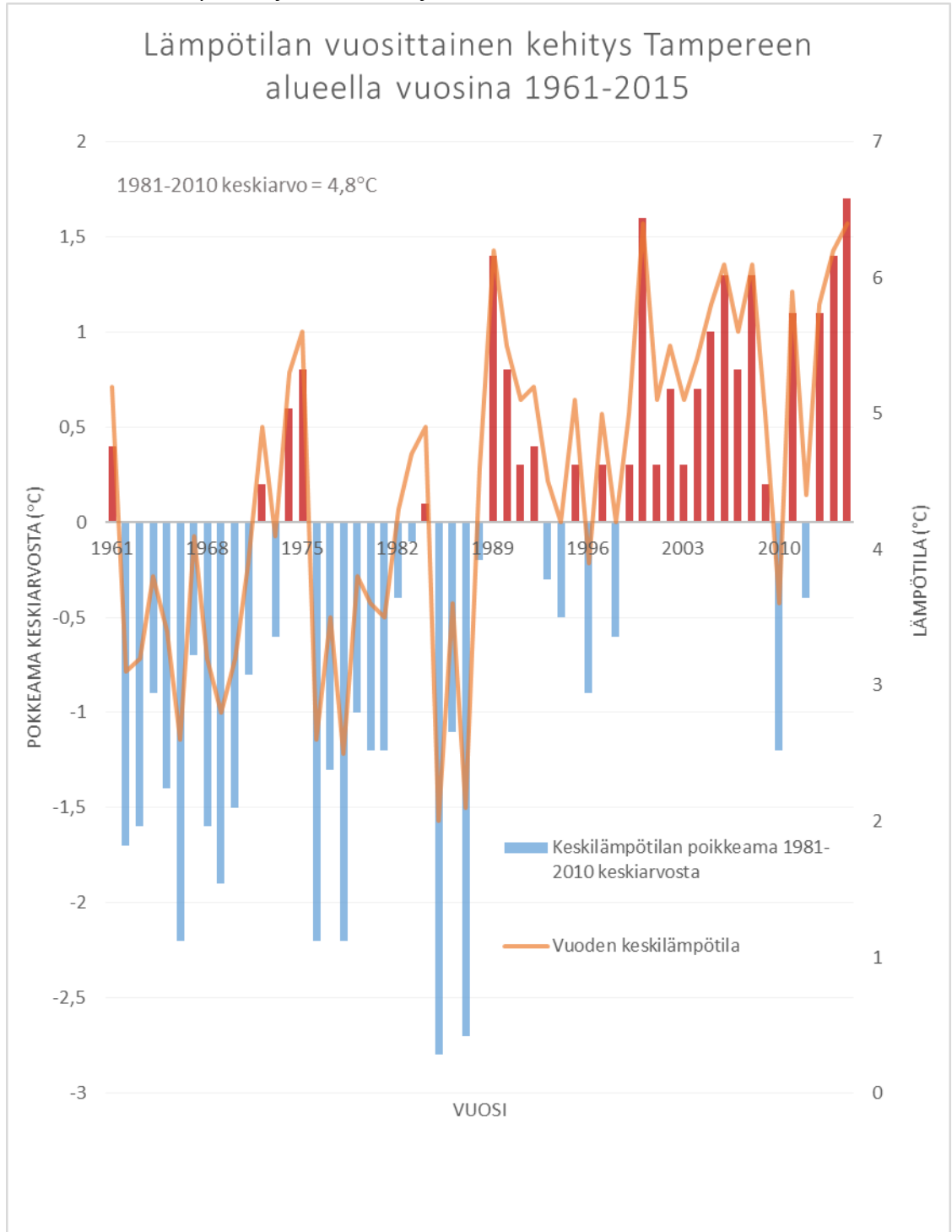
Liite 1.      Konsernin talousluvut (Tilinpäätös 2015. n.d.)

<b>Konserni</b>		<b>2015</b>	<b>2014</b>	<b>2013</b>
Liikevaihto	(1000 euroa)	270 878	289 366	307 480
Liiketulos	(1000 euroa)	20 663	13 759	18 770
Liiketulos	%	7,6	4,8	6,1
Pääoman tuotto	%	10,0	4,2	3,1
Omavaraisuusaste	%	19,1	17,2	16,2

Liite 2. Nord Pool Spot -sähköpörssin kuukausikeskiarvot (Nord Pool Spot -sähköpörssin kuukausikeskiarvot. 2016)



Liite 3. Lämpötila- ja sadetilastoja vuodesta 1961. n.d





## Liite 4. LLT

**Kaasuturbiini MS6001-B (PG6461)**

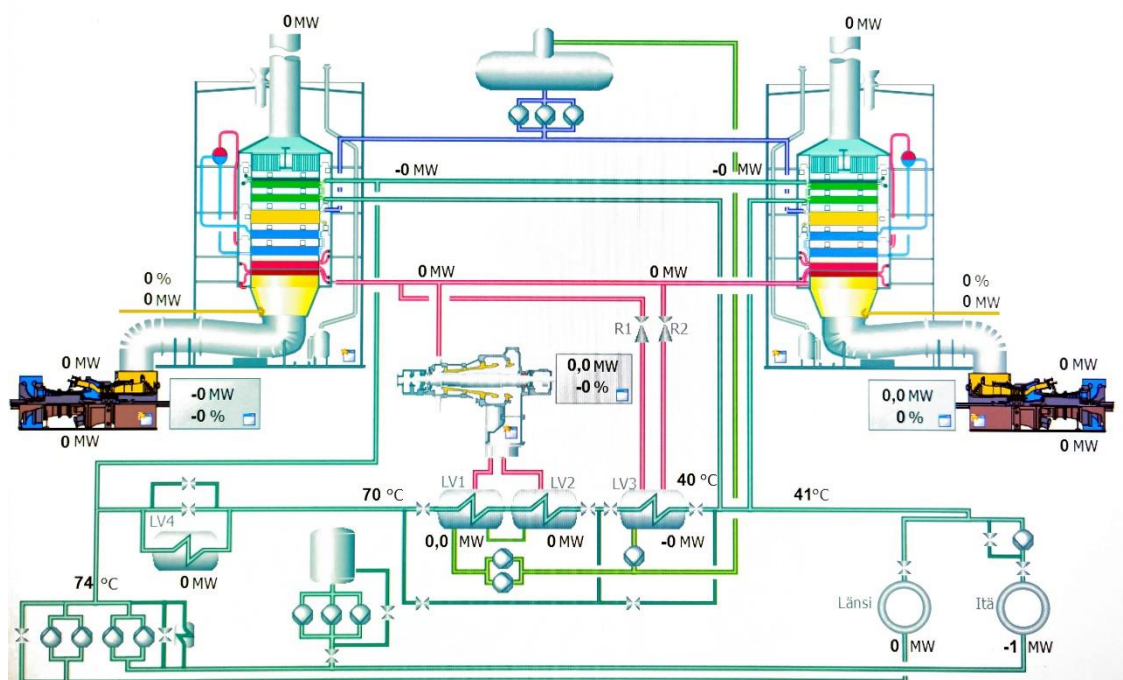
Pääpolttoaine	maakaasu
Varapolttoaine	öljy
Teho	40450 kW
hyötysuhde	0,335
Savukaasun lämpötila	548 °C
Lämpövirta/sähköenergia	10740 kJ/kWh
Polttoaineteho	120675,83 kW

**LTO-kattila**

Lisäpoltto	30 - 45 MW
Pakokaasuteho	40 MW
Lämpöteho	70 - 85 MW

**Polttoaineteho**

GT1	120 MW
GT2	120 MW
K1 Lisäpoltto	30 - 40 MW
K2 Lisäpoltto	30 - 40 MW
Kokonais PA-teho	300 - 320 MW
Maakaasun lämpöarvo	50 MJ/kg
Maakaasun massavirta	6 kg/s
Maakaasun tiheys	0,72 kg/m <sup>3</sup>
Maakaasun tilavuusvirta	8,33 m <sup>3</sup> /s



## Liite 5. NSL1

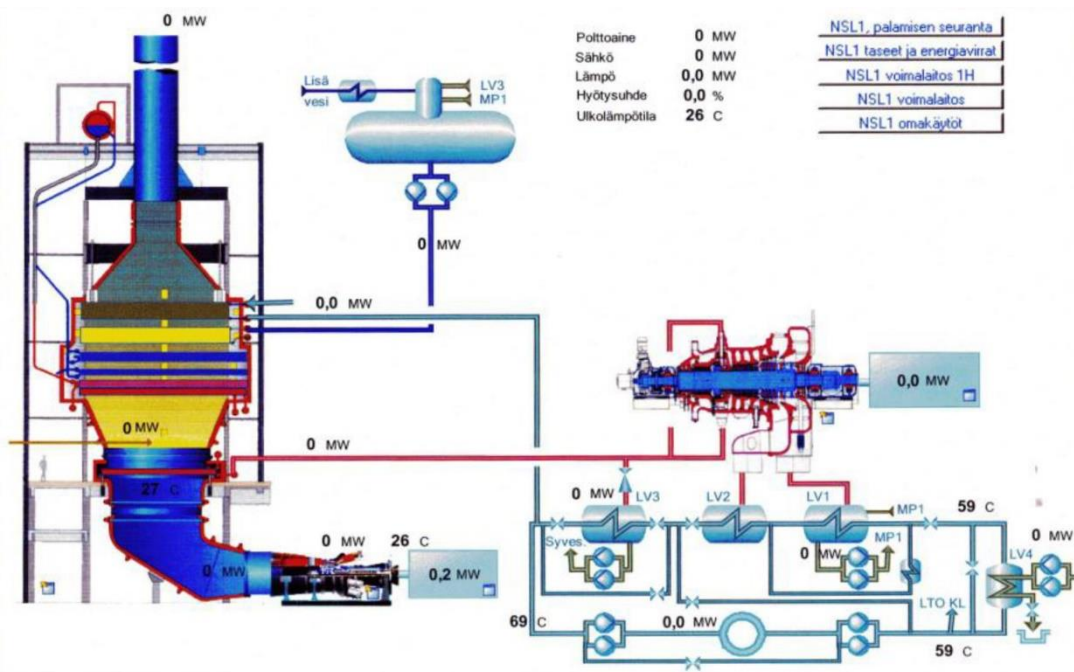
**Kaasuturbiini MS6001FA (PG 6101 FA)**

Pääpolttoaine	maakaasu
Varapolttoaine	öljy
Teho	70140 kW
Hyötysuhde	0,342
Savukaasun lämpötila	588 °C
Savukaasun massavirta	205 kg/h
Polttokammion lämpötila	1200 - 1300 °C

**LTO-kattila**

Lisäpoltto	80 MW
Höyryn massavirta	60 kg/s
Höyryn teho	175 MW
Höyryn paine	45 - 85 bar
Höyryn lämpötila	525 °C
Savukaasun poistolämpötila	55 - 65 °C

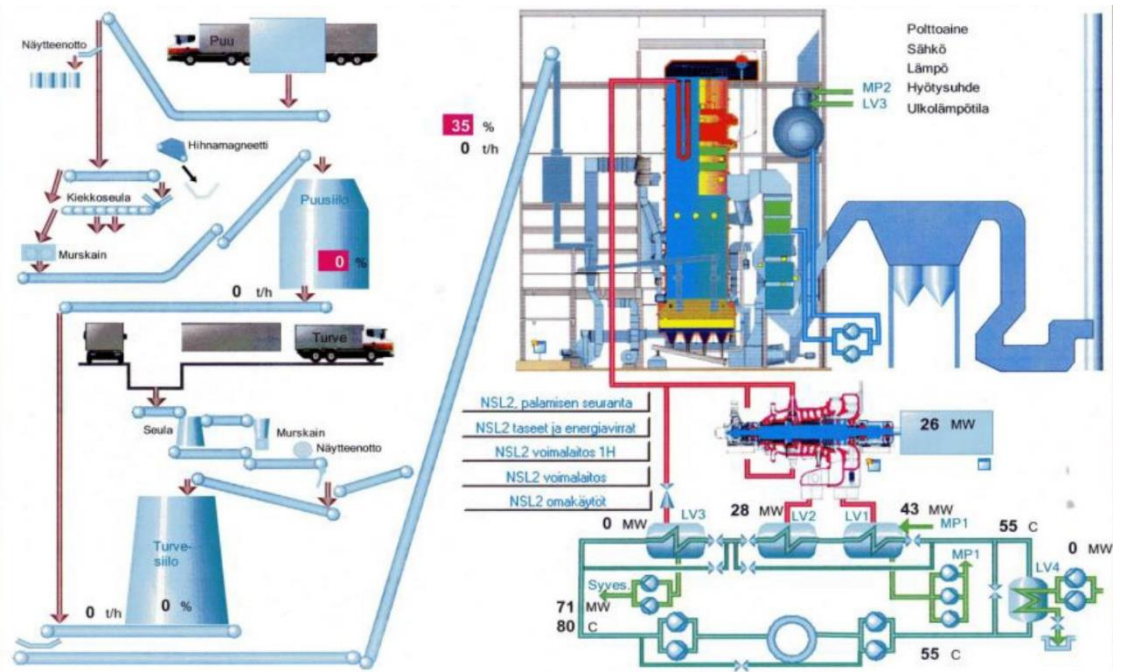
Sähköteho	129 MW
Lämpöteho	144 MW
Hyötysuhde	0,9



## Liite 6. NSL2

**Kattila Kvaerner Pulping - Power Division Bubling fluidized bed boiler conversion**

Pääpolttoaine	puu
Pääpolttoaine	turve
Käynnistyspolttoaine	maakaasu
Höyryn massavirta (puu+turve+kaasu)	83 kg/s
Höyryn massavirta (puu+turve)	75 kg/s
Höyryn paine	113 bar
Höyryn lämpötila	535 °C
Höyryteho	180 MW
Kattilan lämpötila	650 - 900 °C
Puun osuus	0,54
Sähköteho	60 MW
Lämpöteho	120 MW



## Liite 7. TAVO

**Arinakattila Steinmüller Babcock Environment GmbH**

Polttoaineteho	66 MW
Sähköteho	12 MW
Lämpöteho	40 MW
Käyttöaika	8000 h
Hyötysuhde	0,85
Omakäyttö	100 - 150 kWh/tonnia poltettua jätettä
Jätteen massavirta	150000 tonnia/vuosi
Jätteen tilavuusvirta	80 - 90 autoa/vrk
Jätteen massavirta	20 tonnia/h
Jätteen tuottajat	600000 hlö
Kaukolämpö	310 GWh/vuosi
Sähkö	90 GWh/vuosi
Bunkkerin tilavuus	9000 m <sup>3</sup>
Savukaasun loppulämpötila	850 °C

**Jätteen ominaisuuksia**

Aine	Lämpöarvot	Kosteus
Muovi	20 - 40 MJ/kg	
Sanomalehti paperi	18,5 MJ/kg	
VTT Energia, REF III	14,6 MJ/kg	28,5 %
VTT Prosessit, palava aines, vaihteluväli	13 - 16 MJ/kg	25 - 35 %
Jyväskylä, palava aines	15,24 MJ/kg	31,5 %
Etelä-Karjala lajittelututkimus	15 -17 MJ/kg	



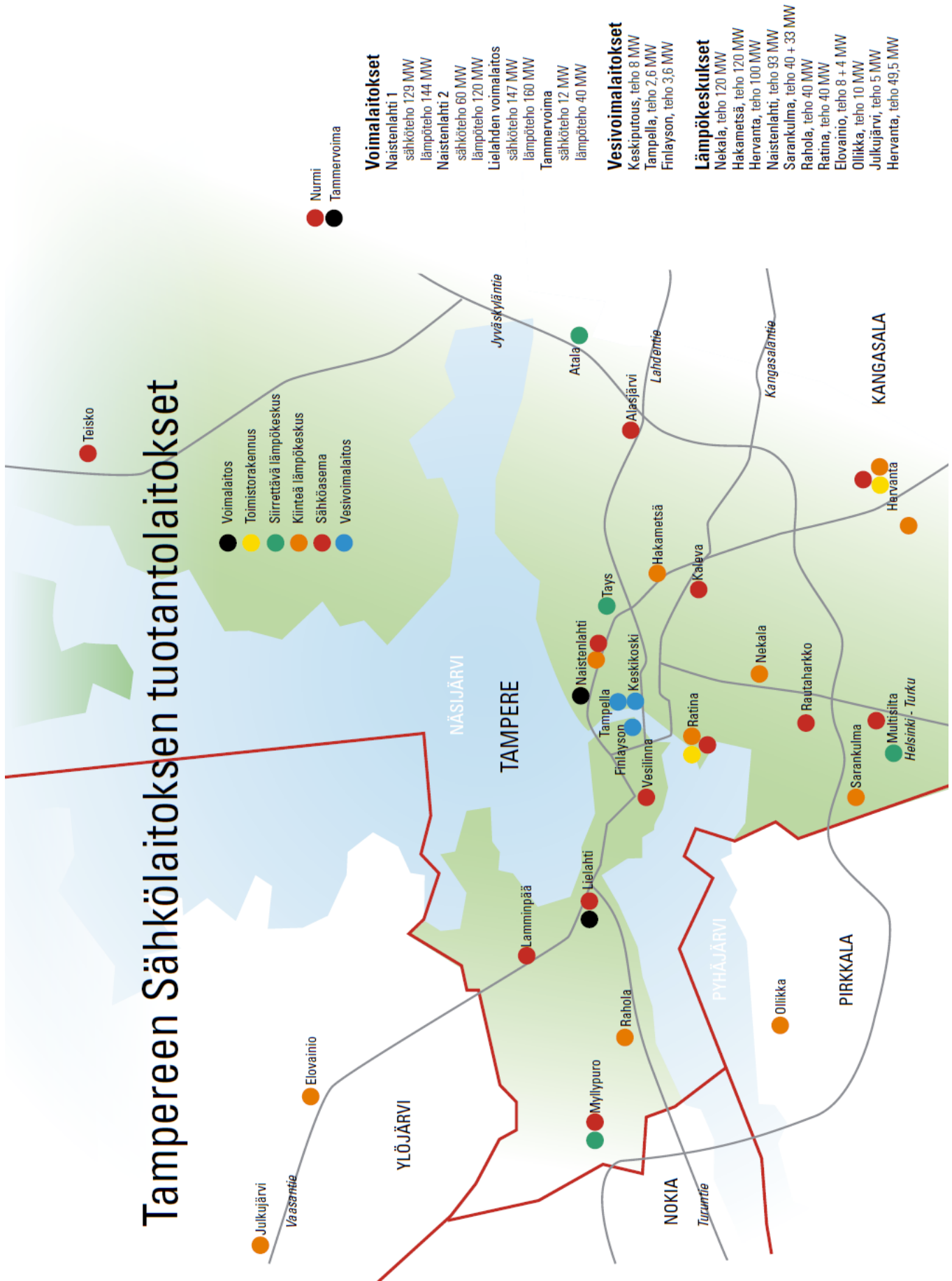
1. Vastaanottohalli  
2. Jätebunkkeri

3. Kahmarinosturit  
4. Arinakattila

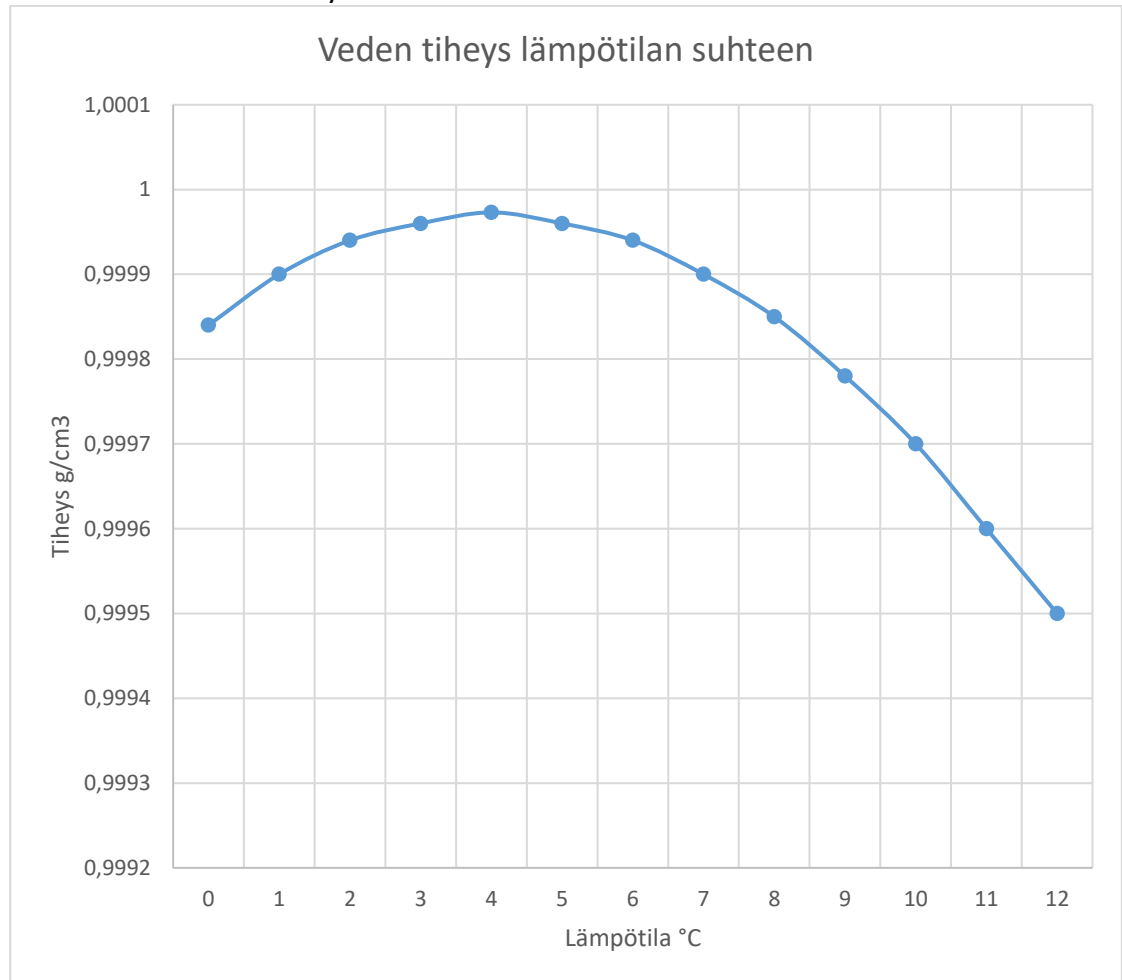
5. Höryturbiini  
6. Kuonabunkkeri

7. Savukaasunpuhdistus

Liite 8. Tampereen Sähkölaitoksen tuotantolaitokset (Vuosiraportti 2015.n.d.)



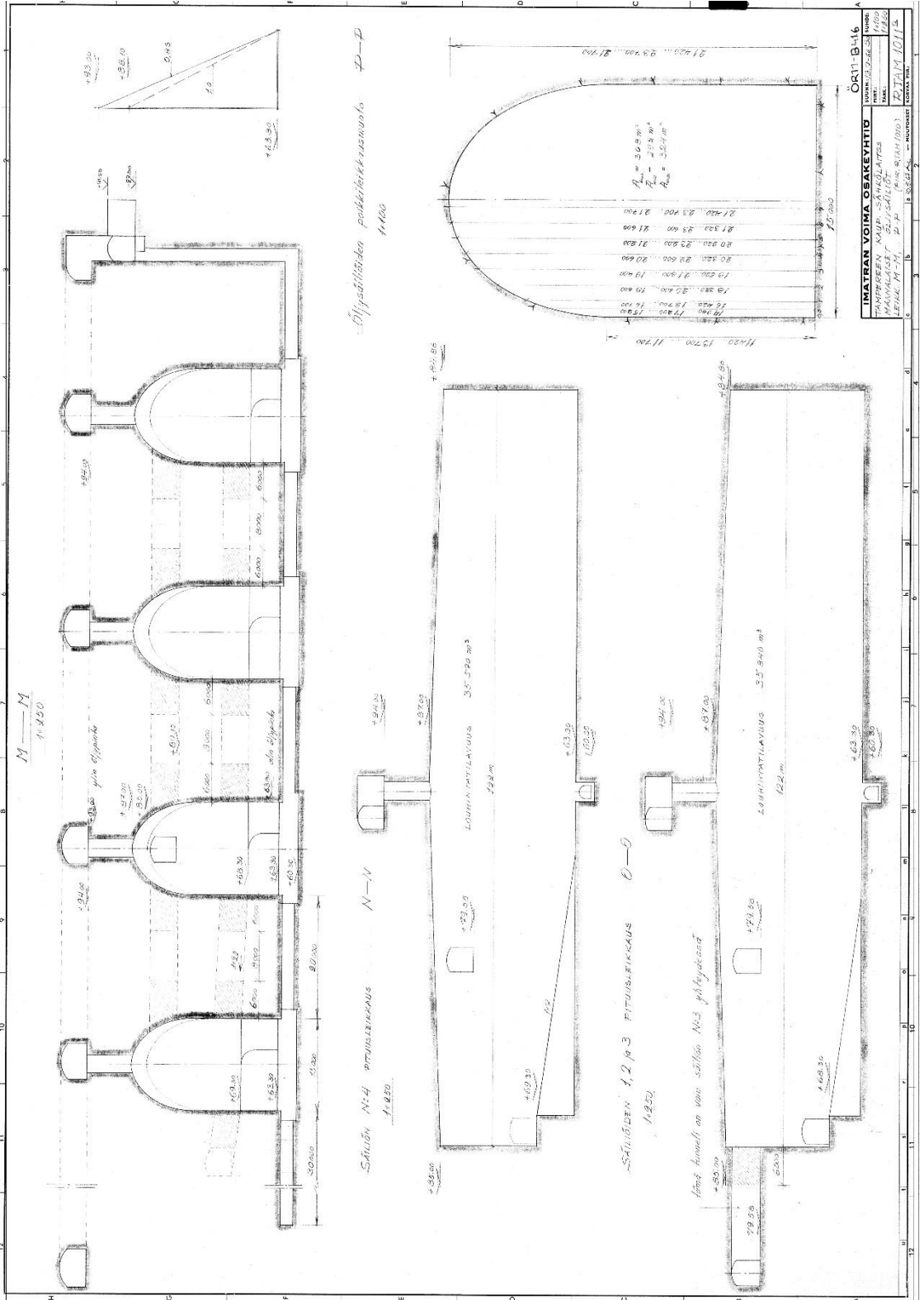
## Liite 9. Veden tiheys



## Liite 10. Järviveden imulämpötila



Liite 11. Kalliovaraston havainnekuva

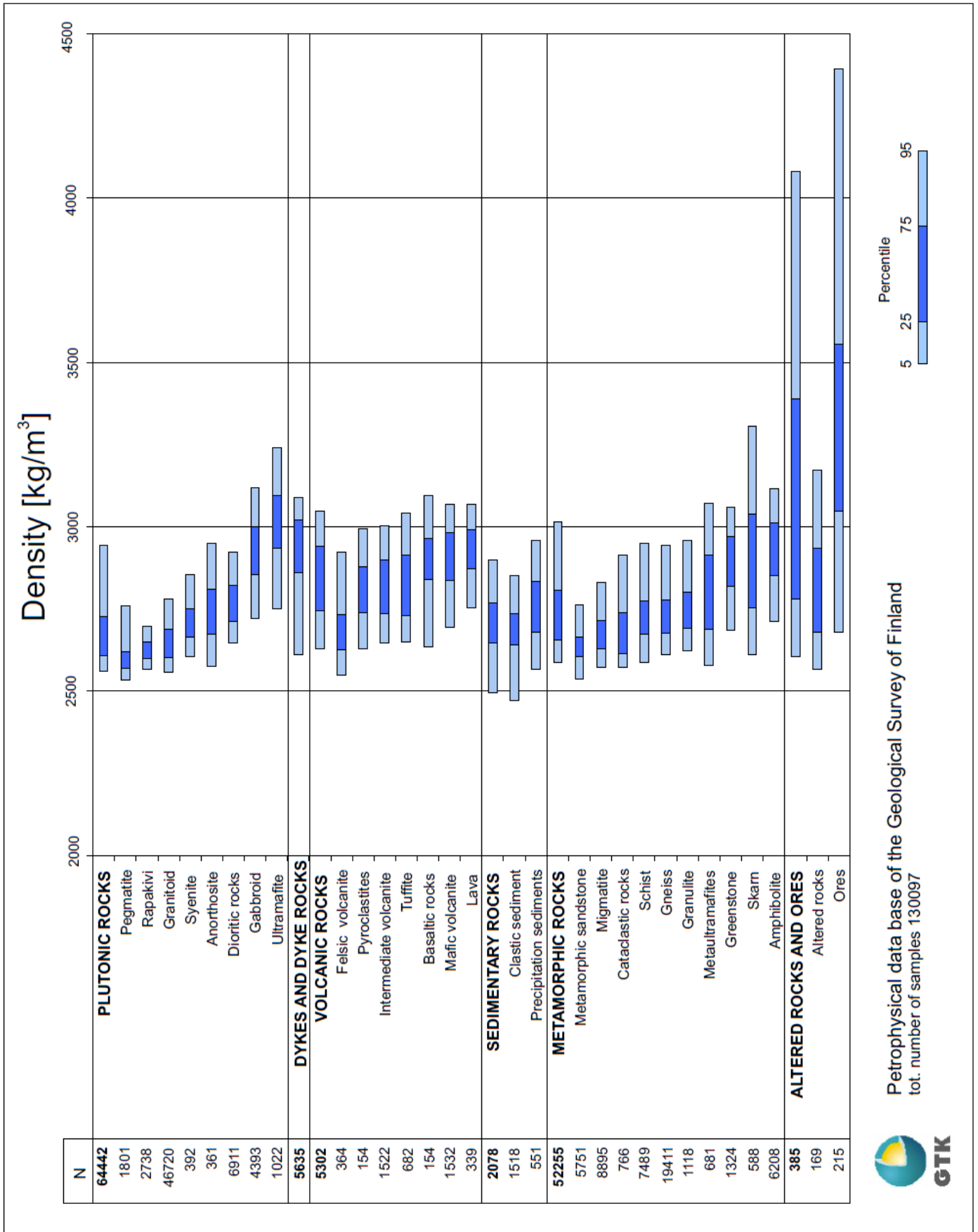




Liite 12. Kallioperä (Maankamara –GTK:n karttapalvelu)



Liite 13. Kivilajien tiheydet



Liite 14. Kallioperän lämpötila syvyyden funktiona paikkakunnittain

