

VAASAN YLIOPISTO

TEKNILLINEN TIEDEKUNTA

ENERGIATEKNIikka

Tapio Syrjälä

**GEOENERGIALÄHTEEN TERMISTEN OMINAISUUKSIEN MITTAAMI-
SEEN SOVELTUVAN LAITTEISTON SUUNNITTELU JA TOTEUTUS**

Diplomityö, joka on jätetty tarkastettavaksi diplomi-insinöörin tutkintoa varten

Vaasassa 24.9.2013

Työn valvoja

Erkki Hiltunen

Työn ohjaaja

Jukka Kiijärvi

ALKULAUSE

Diplomityö on tehty Vaasan Yliopistolle osana geoenergian tutkimushanketta. Työn tarkoituksena oli sekä suunnitella että toteuttaa mittauslaitteisto, joka soveltuu laajalaisesti erityyppisten geoenergiälähteiden ominaisuuksien selvittämiseen. Suunnittelutyö on aloitettu vuoden 2012 kesäkuussa. Suunnittelutyön ohella mittauslaitteisto on toteutettu yhteistyössä eri laitetoimittajien kanssa.

Suunnittelutehtävä kattoi kokonaisuudessaan useisiin eri tieteenaloihin liittyvien ratkaisujen yhteensovittamista. Erityisesti tieto- ja mittausteknisiin ongelmiin liittyen apua olen saanut Juha Miettiseltä ja Petri Välisuolta. Merkittävää apua laitteiston suunnittelussa olen saanut myös Geologisen tutkimuskeskuksen Asmo Huuskolta. Aikaisempi kone- ja tietotekniikan insinöörikoulutukseni helpotti muilta osin tavoitteen saavuttamista.

Kiitän työn ohjauksesta tutkimusjohtaja Erkki Hiltusta ja TkT Jukka Kiijärveä, sekä muita tutkimusryhmän jäseniä hyvästä yhteistyöstä. Haluan osoittaa kiitokseni myös vaimolleni Annelle, joka omalta osaltaan myötävaikutti diplomityön toteutumiseen.

Laihiolla 23.9.2013

Tapio Syrjälä

SISÄLLYSLUETTELO

ALKULAUSE	2
SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO	4
TIIVISTELMÄ	5
ABSTRACT	6
1. JOHDANTO	7
2. TEORIA JA TAUSTATIEDOT	10
2.1. Lämpökaivojen toteutusvaihtoehtoja	10
2.2. Termisen vastetestin toteuttamistapoja	12
2.3. Valokuidun käyttö lämpötilojen mittauksessa	13
2.4. Paikallinen tai liikuteltava mittauslaitteisto	14
2.5. Mittaustietojen kerääminen antureilta	14
2.6. Tiedonsiirto mittausyksiköstä työasemaan	17
3. JÄRJESTELMÄN SUUNNITTELU JA TOTEUTUS	18
3.1. Suunnittelun lähtökohdat	18
3.2. Virtaustekniset laskelmat ja laitevalinnat	19
3.3. Kiertovesipumpun valinta	24
3.4. Lämminvesivaraajan ja sähkövastusten valinta	27
3.5. Paisunta-astian mitoitus	29
3.6. Mittaustietojen kerääminen	32
3.7. Langaton tiedonsiirto	36
3.8. Sähköjärjestelmän suunnittelu	42
3.9. Laitteiston tilantarpeeseen ja sijoitteluun liittyvät näkökohdat	45
3.10. Mittausjärjestelmän mekaanisten osien suunnittelu	47
3.11. Kiinnitysten laskenta ja mitoitus	48
3.12. Mittausvaunun katsastaminen	51
3.13. Laitteiston testaus ja koekäyttö	51
4. TOTEUTUKSEN ANALYSOINTI	56
4.1. Laitteiston yleisen käytettävyyden arviointi	56
4.2. Mittaustulokset	57
4.3. Mittaustietojen siirto työasemaan käsiteltäväksi	57
4.4. Mittaustietojen tarkastelu	58
5. JOHTOPÄÄTÖKSET	64
5.1. Mittausjärjestelmän hyviä ja huonoja puolia	64
5.2. Kehittämistarpeet	65
5.3. Yleisarvio työn onnistumisesta	66
6. YHTEENVETO	67

SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

COP	Lämpöpumpun tehokerroin
RS 485	Mittausantureiden ja mittauslähettimen välisen yhteyden sarjaliikenneväylä
USB	Mittauslähettimen ja mittautietokoneen välisen yhteyden sarjaliikenneväylä
D_s	Lämmönsiirtoputken laskennallinen sisähalkaisija
D_u	Lämmönsiirtoputken laskennallinen ulkohalkaisija
F	Putkivirtauksen kitkakerroin
L	Putken kokonaispituus
PE	Polyeteeni
Re	Reynoldsin luku
S	Lämmönsiirtoputken seinämänpaksuus
ε	Putken pinnan karheus
h_f	Painehäviötä vastaava nostokorkeus
m_e	Lämmönsiirtonesteen etanolimäärän massaosuus
m_w	Lämmönsiirtonesteen vesimäärän massaosuus
ρ_w	Veden tiheys
ρ_e	Etanolin tiheys
ζ	Putken osan kertavastuskerroin
μ_e	Etanolin viskositeetti
μ_w	Veden viskositeetti

VAASAN YLIOPISTO**Teknillinen tiedekunta****Tekijä:**

Tapio Syrjälä

Diplomityön nimi:

Geoenergialähteen termisten ominaisuuksien mittaamiseen soveltuvan laitteiston suunnittelu ja toteutus

Valvojan nimi:

Erkki Hiltunen

Ohjaajan nimi:

Jukka Kiijärvi

Tutkinto:

Diplomi-insinööri

Koulutusohjelma:

Sähkö- ja energiatekniikan koulutusohjelma

Suunta:

Energiatekniikka

Opintojen aloitusvuosi:

2009

Diplomityön valmistumisvuosi:

2013

Sivumäärä: 76

TIIVISTELMÄ

Vaasan Yliopiston alueelle ollaan toteuttamassa geoenergian tutkimuskeskusta. Tutkimuksia varten tarvitaan mittauslaitteisto, jonka avulla on mahdollista mitata lähteen lämmöntuotto- ja varastointikykyä. Geoenergialähde voi olla porakaivo, maalämpöputkisto, asfaltin alle sijoitettu keräysputkisto, vesistöön tai sedimenttiin upotettu putkisto. Lämmönsiirto-putkiston ja lämpöpumppujen kehitystyöhön liittyen tarvitaan tutkimusta erityyppisten innovaatioiden soveltuvuudesta vaihtoehtoihin geoenergiasovelluksiin.

Kalliokaivoja käytetään myös lämpövarastoina, joita ladataan lämpiminä vuodenaikoina ja hyödynnetään kylminä vuodenaikoina. Geoenergialähteitä hyödynnetään myös asuntojen tai kylmävarastojen viilennykseen. Skandinavian alueella tyypillinen geoenergialähteen lämpötilan kausivaihtelu on 0 – 10 °C välillä. Alhainen lämpötila soveltuu hyvin kesäaikana tapahtuvaan tilojen viilentämiseen.

Tutkimuksia varten tarvitaan laitteisto, jolla mitataan geoenergialähteen ominaisuuksia lämmönsiirtonesteen luovuttaman lämpöenergian perusteella. Terminen vastetesti edellyttää usean päivän mittaista keskeytymätöntä mittausjaksoa.

Toteutuksessa oli huomioitava laitteiston eristäminen, lämmön tuotto, lämmönsiirto, virtaustekniikka sekä eri turvallisuusvaatimukset ja mittaustekniikan ja tiedonsiirron tarpeet. Mittauslaitteiston soveltuvuus erityyppisiin mittauskohteisiin edellyttää laitteistolta riittävää kapasiteettia ja tapauskohtaista muunneltavuutta.

Lopputuloksena työstä on TRT-vaunu, joka voidaan hinata mittauspaikalle ja liittää sähköverkkoon tai aggregaattiin. Säädettyvyys saavutetaan porrastaen lämmitystekhot 1 kW välein 18 kW tehoalueella ja käyttämällä taajuusmuuttajaa kiertovesipumpun teholliseksi lähteenä. Mittaustekniikka toteutetaan sarjaliikenneväylään liitetyn anturein, tiedonsiirto tietokoneella ja langattomalla reitittimellä.

AVAINSANAT: Geoenergia, Terminen vastetesti, Lämpöpumppu

UNIVERSITY OF VAASA**Faculty of technology**

Author:	Tapio Syrjälä
Topic of the Thesis:	Development of the Measurement Equipment for Properties of Geothermal Energy Sources
Supervisor:	Erkki Hiltunen
Instructor:	Jukka Kijjärvi
Degree Programme:	Degree Programme in Electrical and Energy Engineering
Major of Subject:	Energy Technic Engineering
Year of Entering the University:	2009
Year of Completing the Thesis:	2013

Pages: 76

ABSTRACT

A versatile geothermal energy research center is decided to build in the University of Vaasa. There are many available energy well sources to get geothermal energy: borehole, ground, asphalt, under water or sediment. For the research and to generate new geothermal energy applications, a new infrastructure to analyze energy well properties, for the developing of heat transfer pipes and heat pumps is needed.

Geothermal energy wells are useful also for the cooling of the houses and as cold storages. In the Scandinavia the seasonal variations of the ground temperature can be between 0 – 10 °C. Because of this low temperature, ground heat is suitable for cooling of the buildings in the summertime. Therefore boreholes must be analyzed also as underground thermal energy storages, which can be loaded in the summertime and then used as a heat source in the winter.

TRT (Thermal Response Test) coach is equipment which is used for measuring heat transfer properties of the geothermal energy well. The thermal response test is based on measuring how effectively the rock (stone) transfers heat and on the other hand store the heat energy. The thermal response test takes time generally a few days.

During the implementation of the coach must be taken into account the hardware insulation, heat dissipation, heat transfer, fluid flow and security as well as the requirements of the measurement technology and data transfer. To make the measuring equipment suitable for different types of measurements, sufficient capacity and flexibility was required.

As the result of this work, is a TRT -coach, which can be towed to the measuring area and connected to the grid or to the aggregate. Adjustability is achieved by staggering the heating power of 1 kW increments on the 18 kW power range, as well as using a speed-controlled pump. Measurements are carried out by using the sensors connected to a serial communication unit. The data is sent to be analyzed by using a computer and a wireless router.

KEYWORDS: Geoenergy, thermal response test, heat pump

1. JOHDANTO

Maahan, kallioperään ja vesistöön sitoutunutta lämpöä on mahdollista hyödyntää energiantuotantoon matalaenergiatekniikalla tai tuliperäisillä alueilla sellaisenaan. Geoenergiälähteiden energiatehokkuus vaihtelee voimakkaasti riippuen alueen sijainnista maapallolla. Auringon säteily määrässä ja tuliperäisyydessä on alueellisesti suuria eroja. Myös vuodenaajat vaikuttavat voimakkaasti eri maakerrosten lämpötiloihin ja saatavissa olevaan energiamäärään. Tietyllä syvyydellä saavutetaan kuitenkin stationäärinen tila, jonka alapuolisessa kerroksessa vuodenaikojen vaihtelu ei vaikuta ympäristön lämpötilaan.

Lämpökaivoista saatava energia on pääsääntöisesti uusiutuvaa energiaa, jonka alkuperä on auringosta maan pinnalle kohdistuvassa säteilyssä. Maan pinta ottaa lämpöä vastaan suorana säteilynä ja siirtymänä ilmasta ja sadevesistä. Maan pintaan kohdistuva lämpöenergia siirtyy edelleen maa- ja kallioperään. Osa lämpöenergiasta siirtyy veden mukana konvektiona, suurin osa johtumalla. Maapallon pintakerroksista saatava energia on luonteeltaan uusiutuvaa energiaa. Syvemmältä saatava geoterminen lämpö perustuu radioaktiivisen hajoamisen tuottamaan säteilyyn ja maapallon sulaan ytimeen. Tältä osin geoterminen energia ei ole luonteeltaan uusiutuvaa. (Juvonen, 2009: 7 – 11.)

Uusiutumattoman geotermisen lämmön hyödyntäminenkin saattaa täten lisätä ilmaston lämpenemistä. Useilla muilla energiaratkaisuilla tuotettu lämpöenergia kiihdyttää ilmaston lämpenemistä kuitenkin suhteellisesti enemmän, joten ilmaston kannalta nettohyöty on tällä hetkellä kaikilla lämpökaivoihin perustuvilla ratkaisuilla ilmeinen.

Lämpökaivoista energiaa hyödynnetään lämpöpumpulla. Lämpökaivoon asennetussa putkistossa kierrätetään lämmönsiirtonestettä, josta lämpöpumpun lämmönvaihtimessa kylmäaineen höyrystymisen myötä saadaan lämpöenergiaa. Lämmönsiirtonesteenä käytetään joko pelkkää vettä tai vesietanoliliuosta. Etanolia käytetään lämmönsiirtonesteessä sekä jäätymisen, että bakteerikasvuston ehkäisemiseen.

Lämpöpumpun kylmäaineen höyrystymislämpötila on lämmönvaihtimessa alempi kuin lämpökaivossa kierrätettävän lämmönsiirtoliuoksen, jolloin lämpöä siirtyy liuoksesta

kylmäaineeseen. Kylmäaineesta lämpö siirretään varsinaiseen lämmitysjärjestelmään lämpöpumpun lauhduttimessa, jossa kylmäaine jälleen nesteytyy.

Lämpöpumpussa tapahtuu käänteinen kylmäaineprosessi jäähdyttimiin, kuten jääkaappi tai pakastin, verrattuna. Lämmönsiirto perustuu kylmäaineen faasimuutoksiin höyrystimessä ja lauhduttimessa. Kylmäaineen faasimuutokset tapahtuvat vakioämpötilassa. Lämmönsiirtonesteestä lämpöä siirtyy kylmäaineeseen, jolloin se alkaa höyrystyä. Toisessa vaiheessa kylmäaineesta lämpöä siirtyy lämmitysjärjestelmässä virtaavaan väliaineeseen. (Kaltschmitt: 2007, 387 – 393.)

Lämpöpumpusta saatavan energian suhde prosessin tarvitsemaan energiaan on tehokeroin (COP, coefficient of performance), suuruusluokassa 3 – 5 (Glassley, 2010: s.187). Arvo riippuu olennaisesti siitä, miten suuri lämpötilaero lämpöpumpun höyrystimelle tulevan lämmönsiirtonesteen ja lauhduttimesta kulutuskohteeseen lähtevän virtauksen välille muodostuu. Lämpöpumpun teholla ei ole oleellisista merkitystä tehokertoimen kannalta. Laitteiston hyötysuhde vaikuttaa tehokertoimeen jossain määrin. Lämpöpumpun käyttöenergia on tavallisesti sähköenergiaa.

Geoenergialähteen lämmönluvotuskapasiteettia ei pidä ylittää. Liian suuri negatiivinen energiavirta johtaa pitkällä aikavälillä lämmönkeruuputkien ympäristön hitaaseen jäähdytymiseen ja lopulta jäätymiseen. Haitallisen ympäristövaikutuksen lisäksi tämä aiheuttaa lämpöpumpun tehokertoimen heikkenemisen. Vuodenaikojen mukainen lämmönlähteen lämpötilan kausivaihtelu, joka on otettava mitoituksessa huomioon, on kuitenkin normaalia. Optimaalista mitoittamista varten on tehtävä mittauksia, jotta energialähteen käyttäytyminen tunnetaan riittävällä tarkkuudella.

Käytetyt mittausmenetelmät ovat suhteellisen lyhytaikainen (4 – 5 päivää kestävä) termiini vastetesti ja pitkäaikainen lämpötilajakauman seuranta DTS -laitteistolla (Mäkiranta, 2013). Mittaukset ovat suhteellisen kalliita toteuttaa, joten niitä käytetään lähinnä laajempien porakaivokenttien mitoittamiseen tai tutkimukselliseen tarkoitukseen. Yksittäisen lämpökaivon tehokkuus arvioidaankin alueellisesti tunnettujen parametrien perusteella. Suomessa porakaivoista saatava teho on keskimäärin 40 W/m, porakaivon syvyyden funktiona (Kuisma, 2013).

Termisellä vastetestillä mitataan lämpökaivon kykyä varastoida lämpöenergiaa. Testi toteutetaan pumpaamalla lämmönsiirtonestettä lämpökaivoon asennettuun putkistoon. Putkistossa virtaavasta nesteestä mitataan lähtevän ja palaavan virtauksen lämpötilat ja virtausmäärä sekä nesteen kuumentamiseen tarvittava energiamäärä. Nestettä kuumentetaan sähkövastuksilla, joiden sähköenergian kulutus mitataan. Pidettäessä lämpövirta eli nesteen kuumennusteho vakiona, putkistossa olevan nesteen ja sitä ympäröivän aineksen lämpötila nousee hitaasti. Mittausta on jatkettava useiden päivien ajan, jotta saadaan riittävästi tietoa energialähteen tarkkaa analysointia varten.

Tasaantumisvaiheen jälkeen lämpövirta lämmönsiirtonesteestä lämpökaivoon saavuttaa laskennallisen vakioarvon, ellei mittaukseen vaikuttavia poikkeamia lämpökaivon olosuhteissa tapahdu. Lämmönsiirto porakaivossa perustuu johtumiseen ja kulkeutumiseen (konvektio). Lämmön kulkeutuminen johtuu lähinnä pohjavesivirtauksista. Niillä voi olla merkittävä vaikutus porakaivon termisiin ominaisuuksiin, lämmön siirtymiseen ja lämmön varastoitumiseen.

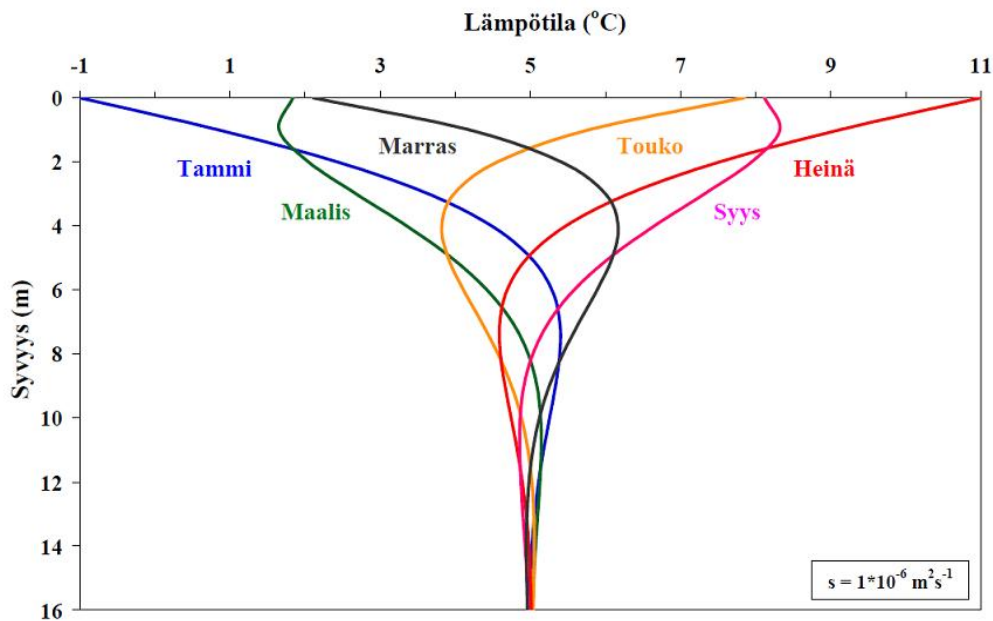
Työn tavoitteena on ollut suunnitella Vaasan Yliopiston käyttöön siirrettävä mittauslaitteisto termisten vastetestien tekemistä varten. Ensisijaisesti sitä käytetään yliopiston omiin tutkimushankkeisiin. Mittausta voidaan hyödyntää kuitenkin myös kaupallisesti. Tavoitteena on hyödyntää lämpökaivotekniikkaa lämmön- tai kylmän tuottamiseen mahdollisimman energiatehokkaasti (Banks, 2011; Yang, 2010). Kylmän tuottaminen tarkoittaa lämmön siirtoa kylmätiloista muuhun ympäristöön. Yliopistolla on olemassa useita yhteistyöhankkeita, joissa lämpökaivojen hyödyntämisellä on teollisuusyrityksille suuri taloudellinen merkitys. Mittausjärjestelmää tullaan käyttämään myös näiden lämpökaivojen kartoittamiseen, analysointiin ja seurantaan.

Suunnittelussa on huomioitava erityisesti yliopistossa toteutettava energiatekniikan hanke, jossa tutkitaan monipuolisesti vaihtoehtoisia matalaenergiaratkaisuja. Yliopiston alueelle ollaan rakentamassa kokonaisjärjestelmää, jossa on tarkoitus hyödyntää merenalaista sedimenttiä, asfalttilämpöä, maalämpöä ja vesistöenergiaa. Lämpökaivojen rakennetyyppien monipuolisuus edellyttää mittausjärjestelmältä erityisvaatimuksia ja tapauskohtaista skaalautuvuutta. Näiden tavoitteiden toteuttaminen ei ole kaupallisin ratkaisuin mahdollista tai taloudellisesti perusteltua.

2. TEORIA JA TAUSTATIEDOT

2.1. Lämpökaivojen toteutusvaihtoehtoja

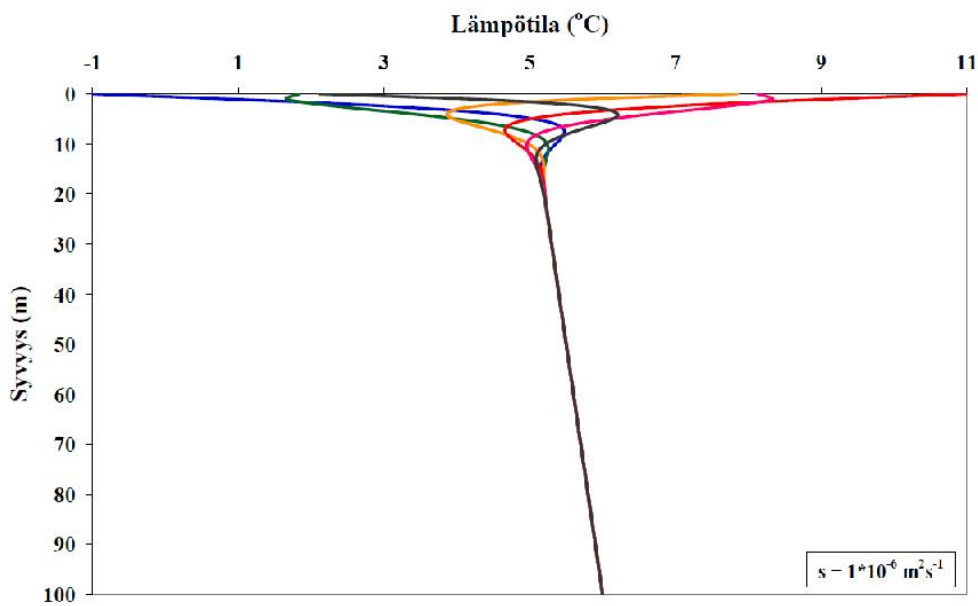
Lämpökaivot ovat maahan, kallioon, vesistöön tai vedenalaiseen pohjasedimenttiin sitoutuneen lämmön lähteitä. Maan pintakerroksissa lämpötila vaihtelee vuodenaikojen mukaan, mutta syvemmälle mentäessä vuodenajoilla ei ole käytännön merkitystä vallitsevaan lämpötilaan. Suomessa noin 5 °C vakiolämpötila saavutetaan 15 metrin syvyydessä (Kuva 1). Tämän jälkeen lämpötila kasvaa tasaisesti syvemmälle mentäessä.



Kuva 1. Maa- ja kallioperän lämpötilan vaihtelu vuodenajan ja syvyyden funktiona (Leppäharju, 2008).

Maalämpöä käytettäessä putkisto kaivetaan maahan routarajan alapuolelle. Lämpimään vuodenaikaan lämpöä varastoituu maan pintakerrokseen. Maalämmön pienimuotoisessa hyödyntämisessä energia on pääosin peräisin auringon maahan kohdistamasta säteilystä. Lämpimästä pintakerroksesta lämpö johtuu edelleen alempiin maakerrokseen. Maahan on mahdollista siirtää lämpöä myös hukkalämmön tai jäähdytysenergian talteenotolla.

Lämpökaivo toteutetaan poraamalla kallioperään syvä reikä, johon lämmönvaihtoputket pohjapainon avulla johdetaan. Reikien määrä ja/tai syvyys riippuu lämmöntarpeesta. Kallioperään syvemmälle mentäessä lämpötila kasvaa tasaisesti, jolloin syvemmältä saadaan enemmän lämpöä, toisaalta porauskustannukset kasvavat porareian syvyyden kasvaessa. Lämmitykseen tarkoitetut porakaivot ovat Suomessa noin 200 metrin syvyisiä. Lämpötila näin syvässä porakaivossa on keskimäärin 6 °C (kuva 2).



Kuva 2. Kallioperässä lämpötila nousee hitaasti mutta tasaisesti syvemmälle mentäessä. Lämpötilan nousu on 10 – 15 K / km (Leppäharju, 2008).

Vesistöön upotetuilla putkistoilla saadaan lämpöenergiaa vedestä, jonka lämpötila pohjan läheisyydessä on muutamia asteita nollan yläpuolella. Putkisto upotetaan pohjan läheisyyteen painojen avulla. Muutoin tekniikka on sama kuin maalämpöä käytettäessä.

Vedenalaiseen sedimenttiin on sitoutunut lämpöä enemmän kuin varsinaiseen vesistöön. Tutkimuksen alla on, mistä sedimentin lämpö on peräisin. Oletettavasti lämpö on ainakin osittain peräisin auringon säteilystä, joka läpäisee veden lämmittäen suoraan sedimenttiä. Sedimenttiin putkistot saadaan asennettua tienalitusten poraustekniikkaa käyttäen. Putket saadaan paikoilleen kiinnittämällä porauksen jälkeen putket kiinni poran päähän, jonka jälkeen pora putkineen vedetään reiän läpi porauksen alkukohtaan.

Lämpökaivoissa käytetään yleisesti muovisia polyeteeniputkia (PE) tai niiden johdannaisia. Tavallisten putkien lisäksi on kehitetty koaksiaaliputkia, joissa sisäputken ulkopuolella on kehänä useita muotoiltuja virtauskanavia tehostamassa lämmönsiirtoa ympäristöstä putken sisään. Koaksiaaliputkissa kylmä lämmönsiirtoneste johdetaan kanavistoon ja paluuvirta johdetaan putken päässä keskimmäiseen putkeen. Näiden lisäksi on olemassa metallisia spiraaliputkia, joiden parempi lämmönvaihtokyky perustuu johdemateriaaliin ja spiraalin avulla saatuun isompaan lämmönvaihtopintaan.

2.2. Termisen vastetestin toteuttamistapoja

Termistä vastetestiä varten on eri maissa kehitetty useita samantyyppisiä mittausjärjestelmiä, jotka perustuvat nesteen kierrätykseen lämpökaivoon sijoitetussa putkistossa. Järjestelmässä kierrätetään lämmönsiirtonestettä, jota lämmitetään siten, että lämpötilaero lähtevän ja palaavan virtauksen osalta saadaan mahdollisimman lähelle kolmea astetta. Jotta mittaus vastaisi mahdollisimman hyvin käytännön tilannetta, pyritään mittauksia tehtäessä käyttämään vastaavaa lämpötilaeroa. Suomessa maaperän lämpötila on keskimäärin kuusi astetta. Yli kolmen asteen lämpötilaero johtaa riskiin ylittää maalämpökaivon lämpökapasiteetti. Tällöin lämpökaivo alkaisi jäähtyä aiheuttaen pitkällä aikavälillä sen jäätymiseen.

Analysointia varten mitataan energian kulutus, virtausmäärä ja lämpötilat lähtevän ja palaavan virtauksen osalta. Näiden tietojen pohjalta voidaan lämpökaivon ominaisuuksista tehdä karkea analyysi ja huomioida se lopullisen lämmitys- tai jäähdytysjärjestelmän mitoituksessa.

Termisen vastetestin toteuttamiseen on olemassa esimerkkiratkaisuja, joissa testi on toteutettu kiinteällä laitteistolla, siirrettävällä kompaktilla mittauslaitteella tai isommalla laitteistolla, joka on sijoitettu autolla siirrettävään vaunuun. Kaikki edellä mainitut ratkaisut ovat olleet kunkin tutkimuksia tekevän tahon itsensä toteuttamia. Mittauksia on mahdollista teettää, osittain tai kokonaan, myös tilaustyönä. Kaupallinen mittausjärjestelmän toimittaja, Precision Geothermal LLC, valmistaa termiseen vastetestiin soveltuvaa kompaktia mittauslaitteistoa (GeoCube). Laite on tarkoitettu lähinnä porakaivomit-

tauksiin. Rajallisesta kapasiteetista johtuen sen soveltuvuus laaja-alaiseen geoenergia-tutkimukseen on riittämätön.

Terminen vastetesti on mahdollista laajentaa kaksisuuntaiseksi. Kaksisuuntaisessa vastetestissä mitataan lataus- tai varastointivaiheen aikana lämpökaivon vastaanottama energiamäärä ja käänteisesti purkuvaiheen aikana lämpökaivosta saatava energiamäärä. Kaksisuuntaisen testin mittaustulosten perusteella on mahdollista analysoida lämpökaivon luonnetta, mahdollista hävikkiä ja syytä siihen. Mittausjärjestelmään lisätään tällöin lämpöpumppu, jotta saadaan mitattua lämpökaivon energianluovutuskyky. Mittausjärjestelyt ovat muutoin samankaltaiset kuin yksisuuntaisessakin vastetestissä. (Hellström, 2011), Witte (2001).

2.3. Valokuidun käyttö lämpötilojen mittauksessa

Lämpökaivon lämpötilajakauman mittaukseen on kehitetty tehokas mittaustapa joka perustuu siihen, että valon sironta on optisessa kuidussa erilainen eri lämpötiloissa. Valokuidun lämpötilan asettuessa vallitsevaan lämpötilaan saadaan kyseisestä kohdasta ympäristön lämpötila mitattua. Mittauslaitteessa on laservalolähde, jolla lähetetään valopulseja valokuituun. Tutkimalla takaisin heijastuneen valon Raman -sirontaa, voidaan sirontapoikkeaman perusteella heijastumiskohdan lämpötila selvittää. Heijastumiskohdan paikantaminen perustuu valon kulkuajan mittaamiseen kuidussa, sen vuoksi vaaditaan erittäin tarkkaa ajan mittausta. (Mäkiranta, 2013.)

Mittauslaitteisto on kalibroitava huolellisesti ennen mittausten tekemistä. Tämä toteutetaan upottamalla kuitu jäävesihauteeseen ja mittaamalla vastinlämpötilat mahdollisimman tarkkaan toisiaan vastaaviksi. Saavutettava mittaustarkkuus on normaalisti 0,01 °C 0,5 – 1 m välimatkoin, paikannustarkkuuden ollessa vastaavasti 1 – 2m. Lämpötilat saadaan koko kuidun matkalta yhden mittausjakson aikana. (Hellström, 2011: 80 – 87.)

Valokuitumittaus soveltuu parhaiten laajojen alueiden tai syvien porareikien lämpötilajakauman mittaukseen. Lisäksi valokuitumittauksella on mahdollista selvittää paikallisten pohjavesivirtauksien vaikutusta lämpökaivon toimintaan. Yhdessä termisen vaste-

testin kanssa tehtynä valokuitumittaus antaa hyvän pohjan lämpökaivon ominaisuuksien analysoimiselle.

Muita lämpökaivojen lämpötilamittauksia varten tarvittaisiin erillisiä ”mittauspäitä”, joiden paikka lämpökaivossa on mittaushetkellä tiedossa. Näitä voitaisiin käyttää soveluksissa, joissa halutaan lämpötila selvittää tiheämmin kuin mitä optista kuitua käyttäen on mahdollista.

2.4. Paikallinen tai liikuteltava mittauslaitteisto

Termisen vastetestin mittauslaitteisto olisi mahdollista rakentaa kiinteäksi osaksi lämpökaivoihin perustuvaa energiakenttää. Tällöin mittauksia voitaisiin toistaa ohjaamalla nestevirtauksia ohjausventtiilein eri osiin mitattavaa aluetta. Tämän kaltainen järjestely tulee kyseeseen lähinnä isojen geoenergiaprojektien jälkiseuranta varten.

Kun on tarve tehdä esiselvitystä jonkun yksittäisen alueen tai lämpökaivon ominaisuuksista on selkeintä käyttää siirrettävää mittausyksikköä, jolla suoritetaan mittauksia muutamien päivien ajan kullakin alueella. Siirrettävä mittausyksikkö voi koostua kompakteista pieneen tilaan mahtuvista osakokonaisuuksista tai olla integroitu mittausjärjestelmäkokonaisuus, joka sijoitetaan liikuteltavaan mittausvaunuun. Ratkaisu näiden eri vaihtoehtojen välillä on tehtävä tarvekartoituksen, käytettävyyden ja kustannuslaskelman pohjalta.

2.5. Mittaustietojen kerääminen antureilta

Mitattavia suureita ovat energian käyttö lämmönsiirtonesteen kuumentamiseen, lämmönsiirtonesteen tilavuusvirta, lähtevän ja palaavan virtauksen lämpötila, valokuidun lämpötilat ja mittauspaikan ulkolämpötila. Mittaustulokset tallennetaan mittauslaitteiden (dataloggerit) pysyväismuisteihin jatkokäsittelyä varten.

Mitta-anturit voivat olla toimintaperiaatteeltaan passiivisia tai aktiivisia. Passiiviantureihin ei sisälly mitään sisäistä toiminnallisuutta, jolloin mittausarvo muodostuu pelkästään mitattavan kohteen tuottaman fysikaalisen ilmiön vaikutuksesta. Aktiiviset anturit tuottavat mittausarvon jonkun ennalta laaditun toiminnallisuuden pohjalta yhdessä mitauskohteen vaikutuksen kanssa. Aktiivisiin antureihin liittyy usein myös erillinen käyttöjännite, joka on varsinaiselle mittauspiirin jännitteelle rinnakkainen.

Lämpötilojen mittaus perustuu usein sellaisiin passiiviantureihin joiden vastusarvo muuttuu lämpötilan funktiona. Vakiojännitelähteen tuottama virta, joka läpäisee vastuksen, mitataan ja virran arvon perusteella saadaan mitattavan kohteen lämpötila. Platinaantureilla mitattaessa virta muuttuu lämpötilan muuttuessa lineaarisesti, jolloin lämpötila on suorassa suhteessa mitattuun virtaan. Yleisimmin käytetään Pt-100 antureita. Tällöin mittauspiiri toteutetaan siten, että 4 – 20 mA standardoidut virta-arvot vastaavat 0 – 100 °C lämpötiloja. Mittauspiirin virta pidetään hyvin pienenä, ettei se aiheuta vastuksen lämpenemistä ja tästä syystä vääristä mittaustulosta.

Mittajohtimien vastukseen vaikuttaa johtimien pituus ja niiden lämpötila. Mittausjohtimien lämpötilaan vaikuttaa mittausvirta ja ympäristön lämpötila. Tarkoissa mittauksissa mittausjohtimien vastus on kompensoitava 3- tai 4-johdinkytkennällä. Näistä 4-johdinkytkentä on tarkin perustuen virrallisen vastuksen yli vaikuttavan jännitteen mittaukseen. Anturin aiheuttama jännitehäviö on anturipiiriin johdetusta vakiovirrasta johtuen riippumaton mittausjohtimien aiheuttamista jännitehäviöistä, joten näin saadaan häiriötön mittaustulos.

Analogisten passiivisten antureiden signaalit ovat yleensä joko standardoituja virtaviestejä 0 – 20 mA, 4 – 20 mA tai jänniteviestejä 0 – 10 V, 5 – 10 V tai 1 – 5V. Jännitetasot voivat olla myös negatiivisia tai positiivisia riippuen toteutuksesta. Jänniteviesteissäkin piirissä kulkeva virta on alle 20 mA. Tallentimissa on oltava kutakin anturia kohti virta- ja/tai jänniteviestin vastaanottamista varten oma mittauskanavansa.

Digitaalisissa antureissa signaali on tyypiltään jännitetason vaihteluina tulkittavia sarja- tai rinnakkaismuotoisia on/off -tiloja. Signaalit luetaan sarjamuotoisesti peräkkäisinä pulsseina tai samanhetkisinä rinnakkaisina tiloina. Digitaaliviesti on sitä tarkempi mitä

useammalla bitillä mittausarvo on esitettävissä. Digitaalista viestiä varten tallentimessa on oltava erikseen sarja- tai rinnakkaisliikenteelle soveltuvia mittauskanavia.

Mittauslähetin koostuu kokonaisuudesta, johon on integroitu fysikaaliseen ilmiöön reagoiva tuntoelin, anturiosa, mittausvahvistin ja mahdollisesti vielä erillinen lähetin. Mittauslähettimen pääasiallinen tarkoitus on muuntaa tuntoelimen tuottama viesti sellaiseksi, että tieto on mittauksentallentimeen päin käyttökelpoisessa muodossa. Yleensä osa vaihtotyypisistä antureista on kytkettävissä tallentimiin suoraan ilman mittauslähetintä.

Tallentimien ja antureiden välinen tiedonsiirto on toteuttavissa useilla eri tavoilla. Perinteisellä tavalla siten, että kukin anturi liitetään tallentimeen omilla johtimillaan tai käyttäen hyväksi muita väyläratkaisuja, joissa samaan dataväylään liitetään useita antureita ja/tai toimilaitteita. Kullakin väyläratkaisuilla on oma protokollansa, jolla laitekohtainen viestittäminen hoidetaan.

Perustallentimiin sisältyy useiden anturipiirien lähdöt ja tulot integroituna yhdeksi kokonaisuudeksi. Eri signaalityypeille, virralle, jännitteelle tai jännitetasolle on tallentimissa omat tulokanavaryhmänsä. Tallentimet lukevat tulokanavien kautta antureilta saatavat mittausarvot määrätyn väliajoin ja tallentavat mittauksentulokset ja mittausajankohdan pysyväismuistiinsa.

Langattomissa mittausjärjestelmissä anturi- tai anturiryhmäkohtaiset mittauslähettimet ovat yhteydessä tallentimeen radioteitse. Tällöin mittajohtimet jäävät lyhyiksi tai tarpeettomiksi. Mittausjohtimista aiheutuvat häiriöt jäävät näin ollen vähäisiksi.

Tallentimiin sisältyvä pysyväismuistin koko on rajattu, mutta mitoitukseltaan niin suuri, että mittauksentulosten menettämisen vaara on hyvin vähäinen. Mittauksentiedot ovat luettavissa tallentimesta ulkoiseen järjestelmään erillisiä tiedonsiirtoväyliä käyttäen.

2.6. Tiedonsiirto mittausyksiköstä työasemaan

Tallenninjärjestelmiin sisältyy useita vaihtoehtoisia väylätekniikoita tietojen siirtämiseksi muihin järjestelmiin. Mittaustulokset siirretään tiedonsiirtoväylän kautta erilliselle tietokoneelle analysointia ja seuranta varten. Tiedonsiirtoväylät voidaan toteuttaa myös langattomasti gsm-verkon yli, jolloin tiedot ovat siirrettävissä mihin tahansa työasemaan.

Paikalliseen työasemaan tiedot ovat helpoiten siirrettävissä sarjaliikenneväylää hyödyntäen ja käytännössä kaikissa mittaustallentimissa on sarjaliikenneväylä jossain muodossa. Aikaisemmin yleisen sarjaliikenneväylän RS-232 on nykyisin korvannut yksinkertaisempi USB -väylä.

Tiedonsiirtotavasta riippumatta järjestelmältä on syytä edellyttää käyttäjätunnuksiin ja salasanoihin perustuvia käyttöoikeuksia mittausyksikköön.

3. JÄRJESTELMÄN SUUNNITTELU JA TOTEUTUS

3.1. Suunnittelun lähtökohdat

Laitteiston tulee soveltua mahdollisimman yleiskäyttöisesti erityyppisten lämpökaivojen termisen vastetestin tekemiseen. Tämä vaatimus edellyttää järjestelmältä joustavuutta ja monipuolisia ominaisuuksia. Kokonaisuuden kannalta on tarkoituksenmukaista yhdistää ratkaisun piiriin lämpökaivon termisen vastetesti ja lämpötilajakauman mittaaminen.

Termistä vastetestiä varten on olemassa myös joitakin kaupallisia tuotteita. Kaupalliset tuotteet ovat pääosin suhteellisen pienikokoisia kompakteja paketteja. Näiden käyttö Vaasan Yliopiston tutkimustarkoituksiin on huono, sillä ne soveltuvat lähinnä vain tavonomaisten kallioporakaivojen perusmittauksiin.

Terminen vastetesti on toteutettavissa joko yksi- tai kaksisuuntaisena. Yksisuuntaisessa testissä mitataan pelkästään lämpökaivon tehokkuutta vastaanottaa energiaa. Kaksisuuntaisessa testissä mitataan myös lämpökaivon kykyä luovuttaa energiaa. Kaksisuuntainen testi edellyttäisi lämpöpumpun tuottaman energian poistamista järjestelmästä tai varastoimista lämpövaraajaan. Kuumavesivaraajan tulisi olla kapasiteetiltaan ja tilavuudeltaan tuhansia litroja, jotta se voisi ottaa vastaan lämpöpumpun mittausjakson aikana tuottaman energiamäärän. Käytännössä on turvauduttava puhallinjäähdyttimeen, jolla tuotettu lämpö poistetaan ulkoilmaan.

Lämpötilajakauman mittaaminen suuressa mitta- ja aikaskaalassa onnistuu parhaiten valokuidun sirontaan perustuvilla tutkimusmenetelmillä. Asfalttikerroksen lämmönsiirtotutkimuksia varten tehtävien matalien porakaivojen lämpötilajakauman mittaamiseen on tarpeen kehittää muita ratkaisuja. Valokuidun sirontaan perustuvilla menetelmillä erotuskyky, mittaustiheys syvyys suunnassa, ei ole sellaisenaan riittävä. Vaihtoehtoisia toteutustapoja ovat spiraalimuotoon kierretty valokaapeli, kiinteät johdotetut lämpötilanturit tai yksittäinen mekaanisesti liikuteltava mittapää. Liikutettavaa mittapäää käytettäessä tulee sen asema, ajankohta ja lämpötilan asettumisaika huomioida erikseen.

3.2. Virtaustekniset laskelmat ja laitevalinnat

Lämpökaivoissa käytetään yleisesti polyeteeniputkia, joiden ulkohalkaisija on 40 mm. Lämmönvaihto porakaivon ympäristöstä putkessa virtaavaan lämmönsiirtoliuokseen, tapahtuu johtumalla ja konvektiona. Polyeteeniputken lämmönjohtokyky on heikohko, joten paksu seinämä johtaa huonoon lämmönsiirtoon johtumisen osalta. Eri toteutusten välillä käytetyn putken seinämän vahvuus vaihtelee jonkin verran, mutta sen vaikutus ei ole kovin merkittävä virtausteknisessä tarkastelussa. Konvektio on tehokkainta, kun virtaus on turbulენტtista. Virtausteknisinä mitoitusperusteina ovat näin ollen putken sisähalkaisija ja virtauksen turbulენტtisuus.

Laminaarisen ja turbulენტtisen putkivirtauksen raja on osin häilyvä. Putkivirtaus on varmasti turbulენტtista, kun Reynoldsin luku on 10000 (Cengel, 2003). Tätä on järkevää käyttää mitoitusperusteena virtausmäärää laskettaessa, kun alarajana pidetään lukua 3000. Putkivirtauksen mitoituksessa on tämän lisäksi huomioitava liuoksen viskositeetti ja tiheys. Näiden perusteella lasketaan vaadittava virtausnopeus ja sen perusteella edelleen virtauksen määrä putkistossa. Kun virtausmäärä ja siitä riippuvat kokonaisvastukset tunnetaan, valitaan pumppukäyrän perusteella mittausjärjestelmään virtausteknisesti parhaiten soveltuva pumppu.

Vesietanoliliuoksen virtausmäärä ja -nopeus lämmönsiirtoputkistossa:

Reynoldsin luvun, viskositeetin, nesteen tiheyden, virtausnopeuden ja putken sisähalkaisijan välinen riippuvuus on esitetty yhtälöissä (1):

$$\text{Re} = \frac{D v \rho}{\mu} \quad (1)$$

Virtausnopeus saadaan laskettua yhtälön (2) mukaisesti:

$$v = \frac{\mu \text{Re}}{\rho D} \quad (2)$$

Vesietanoliseoksen tilavuus on pienempi kuin seosaineiden yhteenlaskettu tilavuus. Liuoksessa muodostuu etanoli- ja vesimolekyylien välille vetysidoksia, joiden seurauksena molekyylit asettuvat pienempään tilaan kuin erillään ollessaan. Massasuhteiden perusteella laskettuna tiheys olisi 940 kg/m^3 , liuoksen todellisen tiheyden ollessa $\rho = 954 \text{ kg/m}^3$. (handymath.com, 2012.)

Vesietanoliseoksen tiheyden vaikutus virtausnopeuden laskennassa on kuitenkin suhteellisen merkityksetön. Etanolin viskositeetille löytyy eri lähteistä eri arvoja. Yleisimmin käytetään arvoa $\mu_e = 1,2 \cdot 10^{-3} \text{ Pas} / 293 \text{ K}$ lämpötilassa. Veden viskositeetti on $\mu_w = 1,002 \cdot 10^{-3} \text{ Pas} / 293 \text{ K}$ lämpötilassa. Vesietanoliseoksen viskositeetti muuttuu voimakkaasti seossuhteen funktiona. Lämmönkeruunesteessä etanolin massaosuus on noin 30 %. Liuoksen viskositeetti μ on tällöin $2,66 \cdot 10^{-3} \text{ Pas}$ (keskimääräinen arvio useiden eri lähteiden perusteella).

Virtausnopeuden alarajan laskenta turbulenttisen virtauksen perusteella:

$$\text{Re} = 10000$$

$$\mu = 2,66 \cdot 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}$$

$$D_s = D_u - 2s = 0,040\text{m} - 2 \times 0,003\text{m} = 0,034\text{m} \quad (3)$$

$$v = \frac{\mu \text{ Re}}{\rho D_s} = \frac{(2,66 \cdot 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}) (10000)}{(954 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}) (0,034\text{m})} \frac{(\text{N} \cdot \text{m}^{-2})}{\text{Pa}} \frac{\text{kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-2}}{\text{N}} = 0,80 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \quad (4)$$

Eri lämmönsiirtonesteillä virtausnopeus ja virtausmäärä ovat suoraan verrannollisia vesietanoliliuoksen juoksevuuteen (viskositeettiin) ja kääntäen verrannollisia tiheyteen.

Yhtälöissä esiintyvät suureet: Re = Reynoldsin luku, D_s = putken sisähalkaisija, D_u = putken ulkohalkaisija, s = seinämän paksuus, μ = lämmönsiirtonesteen viskositeetti, ρ = lämmönsiirtonesteen tiheys.

Yhtälöiden 3 ja 4 mukaisena on saatu täysin kehittyneen turbulenttisen virtauksen nopeus, joka on riittävä tehokkaan lämmönvaihdon aikaansaamiseen. Polyeteeniputkien mitoituksessa jatkuvalla virtauksella käytetään suurimpana sallittuna arvona $2,5 \text{ ms}^{-1}$

(Uponor, 2012.), joten laskennallinen virtausnopeus on edellä esitetyn perusteella oltava välillä $0,80 \text{ ms}^{-1} - 2,50 \text{ ms}^{-1}$.

Painehäviön muodostumiseen virtausnopeus vaikuttaa neliöllisesti, joten kiertovesipumpun mitoitusperusteeksi valittiin virtausnopeuden alarajan $v_l = 0,80 \text{ ms}^{-1}$ ja ylärajan $v_h = 2,50 \text{ ms}^{-1}$ neliöjuurien keskiarvo. Näin varmistetaan turbulenttisen virtauksen toteutuminen ja järjestelmän skaalautuvuus eri virtausmäärille sekä vältetään ylipaineen muodostuminen putkistoon. Kiertovesipumpun valintaperusteena oleva virtausnopeus on näiden tekijöiden pohjalta laskettu yhtälössä 5.

$$v_m = (\sqrt{v_l} + \sqrt{v_h}) / 2 = (\sqrt{0,80} + \sqrt{2,50}) / 2 = 1,25 \text{ ms}^{-1} \quad (5)$$

Virtausmäärä \dot{V} (pumpulta vaadittava tilavuusvirta) saadaan virtausnopeuden v ja putken poikkileikkauksen pinta-alan A perusteella yhtälöistä 6 ja 7 seuraavasti:

$$D_s = 0,034 \text{ m}$$

$$A = \pi D_s^2 / 4 = \pi (0,034^2 / 4) = 0,0091 \text{ m}^2 \quad (6)$$

$$\dot{V} = v_m A = (1,25 \text{ ms}^{-1}) (0,0091 \text{ m}^2) (3600 \text{ s/h}) = 4,10 \text{ m}^3/\text{h} \quad (7)$$

Laittevalintoihin vaikuttaa myös virtauspiirin kokonaisvastukset. Vastuksia virtauspiiriin muodostaa jokainen yksittäinen komponentti ja lisäksi lämmönsiirtoputkiston kokonaispituus. Komponenttikohtaiset vastukset huomioidaan ns. kertavastuksina. Lämmönsiirtoputkiston vaikutus riippuu sen kokonaispituudesta, joka vaihtelee mittauskohteittain. Laitteisto kannattaa ylimitoittaa siten, että virtaus säilyy kaikissa tapauksissa turbulenttisenä. Mitoituksessa on lisäksi huomioitava mahdolliset muut satunnaiset häviöt kuten liuokseen kertyneen sedimentin vaikutus nestekierto.

Putkivastukset aiheuttavat painehäviöitä, jotka käsitellään virtaustekniikassa dynaamisena nostokorkeutena. Kitkahäviöt aiheutuvat putken seinämän vaikutuksesta ja virtaavan nesteen sisäisestä kitkasta. Turbulenttisen virtauksen sisäinen kitka riippuu pinnan

karheudesta ja Reynoldsin luvusta. Muut komponenttikohtaiset virtaushäviöt huomioidaan kertavastuksina. Kertavastukset ovat yleensä kokeellisesti tutkittuja komponenttikohtaisia arvoja. Kertavastuksen aiheuttama painehäviö riippuu lisäksi virtausnopeudesta ja virtaavan nesteen tiheydestä.

Pumpun mitoituksessa on huomioitava staattinen ja dynaaminen nostokorkeus. Staattinen nostokorkeus on nesteen pinnan ja pumpun imuaukon välinen vertikaalinen etäisyys. Lämpökairotekniikassa staattisella nostokorkeudella ei ole merkitystä, koska kyseessä on suljettu kierto. Vaikuttavaksi tekijäksi jää siis dynaaminen nostokorkeus, joka muodostuu virtausvastusten aiheuttamien painehäviöiden summasta.

Dynaamisen painehäviön laskenta, kun putkessa on turbulenttinen virtaus:

$$\Delta p = \rho g h_f \quad (8)$$

$$h_f = f \frac{L}{d} \frac{v^2}{2g} \quad (9)$$

h_f = painehäviötä vastaavaa nostokorkeus

f = kitkakerroin, joka saadaan logaritmisesta Colebrookin yhtälöstä, riippuu Reynoldsin luvusta sekä putken pinnankarheuden ja halkaisijan suhteesta. Likiarvo on luettavissa Moodyn kartasta (Moody Chart). (White 2008:364 - 365.)

$$\frac{\varepsilon}{D} = \frac{0,02 \text{ mm}}{34 \text{ mm}} = 5,8824 \cdot 10^{-4} \approx 0,0006 \quad (10)$$

ε = Pinnan karheus, muoviputkelle 0,02 mm (arvio sedimentoituneena)

D_s = Putken sisähalkaisija 34 mm

Moodyn kartasta (LTY: 16) saadaan kitkakertoimelle arvo $f = 0,030$

$$h_f = f \frac{L}{D_s} \frac{v^2}{2g} = (0,03) \frac{L}{(0,034 \text{ m})} \frac{(1,23 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1})^2}{(2) (9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2})} = (0,068 \cdot L) \quad (11)$$

Laskennallinen tulos vastaa suuruusluokaltaan Uponorin painehäviömonogrammista saatavaa arvoa 0,50 kPa/m (Uponor, 2012). Dynaamisen painehäviön merkitys polyeteeniputkistossa alkaa olla merkittävä suurilla putkipituuksilla. Syvissä lämpökaivoissa putkiston pituus on satoja metrejä, joten putkivirtauksen dynaaminen painehäviö on näissä tapauksissa huomioitava ja otettava laitteiston suunnittelussa huomioon.

Putkivirtauksesta aiheutuvan painehäviön lisäksi putkikomponenttien aiheuttamat kerta-luonteiset vastukset aiheuttavat dynaamisia painehäviöitä. Näiden vaikutukset on huomioitava piirissä erikseen.

Kiertopumpun mitoituksessa on lisäksi otettava huomioon, että pumpun tuottokyvyn ei pidä missään tilanteessa ylittää suurinta sallittua virtausnopeutta (4 ms^{-1}) PE-putkille tai putken osille. Virtausnopeuteen voidaan vaikuttaa kiertopumpun kierrosnopeuden säädöllä tai rajoittamalla virtausta mekaanisesti. Käytännössä virtausnopeutta on tarkkailtava mitatun virtausmäärän perusteella.

Taulukko 1. Kertavastuskertoimia (Lähde: LTY, 2007).

Komponentti	Vastuskerroin
Suora putkiliitos	0,5
Kulmaliitos	1
Putkimutka	0,4
Putkihaara	1
Putken laajennus	0,5
Putken pää	1
Venttiili	3 – 6

Alustava laskelma kertavastusten (taulukko 1) aiheuttamista painehäviöistä:

Kertavastuksen aiheuttama painehäviö Δp lasketaan yhtälön (12) mukaan

$$\Delta p = \xi \frac{\rho v^2}{2} \quad (12)$$

ξ = kertavastuskerroin, ρ = nesteen tiheys, v = virtausnopeus

Lähtökohtaisesti kaikki toiminnalliset komponentit ja vapaat putkilähdöt tulee olla erotettavissa laitteistosta venttiilein. Mittauksen aikana kiertopiiriin sisältyviä toiminnallisia komponentteja ovat ainakin kiertopumppu, vedenkuumennin ja suodatin. Lisäksi putkilähtöihin tulee 2 kpl sulkuventtiilejä. Näin ollen venttiilejä tarvitaan 8 kpl.

Venttiileistä aiheutuvat painehäviöt

$$\Delta p = \xi \frac{\rho v^2}{2} = 8 * 5 * \frac{(940 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3})(1,23 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1})^2}{2} = 26,8 \text{ kPa} \quad (13)$$

Putkiston muiden osien kertavastusten aiheuttama dynaaminen painehäviö on arviolta samaa suuruusluokkaa. Kertavastusten kokonaissummaksi saadaan näin ollen 50 kPa.

Syvyydeltään 200 m porakaivossa putkiston kokonaispituus on noin 400 metriä, josta aiheutuu laskennallinen painehäviö ($400 * 0,50 \text{ kPa/m}$) on noin 200 kPa. Dynaamisten painehäviöiden kokonaissumma on tällöin 250 kPa, joka vastaa vedelle 25 metrin nostokorkeutta.

3.3. Kiertovesipumpun valinta

Pumppu on mitoitettava siten, että maksimivirtaus ei ylitä putkiston sallittua jatkuvan virtauksen virtausnopeutta kuin tilapäisesti. Mittausta varten säädetyllä osateholla on saavutettava riittävä virtausnopeus turbulentsisuuden saavuttamiseksi ja lisäksi vaaditaan vähintään 25 metrin nostokorkeus kyseisellä tilavuusvirralla.

Virtausnopeuden jatkuvan maksiminopeuden ollessa 2,5 m/s, sitä vastaava tilavuusvirta on noin 9 m³/h. Tilavuusvirran ja dynaamisen nostokorkeuden perusteella Lowaran taulukosta sopiva pumppu olisi Lowara 10SV03, jonka tuotto 25,8 m nostokorkeudella on 10,2 m³/h. Pumpun ottoteho on 1,1 kW. Pumpun teho nimelliskierrosluvulla siis ylittää jatkuvan maksimi virtausnopeuden asettaman ehdon niukasti. Tilapäinen virtausnopeus voi olla maksimissaan 4,5 m/s, joten jatkuvan virtausnopeuden maksimin ylityksestä ei ole haittaa, kunhan mittauksen aikainen tilavuusvirta putkistossa säädetään sopivaan arvoon.

Porakaivon syvyys voi olla jopa 500 m, jolloin dynaaminen painehäviö vastaa 55 metrin nostokorkeutta. Pumppuvalmistajan (Lowara) taulukosta nähdään, että tällöin vaaditaan pumpun tyypiksi vähintään 10SV05 (kuva 3). Tämä pumpun antama tilavuusvirta on $5,0 \text{ m}^3/\text{h}$ nostokorkeuden ollessa 56,1 m. Tämä johtaisi 29 m nostokorkeudella $14 \text{ m}^3/\text{h}$ virtausmäärään, joka vastaisi virtausnopeutta $3,5 \text{ m/s}$. Sekin jää virtausnopeuden tilapäisen maksimiarvon $4,0 \text{ m/s}$ alapuolelle, mutta ylittää jatkuvan virtauksen maksimiarvon.



Kuva 3. Mittausvaunuun asennettu kiertovesipumppu Lowara 10SV05, joka on kiinnitetty asennuslevyyn haponkestävin teräspulteihin.

Eri käyttötapauksien vaihdellessa huomattavasti täytyy mittausjärjestelmään valita tehokas kiertopumppu, joka tuottaa riittävän suuren tilavuusvirran tapauksesta riippumatta. Lisäksi mittausjärjestelmään on toteutettava erillinen virtausnopeuden rajoitin. Virtausnopeutta on mahdollista rajoittaa joko pumpun pyörimisnopeutta säätämällä, ohivirtauksella tai virtausvastuksin.

Virtausmäärän mekaaninen rajoittaminen virtausvastuksin vaikuttaa osaltaan viskoosin nesteen lämpötilaan ja virtaustyyppeihin. Virtausmäärän rajoittamiseen on näistä syistä johtuen suositeltavampaa käyttää pumpun pyörimisnopeuden säätöä. Tätä tarkoitusta varten hankittiin taajuusmuuttaja (kuva 4). Pumpun pyörintänopeus asetetaan mitatun virtausmäärän perusteella sopivaksi.



Kuva 4. Vacon 10 -taajuusmuuttaja ja sen alla langaton reititin asennettuina vaunun etuosan suojattuun tilaan.

Kiertovesipumpun lisäksi järjestelmään asennettiin täyttöpumppu (kuva 5). Täyttöpumpun on oltava riittävän tehokas ilman poistamiseksi putkistosta. Paisunta-astia on mitoitettava riittävän tilavaksi, jotta nesteen lämpölaajenemisesta aiheutuvat painevaihtelut jäävät vähäisiksi. Täyttöpumpulla täytetään järjestelmä lähtöpaineeseen, joka muuttuu nesteen lämpötilanmuutosten, nestetilavuuden ja paisunta-astian ilmatilavuuden funktiona.



Kuva 5. Kuvassa on järjestelmän täyttämiseen tarkoitettu keskipakoispumppu pultattuna mittausvaunun lattiaan kiinnitettyyn asennuslevyyn.

3.4. Lämminvesivaraajan ja sähkövastusten valinta

Varaajan valinnassa on huomioitava lämmönsiirtonesteen syövyttävä vaikutus, joten nesteen kanssa kosketuksissa olevien materiaalien, eli varsinaisen säiliön, on oltava haponkestävää terästä. Samoin sähkövastusten ulkopinnat tulee olla haponkestävää materiaalia. Koska varaaja on järjestelmässä paineen alaisena osana, tulee sen täyttää nestettä sisältävien paineellisten astioiden mukainen paineasetus.

Varaajan nestetilavuudella ei ole mittauksen kannalta kovin suurta merkitystä. Tilavuus määräytyy lähinnä sen mukaan, millä ulkomitoilla varustettuja vastuksia järjestelmään on halutun tehon puitteissa saatavissa. Suunnitelman mukainen kokonaisteho, jolla pystytään kattamaan myös tavallista suurempaa tehontarvetta vaativat mittauskohteet, on arvioitu 18 kW:ksi. Muita varaajan valintaan vaikuttavia kriteerejä ovat paino, lämpöeristys, putkiyhteiden sijainti, varaajan kiinnitettävyyys ja hinta.

Vastusten tehontarve määräytyy lähinnä lämpökaivon yhdensuuntaispituuden mukaan ollen noin 40 W/m. Näin ollen 18 kW teholla saavutetaan lähes 500 m:n syvyyteen riittävä teho. Jos porakaivot ovat noin 200 m syvyisiä, tehontarve on noin 8 kW.

Lämpökaivon ideaalinen lämmönsiirtoteho on tapauskohtainen. Näin ollen vastetestissä käytettävä vastusten teho tulisi valita mahdollisimman hyvin arvioitua lämmönsiirtotehoa vastaavaksi. Teho on mahdollista valita 1 kW:n portain, kun käytetään tähteen kytkettyjä 3, 6 ja 9 kW:n vastuksia. Kunkin vastuksen vastuselementeistä valitaan kytkimien (kuva 7) avulla sopiva yhdistelmä lämmitystehon tuottoon. Käytännössä tarvitaan 1, 2, 3, 4 ja 8 kW tehoja vastaavat kytkimet, joiden yhdistelmänä saadaan sopiva lämmitysteho.

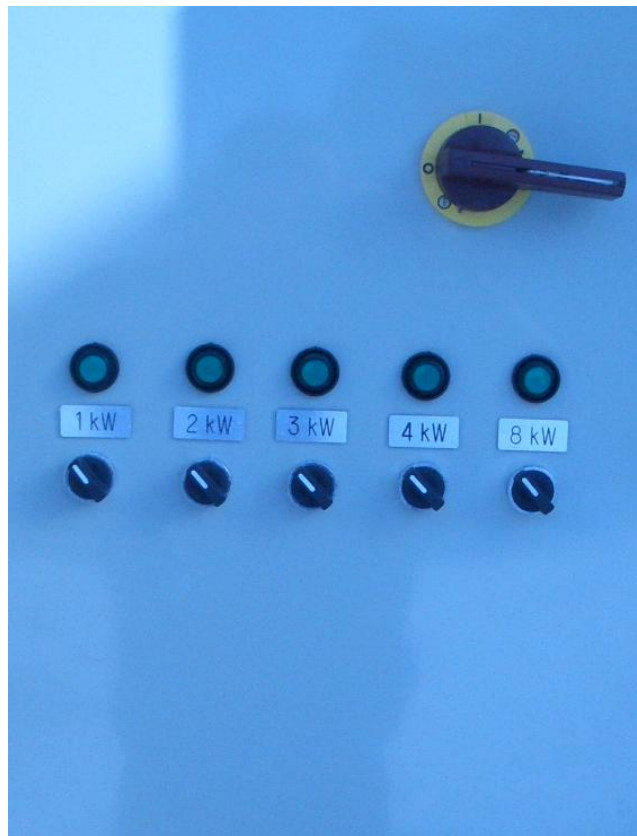
Tarkoitukseen sopivaa sähkökattilaa ei tiedusteluista huolimatta ollut saatavissa. Eri valmistajilta saatujen tarjoustietojen pohjalta valinta kohdistui Akvatermin 150 litran varaajaan (kuva 6), johon räätälöitiin tarvittavat putki- ja vastusyhteet. Akvatermin tuote oli myös kokonaishinnaltaan edullisin.

Sähkövastusten hankkiminen osoittautui hieman ongelmalliseksi, kun vastusten toimittajalla kaikki vastuskoot eivät olleetkaan sellaisia, että ne olisivat pituudeltaan sopineet varaajan sisään (syynä tähän oli valmistajan tuotesivuilla oleva virheellinen informaatio). Oilon Oy:ltä löytyi kuitenkin tarkoitukseen sopiva 9 kW vastus, jossa vastuselementtien päät oli taivutettu kokonaispituuden lyhentämiseksi. Tähän vastusmalliin joudutaan kuitenkin lisäämään erilliset liittimet nollajohtimelle, koska erillistä tähtipisteliitäntää ei ole valmiina olemassa. Alkuperäisessä käyttötarkoituksessaan kyseistä vastusta käytetään täydellä 9 kW teholla, jolloin nollajohtimen kautta ei kulje virtaa. Erilliset

nollajohdinliitännät tarvitaan, jotta vastuksesta voidaan kytkeä käyttöön yksi 3 kW vastuselementti kerrallaan.



Kuva 6. Akvaterm Oy:n 150 litran lämminvesivaraaja, 18 kW sähkövastukset.



Kuva 7. Sähkövastusten ohjauskytkimet, merkkilamput ja sähköjärjestelmän pääkytkin.

3.5. Paisunta-astian mitoitus

Paisunta-astia mitoitetaan lämmönkeruunesteen tilavuuden lämpölaajenemiskertoimen mukaan siten, että ilmatilavuuden muutoksessa otetaan huomioon paineenvaihtelun vaikutus tilavuuteen. Vaihtoehtoisina paisunta-astiamalleina tulevat kyseeseen ns. paljesäiliö tai suljettuun ilmatilaan perustuva paisunta-astia. Periaatteessa olisi mahdollista käyttää myös avointa paisunta-astiaa, jolloin painevaihtelua ei tarvitse paisunta-astian mitoituksessa erikseen huomioida.

Lämmönkeruuneste on käytännöllisesti katsoen kokoonpuristumatonta, joten sen tilavuudenmuutos tulee huomioida täysimääräisenä. Lämpölaajenemisen johdosta paisunta-astia tulee mitoittaa siten, että kokoonpuristuvan ilman paine ei ylitä järjestelmän mitoituspainetta.

Lämmönkeruunesteen lämpölaajenemiskerroin määräytyy seosaineiden suhteista. Vedelle tilavuuden lämpötilakerroin on $0,21 \cdot 10^{-3} \text{ }^1/\text{K}$ ja etanolille $1,14 \cdot 10^{-3} \text{ }^1/\text{K}$. Etanolin massaosuus liuoksessa on yleensä 30 %. Etanolin tiheys on 790 kg/m^3 ja veden 998 kg/m^3 . Edellisten perusteella lämmönkeruunesteessä jakeet suhtautuvat siten, että etanolia on 35,1 % ja vettä 64,9 % kokonaistilavuudesta. Näin ollen lämmönkeruunesteen lämpölaajenemiskertoimeksi saadaan $0,351 \times 1,14 \cdot 10^{-3} \text{ }^1/\text{K} + 0,649 \times 0,21 \cdot 10^{-3} \text{ }^1/\text{K} = 0,537 \cdot 10^{-3} \text{ }^1/\text{K}$.

Lämpötilaero, joka mittaustilanteessa on merkittävä, rajoittuu käytännössä 30 K alueeseen. Lämmönkeruunesteen määrä voi olla jopa 1000 litraa, joten lämpölaajenemisvaraksi saadaan $1000 \text{ l} \times 30 \text{ K} \times 0,537 \times 10^{-3} \text{ }^1/\text{K} = 16 \text{ litraa}$. Mahdollinen häiriötilanne edellyttää kuitenkin varautumaan siihen, että lämmönkeruunesteen lämpötila voi nousta varoimista huolimatta lähelle kiehumispistettä. Paisunta-astian mitoituksessa tämä tulee huomioida erikseen. Mikäli oletetaan lämpötilan nousu kolminkertaiseksi, niin paisuntavaraksi tulee tällöin noin 50 litraa.

Paisunta-astian tulee olla riittävän suuri, jotta käyttöpaine pysyy tarkoituksenmukaisissa rajoissa. Lämpötilan alarajalle sopivana lähtöpaineena on syytä pitää yhden ilmakehän ylipainetta eli 100 kPa. Lämpölaajenemisen seurauksena ylipaine saa nousta korkeintaan 300 kPa arvoon. Nesteen syrjäyttäessä ilmaa, ilma puristuu kasaan paineen noustessa vastaavasti, koska ilmamäärä pysyy vakiona. Paine ja tilavuus suhtautuvat toisiinsa siten, että paineen ja tilavuuden tulo pysyy vakiona, kun nesteen lämpötila pysyy säilyssä ympäristön lämpötilassa.

Ylipaineen ollessa kolminkertainen ilmanpaineeseen verrattuna (300 kPa) loppupaine on nelinkertainen ja tilavuus siis neljäsosa alkuperäisestä. Ylipaineen ollessa yhtä suuri kuin ilmanpaine (100 kPa) ilmatilavuus on puolet alkuperäisestä. Neste- ja ilmatilavuuden muutos on täten edellisten tilavuuksien erotuksena myös neljäsosa alkuperäisestä tilavuudesta. Paisunta-astian tilavuudeksi saadaan siis 200 litraa, kun yhden neljäsosan tilavuus on 50 litraa.

Paisunta-astian tilavuus on normaaleihin käyttötapauksiin nähden huomattavasti ylimitoitettu. Varautuminen poikkeustilanteisiin, lämpötilanmuutosten tai mitattavaan järjestelmään sisältyvän lämmönsiirtonesteen määrän osalta, edellyttää kuitenkin riittävää marginaalia paisunta-astian koon suhteen.



Esipaineistettua kalvopaisunta-astiaa käyttämällä säästetään tilaa ja selvitetään pienemmällä nestemäärällä. Kalvopaisunta-astiassa ilmatilan ja nestetilan välissä on kalvo, joka esipaineistetaan säiliön päällä olevalla ilmaventtiilillä. Näin ollen säiliötä ei tarvitse esitäyttää muun järjestelmän täytön yhteydessä vaan säiliö voidaan esipaineistaa paineilman avulla sopivalle tasolle. Tällöin säiliön esitäyttöön tarvittava nestemäärä jää oleellisesti pienemmäksi. Näistä lähtökohdista paisunta-astiaksi valikoitui Pumppulohja Oy:n 120 litran haponkestävä kalvopaisuntasäiliö (kuva 8).

Kuva 8. Pumppulohja Oy:n 120 litran kalvopaisunta-astia.

3.6. Mittaustietojen kerääminen

Mittausjärjestelmän tehtävänä on tuottaa riittävä määrä informaatiota analysoinnin pohjaksi ja johtopäätösten tekemiseksi niiden pohjalta. Lämpökaivojen osalta oleellista on kyetä mittaamaan lämpökaivon kykyä siirtää lämpöä ympäröivästä materiaasta lämmönsiirtonesteeseen.

Termisen vastetestin kannalta mitattavia suureita ovat sähköenergian kulutus, lähtevän ja palaavan virtauksen lämpötilat ja lämmönsiirtonesteen virtausmäärä. Lisäksi mitataan lähtevän ja palaavan virtauksen paineet ja selvittää näiden erotuksen perusteella dynaaminen painehäviö. Sääasemalta saadaan lisäksi ulkoilman lämpötila, ilman paine, kosteus ja tuulen nopeus. Mittausjärjestelmän toiminnan ohjaukseen liittyviä suureita ovat järjestelmässä vallitseva paine ja pumpun pyörimisnopeus. Näiden mittaaminen ei ole kuitenkaan oleellista lämpökaivon ominaisuuksien tarkastelemisen kannalta.

Lämpötilojen mittaamiseen käytetään sarjaliikenneväylään kytkettäviä kolmijohtimisia Pt-100 antureita. Lämpötila-anturit upotetaan putkikyhteiden kautta suoraan virtaavaan nesteeseen. Virtausmäärää ja virtausnopeutta mitataan putkistoon asennettavalla virtausmittarilla, jolloin nestevirtaus kulkee virtausmittarin läpi. Virtausmittarissa tulee lisäksi olla erillinen pulssianturi virtausmäärätiedon siirtämiseksi tiedonkeruulaitteeseen (kuva 9). Paineanturit asennetaan lämpötila-antureiden tapaan putkikyhteisiin.



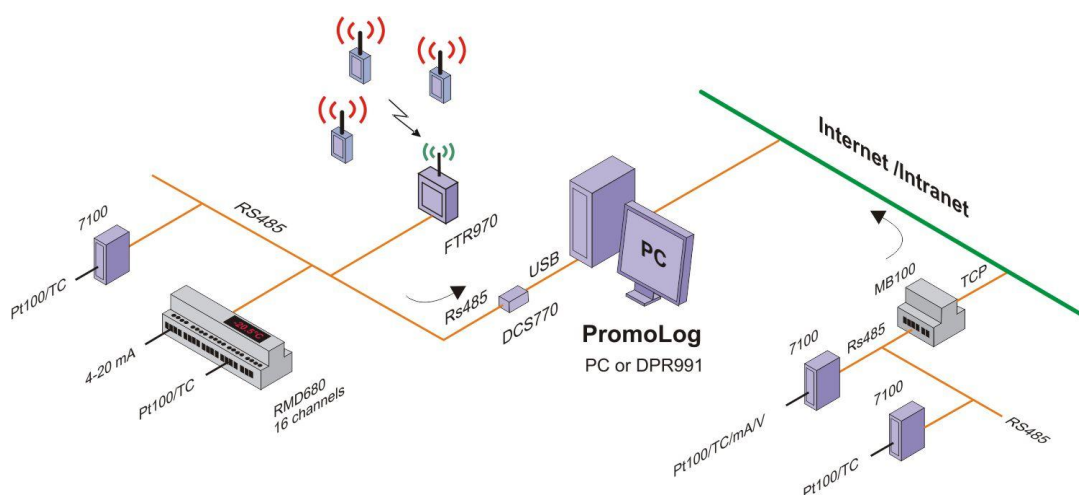
Kuva 9. Virtausmittari ja pulssianturi virtausmäärän mittausta varten.

Mittausjohtimet kytketään antureiden tulo- ja lähtöliittimiin sekä mittauslähettimessä niitä vastaaviin tuloihin. Mittauslähettimen tulokanava voidaan ohjelmoida ottamaan vastaan joko virta- tai jänniteviesti. Mittauslähetin muuntaa saamansa informaation suuretta vastaavaksi lukuarvoksi. Mittauslähettimet liitetään tiedonsiirtoväylän (RS 485) kautta edelleen tiedonkeruuyksikköön tai tietokoneeseen USB – väylämuuntimella. Väylämuuntimella muunnetaan mittauslähettimiltä saatavat tiedot yleiseen sarjaliikennemuotoon. Tietokoneessa kyseistä sarjaliikenneporttia käsitellään virtuaalisena COM-porttina. Tietokoneeseen (kuva 10) tai tiedonkeruuyksikköön asennettu ohjelmisto (PromoLog) tallentaa mittaus tiedot pysyväismuistiin jatkokäsittelyä varten.



Kuva 10. Mittaustietojen tallennukseen ja tiedonsiirtoon valittu erittäin hyvin olosuhtesuojeutettu tietokone, johon mittaus tiedot mittauslähettimiltä siirretään.

Kuvassa 11 on kuvaus tiedonkeruujärjestelmästä, johon on liitetty useita erityyppisiä antureita sarjaliikenneväylän ja sarjaliikennemuuntimen kautta tietokoneeseen. Langattomille antureille on vastaanottimet, jotka ovat liitettävissä suoraan sarjaliikenneväylään. Termiseen vastetestiin soveltuu parhaiten sarjaliikenneväylään kytketty 16-kanavainen mittauslähetin, johon antureilta tiedot saadaan siihen kytketyillä mittausjohtimilta.

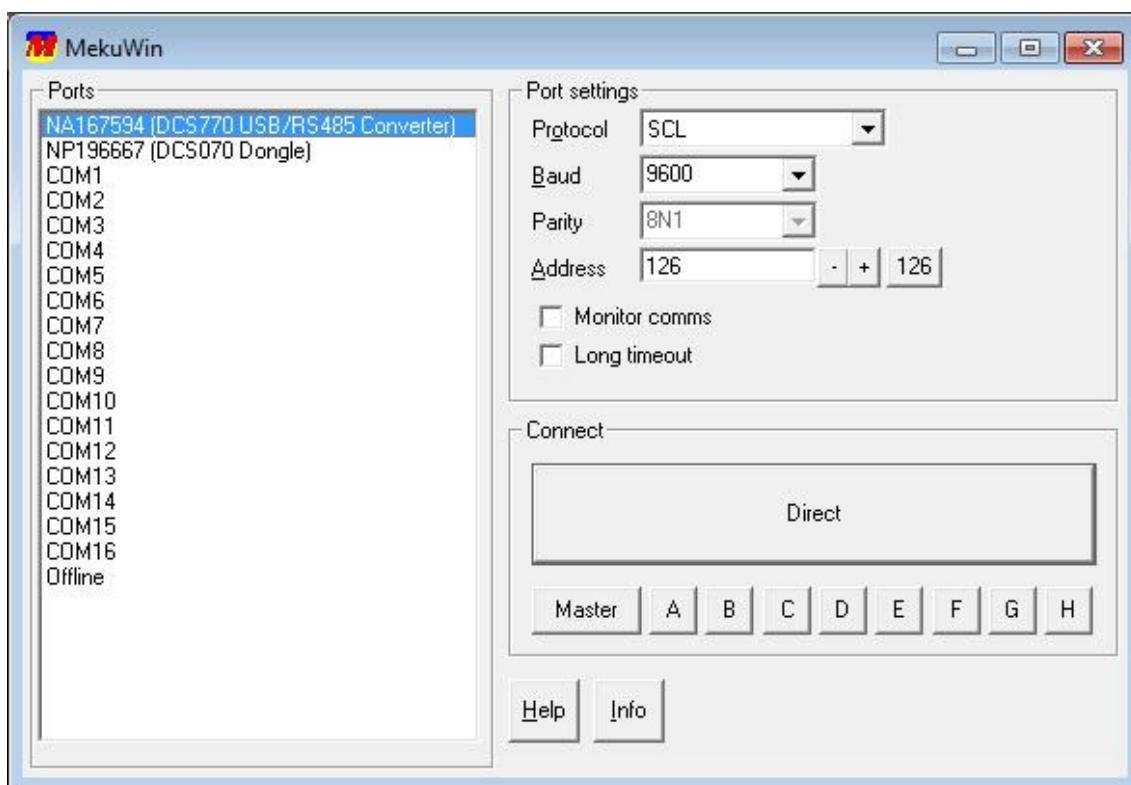


Kuva 11. Nokeval tiedonkeruujärjestelmä. Kuvan mukaisesta kokoonpanosta termiseen vastetestiin soveltuvat osat ovat: RMD680-mittauslähetin, DCS770 sarjaliikennemuunnin, PC ja PromoLog-ohjelmisto.

Lämmönsiirtonesteen kuumennukseen käytettävän sähköenergian mittaamiseen käytetään sähköenergiamittaria (kWh-mittari), joka tulee mittamuuntimen ja mittauslähetin avulla liittämään samaan sarjaliikenneväylään (RS-485) kuin prosessianturitkin. Sähköenergiamittarista saadaan sähkönkulutuksen arvo pulsseina energiayksikköä kohden. Vesi- ja sähkömittarin antamat pulssitiheydet on sovitettava erillisellä mittamuuntimella lähetinmittauskanavalle soveltuvaan muotoon. Tarkoitukseen soveltuva mittamuunnin muuntaa pulssitiheyden virta- tai jänniteviestiksi, jonka mittauslähetin lukee mittauskanavasta.

RMD680-mittauslähettimessä on liitettävissä 16 anturia, joiden erilliset tulot voidaan asettaa ottamaan vastaan standardoitu virtaviesti (4 – 20 mA) tai jänniteviesti (0 – 10 V). Lisäksi kukin anturipiiri kalibroidaan erikseen tuolle alueelle siten että tarpeellinen mittausväli tulee mittavaihtelun puitteissa katettua kokonaan. Tarkkuus paranee, kun mittautiedot vaihteluvälin puitteissa säädetään koko mittausalueelle.

RMD680-mittauslähettimen tulokanavat määritellään laiteen paneelista kalvopainonäppäimiä hyväksikäyttäen tai ohjelmallisesti mittaustietokoneeseen asennetulla MekuWin asetusten määrittelyohjelmalla (kuva 12).

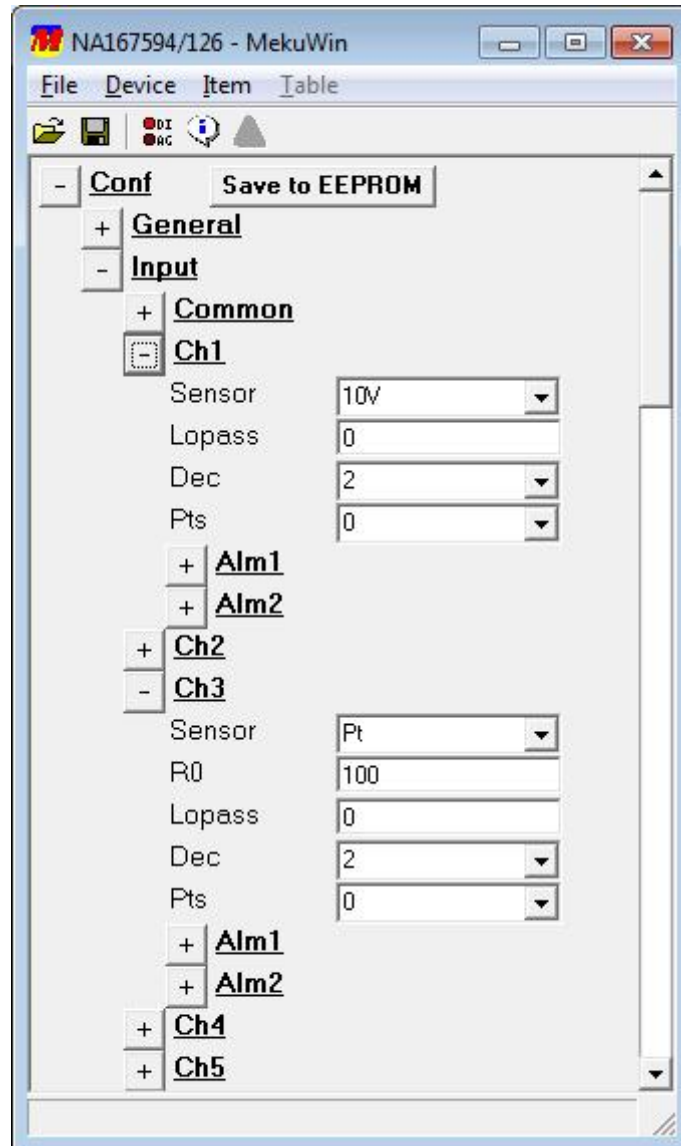


Kuva 12. MekuWin -ohjelman käyttöliittymä käynnistyksen jälkeen; DCS770 USB -sarjaliikennemuuntimen portti valittuna. Sarjaliikenneasetukset ovat oikeanpuoleisessa lohkoissa. Direct -painikkeella saadaan yhteys RMD60-mittauslähettimeen.

Vasemmalla olevasta valikosta valitaan laite, jonka sarjaliikenneparametrit halutaan määrittellä. Ohjelmisto löytää asennetut sarjaliikennelaitteet automaattisesti, kun ne ovat oikein kytkettyinä.

Yllä olevassa tapauksessa on asetettu RS-485/USB-sarjaliikennemuuntimen sarjaliikenneparametrit. Protokollaksi on valittuna Nokeval yhtiön käyttämä oma SCL ja sarjaliikenneväylän nopeudeksi on määritelty 9600 baudia sekä pariteetiksi 8, none, 1.

Kanavakohtaisesti on valittavissa kunkin tulokanavan parametrit: tulokanavan tyyppi (Pt, 0 – 10 V, 4 – 20 mA) sekä muut tyyppikohtaiset arvot (kuva 13).



Kuva 13. RMD680 -mittauslähettimen kanavakohtaisten asetusten määrittely.

3.7. Langaton tiedonsiirto

Kaikilta mittauslähettimeen liitettyiltä antureilta tiedot tallentuvat mittautietokoneelle. Mittautietokoneeseen yhdistetyn reitittimen ja 3G-yhteyden avulla tiedot ovat luettavissa myös järjestelmän ulkopuoliselta tietokoneelta eli työasemalta. Työasemaan asen-

netulla etäkäyttöohjelmalla otetaan yhteys vaunussa olevaan mittaustietokoneeseen. Mittaustietokoneeseen on asennettuna etäkäyttöohjelman palvelinosa (server), joka välittää tiedot työasemaan siinä ajettavan asiakasosan (client) kautta.

Yhteyden ylläpitoon tarvitaan lisäksi mittaustietokoneeseen liitetty reititin, jolla dataliikenne ohjataan palvelinkoneen siihen porttiin, joka etäkäyttöohjelman palvelinosan käyttöön on varattu. Reitittimen tietoliikenneyhteys voidaan toteuttaa 3G-liittymän avulla (SIM-kortti), johon puhelinyhtiö on liittänyt datapalvelut. Datapalveluun ei ole kiinteää IP-tunnistetta saatavissa. Tällaisessa tilanteessa on hyödynnettävä DNS-nimipalvelua. Vaihtuvan IP-tunnisteen varalta reitittimeen on mahdollista määrittää DNS -palvelun tiedot. Näitä palveluita tarjoavat useat eri yhtiöt maksua vastaan. Valitun reitittimen valmistajalla on myös oma nimipalvelu, joka on maksuton.

Reititin saa jokaisen käynnistymisensä yhteydessä puhelinyhtiön datapalvelusta vaihtuvan IP-tunnisteen. Reititin ottaa tämän jälkeen yhteyttä DNS-nimipalveluun, joka vaihtaa laitteen tunnistetiedon perusteella uuden IP-osoitteen tälle reitittimelle. Etäkäyttöohjelman asiakasosaan tallennetun laitteen nimen perusteella se hakee nimipalvelusta sen hetkisen IP-osoitteen, jonka perusteella se ottaa yhteyden reitittimeen. Yhteydenottopyyntö ohjautuu reitittimellä etäkäyttöohjelman käyttöön varattuun porttiin. Reitittimeen tallennetaan tiedot siitä mihin IP-osoitteeseen ja porttiin sille tiettyyn porttiin tulevat yhteyspyynnöt ohjataan.

Mittaustietokoneen ja siihen liitetyn reitittimen välillä on käytössä kiinteä sisäisen verkon IP-tunniste molempiin suuntiin. Liikenne ohjautuu näiden IP-tunnisteiden mukaisena suoraan oikealle laitteelle eli reitittimeltä mittaustietokoneelle ja päinvastoin. Edellisessä kappaleessa esitetyn porttien ohjausmäärittelyn mukaisesti reitittimen tiettyyn porttiin tuleva yhteyspyyntö on ohjattavissa suoraan mittaustietokoneen haluttuun porttiin. Näin yhteys etätyöaseman ja mittaustietokoneen välillä saadaan toimimaan läpinäkyvästi. Etätyöasemana voi olla joko kiinteän verkkoon liitetty työasema tai kannettava tietokone, johon on asennettuna langaton dataliittymä. Langaton yhteys on muodostettavissa kannettavan työaseman ja mittaustietokoneen välille aina, kun ollaan sellaisella alueella, jossa on riittävän hyvä 3G-kuuluvuus ao. palveluntarjoajalla.

Mittauspaikalla olevassa vaunussa käytetään ulkoista antennia, joka yhdistetään reitittimeen antennijohtimella (kuva 15). Lähtökohtaisesti antenni tulee olla kiinteästi asennettuna vaunun katolle, jolloin saavutetaan paras mahdollinen kuuluvuus kaikissa suunnissa. Samalla antenni on mahdollisen ilkvallan kannalta parhaiten suojassa. Jos kuuluvuus on heikko, on mahdollista käyttää tehokkaampaa irrallista antennia. Tehoantenni pyritään sijoittamaan sellaiseen kohtaan ympäristössä, jossa kuuluvuus on paras mahdollinen. Erillinen tehoantenni johtimineen on kuitenkin altis vahingoille ja mahdolliselle ilkvallalle, joten sitä on syytä käyttää vain poikkeustapauksissa. Jos kuuluvuuteen liittyviin ongelmiin ei löydetä ratkaisua, on mittausta valvottava paikanpäällä.



Kuva 14. Sierra GX400 reititin.

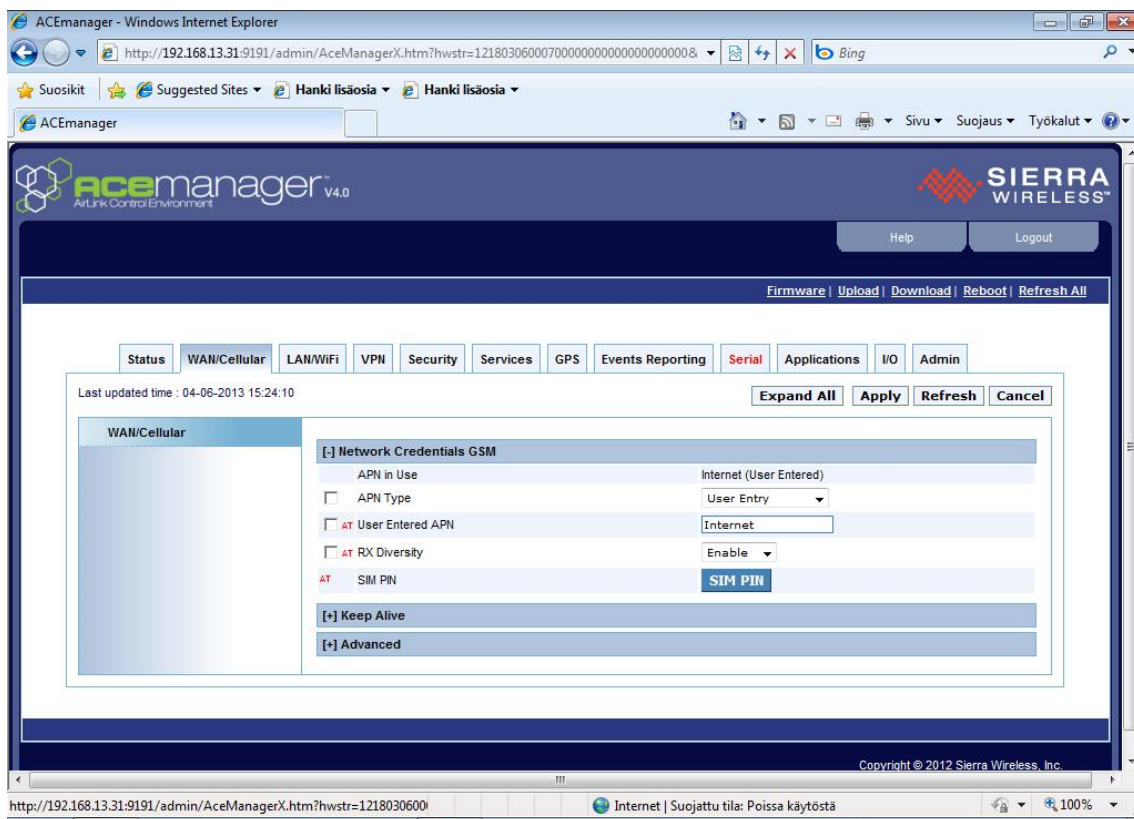


Kuva 15. SmartDisc 3G -antenni.

Reititin kiinnitetään ruuveilla mittausvaunun sisälle seinälevyyn. GPRS -antenni kiinnitetään ruuveilla mittausvaunun katolle. Modeemin virtalähde kytketään pistorasiaan ja antennijohdin modeemiin taakse vasemmassa reunassa olevaan antenniliittimeen. Reititin yhdistetään mittautietokoneeseen ethernet -kaapelilla, joka on varustettu RJ-45 liittimin.

Reitittimeen (kuva 14) saadaan yhteys kirjoittamalla mittautietokoneen selaimen osoitekenttään <http://192.168.13.31:9191>. Selaimen avautuu lomake, jossa pyydetään pääkäyttäjän käyttäjätunnus ja salasana. Käyttäjätunnus ja salasana ovat alustavasti ”user” ja ”12345”. Käyttäjätietojen hyväksymisen jälkeen saadaan näkyviin asetusten selailu ja ylläpitoruutu. Ylävalikosta valitaan muutettavien asetustietojen kohde ja vasemmasta reunan pystyvalikosta selailukohde.

Yhteyden muodostamista varten tulee määrittellä ainakin seuraavat perustiedot: Wan/Cellular, LAN/WiFi ja Security. Muut tiedot jätetään oletusarvoiksi.



Kuva 16. Reitittimen Wan/Cellular asetusten ikkuna.

Wan/Cellular ikkunassa (kuva 16) määritellään langattoman yhteyden asetukset. APN tyyppi tulee olla ”User Entry” ja User Entered APN arvoksi asetetaan ”Internet”. SIM PIN arvoksi asetetaan SIM-kortin nelinumeroinen PIN -koodi.

Keep Alive – asetuksissa määritellään miten pitkään yhteyttä pidetään auki, ja miten usein lähetetään yhteyden säilymistä varten yhteyspyyntö.

3.8. Sähköjärjestelmän suunnittelu

Sähköjärjestelmän toteuttamisessa tulee huomioida sähkön syöttö, ohjaus, varolaitteet, johdotus, toimilaitteet ja mittaus sekä toimintaympäristö. Sähkön syötön osalta liikuttava ja suhteellisen suuren sähkön tarpeen omaavan mittauslaitteiston toteuttamisessa on omat haasteensa. Kuinka paljon sähköä tarvitaan, mistä sitä saadaan, kuinka tasalaatuis-ta sen tulisi olla ja mikä on toimitusvarmuus.

Mittauksen kannalta on oleellista sähkön tasalaatuisuus ja sähkön syötön katkeamatto-muus. Lämpökaivon mittausprosessi kestää useita vuorokausia keskeytymättömästi, jot-ta lämpökaivon fysikaalinen luonne saadaan mittaustulosten perusteella analysoitua luo-tettavasti. Lyhyet satunnaiset sähkökatkokset eivät saa keskeyttää mittausta tai vaikuttaa mittauksen aikaisiin asetuksiin.

Sähkön syöttö on mahdollista toteuttaa ns. työmaasähkönä, jolloin tarvittava sähköener-gia saadaan työmaakeskuksesta, joka on kytketty yleiseen sähköverkkoon. Vaihtoehtoi-sesti sähkön tuotantoon tulee käyttää polttomoottorikäyttöistä aggregaattia. Aggregaatil-la tuotettu sähkö ei ole kuitenkaan niin tasalaatuista kuin yleisestä sähköverkosta saata-va sähkö. Polttoaineen riittävyys ja mahdolliset tankkaukset vaativat toistuvia käyntejä mittauspaikalla. Lähtökohtaisesti on järkevää kytkeytyä yleiseen sähköverkkoon. Ag-gregaattia käytetään vaihtoehtoisena tai varmistavana sähköenergian lähteenä.

Vaunun liittämisesä sähkölähteeseen tulee huomioida eri vaihtoehdot. Koska kiinteä kytkentä ei tule kyseeseen, on sähkön syöttöä varten asennettava erillinen pistoke, joka liitetään sähkölähteen vastaavaan pistorasiaan. Kaapelin ja pistokkeen mitoituksessa on otettava huomioon mittauksen aikaisen sähkövirran maksimiarvo. Mitoituksellisesti ko-konaiskuormitus on suurimmillaan silloin, kun kaikki sähkövastukset ja kierto-vesipumppu ovat samanaikaisesti täydellä teholla. Muiden komponenttien osalta säh-könkulutus on vakio. Laskennallinen kuormitus saadaan edellisten summana. Mitoituk- sessa on huomioitava kunkin vaiheen (L1, L2, L3) kuormitus erikseen.

Sähkökeskus, jonka yhteyteen sähkön syöttö, jakelu ja mittaustekniikan komponentit asennetaan, on oltava kuivassa ja pölyttömässä tilassa sekä muutenkin hyvin suojattuna. Toteutuksessa sähkökeskus (kuva 19) asennettiin vaunun etuosaan, joka on väliseinällä erotettuna varsinaiset toimilaitteet sisältävästä osasta.



Kuva 19. Sähkökeskus asennettuna vaunun etuosaan, yläosassa on pääkytkin ja varokkeet. Seuraavassa tasossa ovat kontaktorit, energiamittari ja vikavirtasuojat. Näiden alapuolella ovat mittauslähetin, mittamuuntimet ja tasavirtalähde. Alareunassa ovat riviliittimet kytkentöjä varten.

Kun sähköjärjestelmä suunnitellaan toteutettavaksi kuljetettavaan mittausjärjestelmään, kohdistuu kaapeleihin ja johtimien liitoskohtiin rasituksia, jotka voivat johtaa kytkennän heikkenemiseen ja liitoksiin muodostuviin ylimenovastuksiin. Ylimenovastukset aiheuttavat liitoksen kuumentumista ja häiriötilanteita sekä muodostavat kuumentuessaan tulipalovaaran. Riskien minimoimiseksi ajoneuvoissa ja liikuteltavissa laitteistoissa on käytettävä monisäikeisiä johtimia, jotka joustavina kestävät hyvin lyhytaikaisia (massahitaudesta johtuvia) dynaamisia kuormituksia.

Lämmönsiirtonesteen kuumentamiseen joudutaan käyttämään suhteellisen paljon sähköenergiaa, jonka seurauksena vaihekohtainen perusvirta muodostuu melko suureksi. Kuumennusteho on maksimissaan 18 kW ja kiertovesipumpun ottama teho on korkeintaan 2,2 kW. Muita mittauksen aikaisia sähköenergian kulutuskohteita ovat pakkasvahti ja varsinainen mittauslaitteisto. Saman tehoseen 1-vaiheiseen verrattuna 3-vaiheisen kiertovesipumpun vaihekohtaisten johtimien ja sulakkeiden kuormitus jää vähäiseksi.

Täyttövaihteen aikana ilmaa on järjestelmässä runsaasti. Täyttöpumpun on oltava riittävän tehokas, jotta se pystyy poistamaan putkistoon jääneen ilman tehokkaasti. Ilma kulkeutuu voimakkaan nestevirtauksen mukana kuumavesivaraajaan, jossa se nousee pintaan poistuen ilmausventtiilin kautta ulos. Tehokas täyttöpumppu tuottaa toisaalta ongelmia siinä vaiheessa kun järjestelmä on juuri täyttymässä. Paine pyrkii nousemaan täytön loppuvaiheessa nopeasti, jolloin on olemassa vaara liiallisen ylipaineen muodostumisesta. Liiallinen ylipaine voi rikkoa laitteistoa, putkistoa, tai aiheuttaa tapaturmavaaran laitteistoa käyttävälle henkilöstölle. Täyttöpumppuun on liitettävä painekatkaisin, joka automaattisesti kytkee pumpun pois päältä kun riittävä paine on saavutettu.

Painelaitelain mukaiset säädökset on huomioitava järjestelmän toteutuksessa (KTM). Käyttöpaine voi ulkoisen järjestelmän rajoittamana olla korkeintaan 400 kPa. Muovi-putkien, joissa lämmönsiirtoneste kiertää, maksimi mitoituspaine on 600 kPa. Lämmönsiirtoneste ei saa kuumentua yli 40 °C lämpötilaan, koska muoviputkien kestävyys heikkenee oleellisesti lämpötilan noustessa. Paineen ja lämpötilan rajoittimet tulee säätää nuo rajat huomioiden.

Painelaitelain mukaan laitteistot, joissa oleva vesi kuumenee yli 110 °C lämpötilaan tai vaihtoehtoisesti nesteen höyrynpaineen 150 kPa ylittävään lämpötilaan, tulee tarkistuttaa ja hyväksyttää painelain edellyttämällä tavalla. Käyttölämpötilat ovat alhaisia, joten tämän lain mukaisia vaatimuksia ole täytettävänä. Laitteiston toteutuksessa riittää hyvän konepajakäytännön noudattaminen. Tällöin sitä ei tarvitse ilmoittaa painelaiterekisteriin tai hyväksyttää tarkastuslaitoksen toimesta. Hyvän konepajakäytännön painelaitteissa tai laitekokonaisuuksissa ei saa olla CE-merkintää, eikä niistä laadita EY-vaatimustenmukaisuusvakuutusta. Hyvän konepajakäytännön painelaitteissa on oltava merkinnät, joista voi tunnistaa valmistajan tai valmistajan edustajan. Lisäksi niiden mukana on oltava riittävät käyttöohjeet. (KTM, 6. pykälä).

Mittauslähettimet ja anturit toimivat pienjännitteisinä, joten niitä varten on sähköjärjestelmään lisättävä matalajännitteinen virtalähde. On olemassa myös vaihejännitteellä toimivia mittausjärjestelmiä. Näiden käyttö olisi kuitenkin sähköturvallisuuden kannalta kyseenalaista. Pienjännitteinen tasavirtalähde on käyttöturvallisuuden kannalta optimaalinen tähän tarkoitukseen. Anturipiirit, mittamuuntimet ja mittauslähetin tarvitsevat tasavirtalähteen, jonka jännite ja teho on sovitettava niiden mukaiseksi. Virtalähteen jännite on tässä tapauksessa oltava 24 V. Laitteiden virran kulutus määrää näin ollen virtalähteen tehon. Mittauspiirien virrankulutus on kuitenkin hyvin vähäinen, joten pienitehoinen tasavirtalähde riittää hyvin tähän käyttötarkoitukseen.

3.9. Laitteiston tilantarpeeseen ja sijoitteluun liittyvät näkökohdat

Tieliikenteessä kuljetettavan vaunun laitteiston sijoitteluun tulee kiinnittää erityistä huomiota. Laitteiston painopiste on pyrittävä saamaan mahdollisimman keskelle ja mahdollisimman alas, jotta kaarreajossa tai mahdollisten sivusuuntaisten luisujen äkkipysäyksissä laitteiston massasta aiheutuisi mahdollisimman vähäinen vaunua kaatamaan pyrkivä momentti. Myös voimakkaiden jarrutusten tai törmäyksen seurauksena rakenteisiin kohdistuu massahitaudesta aiheutuvia suuria kuormituksia, jotka on syytä ottaa laitteiden kiinnityksessä ja sijoittelussa erityisesti huomioon. Kiinnityspisteiden on voimakkaankin hidastumisen aikana kyettävä pitämään laitteet paikoillaan lattiaan nähden.

Painavimmat osat tulee sijoittaa mahdollisimman lähelle vaunun keskiosaa. Muut osat laitteistosta voidaan sijoittaa tilankäytön ja laitteiston käytettävyyden kannalta optimaalisella tavalla (kuva 20). Järjestelmän huollettavuuteen on myös syytä ottaa huomioon, koska laitteisto on tyhjennettävä mittausjakson jälkeen sekä puhdistettava mahdollisista sedimenttijäämistä. Laitteistossa käytettävä lämmönsiirtoneste tulee poistaa järjestelmästä. Vaunuun sijoitettavissa säiliöissä ei ole laipioita, jotka estäisivät nesteen dynaamiset liikkeet ja niistä aiheutuvat rakenteisiin kohdistuvat kuormitukset ja voimavaikutukset.



Kuva 20. Laitteiden sijoittelu TRT-vaunussa. Tavoitteena on ollut tasapainoinen ja käytettävyydeltään optimaalinen kokonaisratkaisu.

3.10. Mittausjärjestelmän mekaanisten osien suunnittelu

Mekaanisten osien suunnittelussa on otettava huomioon laitteiston aiheuttamat staattiset ja dynaamiset kuormitukset. Staattiset kuormitukset aiheutuvat lähes pelkästään painovoiman vaikutuksesta. Liiketilän muutokset voivat liittyä järjestelmään liittyviin ulkoiisiin tai sisäisiin voimiin tai momentteihin. Voimien tuottamat kiihtyvyydet aiheuttavat massahitauten seurauksena dynaamisia kuormia. Rakennetta ja komponentteja kuormittavana kokonaisvaikutuksena on huomioitava staattisten ja dynaamisten kuormitusten summa. Laitteiston komponentit ja kiinnitystavat on valittava sellaisiksi, että ne kaikissa perustilanteissa kestävät nuo kokonaiskuormitukset.

Lämpöeristettyjen seinien ja lattian rakenteet ovat sellaiset, että raskaiden komponenttien kiinnittäminen vaunun rakenteisiin on haasteellista. Vaunun seinät, paksuudeltaan 40 mm, ovat rakenteeltaan kahden ohuen alumiinilevyn väliin liimattua eristelevyä. Tällaisten seinämien lujuus on heikko, joten komponenttien kiinnittäminen niihin ei ole mahdollista. Vaunun lattian alusta on toteutettu tukevin kiinnitysrimoin, joiden väliin eristelevyt on asennettu. Näiden päälle on ruuvikiinnityksellä pultattu 20 mm vesivaneri, joka on riittävän luja laitteiston kiinnittämistä varten. Näin kiinnityspisteisiin kohdistuva kuormitus saadaan jaettua riittävän suurelle alueelle. Tämä on toteutettavissa lattiaan pulttavalla asennuskehikolla tai metallilevyillä, joihin laitteiston osat kiinnitetään.

Alustava ajatus oli kiinnittää laitteiston komponentit kehikkoon, joka kokonaisuudessaan voitaisiin asentaa nosturin avulla vaunun sisään ja pultata kiinni lattiaan. Tilankäytön ja vaunun sisällä liikkumisen helppouden kannalta lattiaan kiinnitettävät metallilevyt ovat kuitenkin parempi ratkaisu. Metallilevyihin on tehtävä laitteiden asennusta ja levyjen kiinnitystä varten tarvittavat poraukset. Materiaaliksi sopii parhaiten haponkestävä teräslevy, koska se sietää parhaiten lämmönsiirtonesteen aiheuttamaa korroosiovaikutusta.

Laitteiston asennus levyineen voidaan toteuttaa layout-kuvan (liite 1) mukaisesti. Layoutissa on huomioitu tilankäyttö, huollettavuus sekä kuormitusten kokonaisvaikutus. Kaarreaajossa vaunu pyrkii renkasiin kohdistuvan sivuttaisvoiman seurauksena kierty-

mään painopisteensä ympäri, joten painopisteen saaminen mahdollisimman alas minimoi kaatumisriskin.

Laitteet pultataan levyihin siten että pultin kanta tukeutuu levyn alapintaan. Pultin kantaa varten on tehtävä lattialevyyn upotus, jotta metallilevy saadaan sovitettua tiiviisti lattiaa vasten. Levyt on kiinnitettävä lattiaan joko haponkestävillä tai kuumasinkityillä puuruuveilla. Puuruuvit pyritään ruuvaamaan alapohjan rimoitukseen kohtaan mahdollisimman lujan tartunnan aikaansaamiseksi. Ruuvien määrä on oltava riittävä, jotta yhteen pulttiin ja lattialevyyn kohdistuva paikallinen kuormitus ei muodostu liian suureksi.

Ajoneuvoasetus määrittelee kuormakorin kiinnityksen lujuuden ajoneuvon alustaan. Kiinnityksen tulee tuottaa voima, joka kykenee pidättelemään laitteita seuraavilla kiihtyvyyksillä: 14 m/s^2 ajosuunnassa, 7 m/s^2 sivusuunnassa ja 10 m/s^2 pystysuunnassa. Laitteiston kiinnitysten suunnittelussa noudatetaan soveltuvien osin tätä asetusta. Laitteet kiinnitetään pultein haponkestäviin teräslevyihin, jotka puuruuvein ja liimaamalla kiinnitetään lattialevyyn. Teräslevyihin laitteet on kiinnitettävä haponkestäviin teräspultein, jotta korrosio ei niitä heikennä. Metallilevyt kiinnitetään lattialevyyn korroosion vuoksi kuumasinkityillä puuruuveilla. Myös tartunta ruuvien ja puun välille saadaan tällä tavoin mahdollisimman hyväksi.

3.11. Kiinnitysten laskenta ja mitoitus

Laitteiston kiinnitykset mitoitetaan edellä esitetyn mukaisesti ajoneuvoasetuksessa määritellyllä tavalla. Laskettaessa kiinnitys painavimman ja korkeimman komponentin mukaan, saadaan oleellinen tieto kiinnityspisteiltä vaadittavasta kuormankantokyvystä.

Laskennalliset kuormitukset ajosuunnassa:

Varaajan massa 100 kg, korkeus 160 cm, painopisteen korkeus $h=100$ cm.

Painopisteen kautta vaikuttavan voiman suuruus

$$F_x = mv \cdot a_x = 100 \text{ kg} \cdot 14 \text{ m/s}^2 = 1400 \text{ N} = 1,40 \text{ kN} \quad (14)$$

Laskennalliset kuormitukset muissa suunnissa:

Sivusuunnassa

$$F_y = mv \cdot a_y = 100 \text{ kg} \cdot 7,0 \text{ m/s}^2 = 700 \text{ N} = 0,70 \text{ kN} \quad (15)$$

Pystysuunnassa

$$F_z = mv \cdot a_z = 100 \text{ kg} \cdot 10 \text{ m/s}^2 = 1000 \text{ N} = 1,0 \text{ kN} \quad (16)$$

Leikkaavat voimat tasossa:

Yhdistetty leikkausvoima, F_{xy} :

$$F_{xy} = F_y + F_x = \sqrt{1,4^2 + 0,7^2} \text{ kN} = 1562 \text{ N} = 1,57 \text{ kN} \quad (17)$$

Voiman momentti, M_{xy}

$$M_{xy} = F_{xy} \cdot h = 1562 \text{ N} \cdot 0,1 \text{ m} = 156 \text{ Nm} \quad (18)$$

Ruuvien poikkipinta-ala M8 / 8.8 -ruuvilla on $36,6 \text{ mm}^2$, myötöraja 640 N/mm^2 . Leikkausjännitys yhtä ruuviliitoksessa on yhdistetty leikkausvoima jaettuna ruuviliitoksen yhteenlasketulla poikkipinta-alalla. Mekaanisessa rasituksessa pitäisi käyttää laskentatapaa, jossa kuormitus lasketaan kitkakertoimen perusteella. Tässä tapauksessa kyseessä on kuitenkin laskennallinen kuormitus satunnaisessa törmäystilanteessa. Laskennallisesti riittää, ettei myötöraja ylitä varmuuskertoimella 2.

Sallittu leikkausjännitys varmuuskertoimella 2 on 320 N/mm^2 . Tästä seuraa, että 1570 N leikkausvoimaa varten tarvitaan noin 5 mm^2 ruuvien poikkipinta-ala. Yhdenkin ruuvien poikkipinta riittäisi siten antamaan tarvittavan tuen leikkausvoimia vastaan. Kiinnitykseen tarvitaan kuitenkin useita ruuveja kiertoliikkeen estämiseksi.

Pystysuuntaisista kiihtyvyyksistä ja vaakasuuntaisten voimien momenteista kohdistuu ruuveihin vetorasitus, joka pulttien tulee kestää. Ruuviliitoksessa momentin ottaa vastaan ensisijaisesti uloimmat ruuvilinjat.

Varaajan kiinnityslevyn ruuvikehän halkaisija on 650 mm ja uloimpien ruuvien välinen minimietäisyys on 600 mm (kaikissa suunnissa). Tällöin yhdistetyn momentin (156 Nm) kumoamiseen tarvittava voimapari on suuruudeltaan 2600 N (voimat suuntautuvat toisessa reunassa alaspäin ja toisessa ylöspäin). Tämän lisäksi on huomioitava pystysuuntaisen kiihtyvyyden aiheuttama 1000 N kuormitus. Pystysuuntainen kokonaisvoima on siis 3600 N . Sallitun veto-/puristusjännityksen mukaan laskettuna riittää aiheutuvan kuormituksen kantamiseen $11,3 \text{ mm}^2$ poikkipinta-ala. Tämäkin on selvästi vähemmän kuin yhden ruuvien poikkipinta-ala, joten ruuviliitokset ovat joka tapauksessa riittäviä pitämään laitteisto paikallaan ajoneuvoasetuksen edellyttämällä tavalla.

Esikiristys lisää jossain määrin ruuvien kuormitusta, mutta ei vaikuta oleellisesti kuormankantokykyyn. Kiinnitysruuveja tulee muista teknisistä syistä johtuen olemaan joka tapauksessa riittävä määrä kyseisen kuormitustapauksen kannalta. Toteutuksessa kuumavesivaraajan ja kiertovesipumpun yhdistelmä on kiinnitetty kuudella ruuvilla, kuten myös paisunta-astia ja täyttöpumppu.

3.12. Mittausvaunun katsastaminen

Mittausvaunu on valmistajan toimesta rekisteröity tavarankuljetusvaunuksi, joten sitä ei tarvitse välttämättä rekisteröidä erikseen muuhun tarkoitukseen. Vaunun rakenteeseen ei kuitenkaan saa tehdä muutoksia, eivätkä vaunun sallitut kuormitukset saa ylittyä. Poikkeaminen noista lähtökohdista edellyttäisi uudelleenrekisteröintiä erikoistarkoitukseen. Koska kyseessä on jarruin varustettu perävaunu, sille tulee suorittaa tieliikennelain mukainen katsastus kahden vuoden välein. Katsastus suoritetaan katsastuskonttorilla.

Vaunua kuljetettaessa ja katsastettaessa se tulee olla varustettuna asianmukaisin renkain. Talvella tulee ehdottomasti käyttää nastoitettuja talvirenkaita. Jarruin varustettua perävaunua koskevat samat tieliikennemääräykset kuin moottoriajoneuvojakin. Vetoautossa ja perävaunussa tulee aina olla toisiaan vastaava rengastus. Mikäli vaunun renkaiden ja tienpinnan välinen kitka on pienempi kuin vetoautossa, kohdistuu autoon työntävä voima autoa jarrutettaessa. Työntö kohdistuu vetokoukkuun, jolloin autoon kohdistuvan työntönsä seurauksena voi syntyä auton perää sivullepäin kierrättävä momentti. Liukkaalla kelillä vetoauton hallittavuuden menetys on todennäköinen.

3.13. Laitteiston testaus ja koekäyttö

Testauksen tekemistä varten on laadittava testaussuunnitelma, jossa käydään järjestelmällisesti läpi kaikki kohdat, jotka laitteiston täysimääräisessä testauksessa tulee huomioida. Ensisijaisesti on huolehdittava siitä, että testaussuunnitelmassa ja varsinaisen testauksen yhteydessä kaikki turvallisuusnormit tulevat täysimääräisesti huomioituiksi. Tämän jälkeen tärkeimmäksi kriteeriksi muodostuva laitteiston tuottaman mittausinformaation hyödynnettävyyteen liittyvät asiat eli on testattava sitä miten laitteiston päätarkoitus tulee täytettyä. Laitteiston käytettävyys ja huollettavuus ovat myös tärkeällä sijalla testaussuunnitelmassa. Muut tekijät voidaan jättää vähemmälle huomiolle.

Testaussuunnitelma on mahdollista laatia ajatuskarttapohjalta, jossa edetään keskellä olevasta osakokonaisuudesta reunoille päin jakamalla kokonaisuus osiinsa. Kokonaisuustestaukseen sisältyvä osakokonaisuudet ovat luokiteltavissa laitteiston kuljetukseen,

käyttöönottoon, mittaustehtävään ja tiedonsiirtoon. Nämä pääkohdat ovat jaettavissa edelleen pienempiin kokonaisuuksiin ja edelleen yksittäisiin toimintoihin. Suunnitelman pohjalta laaditaan kutakin osakokonaisuutta vastaavat hierarkkiset taulukot, jotka ovat käytettävissä myös testauspäiväkirjan rakenteen pohjana.

Laitteiston testaaminen on syytä toteuttaa mahdollisuuksien mukaan kronologisessa järjestyksessä, eli edeten testitapaus kerrallaan vaihe vaiheelta. Testauksen toteutuksessa demonstroidaan varsinaista mittaustehtävää, jotta kaikki mittaukseen liittyvät toimenpiteet tulevat varmasti huomioitua. Kukin vaihe käydään läpi erikseen ja kirjataan havainnot testauspäiväkirjaan. Poikkeamista on syytä tehdä erillinen asiakirja, jonka pohjalta tarvittavat muutokset järjestelmään ovat toteutettavissa.

Testaussuunnitelman ja testauksen toteutuksen yhteydessä voidaan luoda samalla myös alustavat käyttöohjeet mittaustehtävien toteuttamista varten. Lopullinen käyttöohje on laadittava erikseen normaalin mittaustoiminnan tarpeisiin. Mittauslaitteistoa tullaan jatkossa käyttämään myös oppilastyönä, joten seikkaperäiset ohjeet laitteiston turvallisuudesta ja oikeaoppisesta käytöstä on oltava aina saatavilla. Paperille tulostetut ohjeet liitetään mittausvaunuun ja lisäksi ne tallennetaan yliopiston palvelimille ladattavaksi elektronisessa muodossa. Näin lämpökaivomittauksiin ja laitteiston käyttöön on mahdollista perehtyä ennakkoon.

Järjestelmän koekäyttö aloitetaan paikoittamalla vaunu vaakatasoon tukijalkojen varaan. Laitteistoon kytketään jännite 3-vaiheisena vähintään 32 A voimavirtapistokkeella, joka on suojattu 25 A sulakkeella. Mikäli tarvitaan yli 11 kW lämmitysteho, on käytettävä vastaavaa 63 A pistoketta. Jos koekäyttö toteutetaan ilman lämpökaivoon kytkeyttä, liitetään järjestelmään PE-40 polyeteeniputkea tarkoituksenmukainen määrä. Vaunun ja lämpökaivon välille tarkoitetut eristetyt letkut liitetään puristusliitoksella polyeteeniputkiin ja vaunun takaosassa oleviin letkulähtöihin nokkavipuliittimillä.

Seuraavaksi järjestelmä täytetään lämmönsiirtonesteellä siten, että saavutetaan riittävä käyttöpaine. Täytön jälkeinen lähtöpaine pitää olla riittävän suuri, vähintään 100 kPa. Liian alhainen lähtöpaine voi nesteen jäähtyessä ja nesteen tiheyden muuttuessa johtaa käyttöpaineen liialliseen alenemiseen. Paisuntasäiliön tehtävänä on huolehtia siitä, että

järjestelmä pysyy paineellisena lämpötilan vaihtelusta huolimatta. Paineen ylärajana voidaan pitää 200 kPa. Mitä korkeampi paine on, sitä enemmän se rasittaa putkia ja liitoksia, joten korkeampia käyttöpaineita on syytä välttää. Paineen arvolla ei muutoin ole mittauksen tai koekäytön kannalta oleellista merkitystä. Pääasia on, että järjestelmä pysyy paineistettuna koko ajan.

Mittausjärjestelmä on varustettu varolaittein, joiden tehtävänä on ehkäistä liian suuren paineen muodostuminen järjestelmään. Käyttöhenkilöstön tehtävänä on huolehtia siitä, että järjestelmän paine asettuu täyttövaiheessa sopivalle tasolle. Tätä varten varaajaan on asennettu painemittari, josta paineen muodostusta voi seurata. Järjestelmän vetoisuus on 180 – 240 litran välillä. Viimeistään 150 litran täytön jälkeen on painemittarin lukemaa seurattava tiiviisti. Mikäli paine jostain syystä pyrkii nousemaan liian korkeaksi, tulee täyttöpumpun painekatkaisijan reagoida tilanteeseen katkaisten virransyötön täyttöpumpulle. Paineatkaisijan lisäksi järjestelmään on asennettu varoventtiili, joka avautuu paineen ylittäessä säädetyt avautumispaineen.

Täyttövaihe aloitetaan pumppaamalla lämmönsiirtonestettä täyttöastiasta järjestelmään. Täyttöastia on oltava sen verran tilava, ettei se järjestelmää täytettäessä ehdi tehokkaan täyttöpumpun toimesta tyhjentyä kokonaan. Lämmönsiirtonestettä on saatavissa valmiina 30 % tai väkevimpinä 60 % ja 90 % seoksina. Ennen täyttöpumpun käynnistämistä on varmistettava, että valmiiksi sekoitettua lämmönsiirtonestettä on täyttöastiassa riittävästi ja pumpun imuletkun pää on täyttöastian pohjalla. Lisäksi on varmistettava, että tyhjennysputken venttiili on suljettuna ja kaikki letkuliitokset asianmukaisesti liitettyinä. Varaajan päällä oleva 3-tieventtiili tulee olla käännettynä avoinna -asentoon, jolloin ilma pääsee nopeasti poistumaan järjestelmästä. Ilmausletkun vapaa pää tulee myös olla täyttöastiassa.

Täyttöastiaan kaadetaan lämmönsiirtonestettä lisää nestepinnan alenemisen myötä, kunnes mittausjärjestelmän täytyessä paine on riittävän korkeaksi. Täyttöpumpun virransyöttö kytketään tässä vaiheessa pois ja täyttöputken palloventtiili suljetaan. Varaajan päällä oleva 3-tieventtiili suljetaan. Tämän jälkeen loput järjestelmään jääneestä ilmasta poistuu ilmauskellon kautta, lämmönsiirtonesteen virtauksen myötä.

Kun järjestelmä on saatu alustavasti paineistettua, on varmistettava, että kaikki mahdollinen ilma saadaan poistettua. Lämmönsiirtonestettä kierrätettäessä nesteen mukana kulkee järjestelmään jäänyttä ilmaa. Varaajaan saavuttuaan ilma siirtyy ylöspäin säiliössä kertyen sen yläosaan. Ilma poistuu säiliöstä melko hitaasti ilmakellon kautta. Ilman poistuminen järjestelmästä saattaa kestää pitkäänkin, riippuen siitä miten hankaliin paikkoihin ilma on putkistossa jäänyt.

Lämmönsiirtonesteen kierrättämiseen käytettävän kiertovesipumpun pyörimisnopeus asetetaan taajuusmuuttajan avulla. Pumpun nimellispyörimisnopeus on 2900 r/min. Tuolla nopeudella pumppaus on kuitenkin niin tehokasta, että pyörimisnopeudeksi on syytä asettaa selvästi pienempi esim. 1000 r/min. Kierroslukua nostetaan tarpeen mukaan. Tilavuusvirtaa tarkkaillaan pumppauksen aikana vesimittarista tai tietokoneelta, josta mittaustiedot pitäisi olla luettavissa. Lämmönsiirtonestettä kierrätettäessä tulee varmistaa, että kaikki kiertopiiriin sisältyvät venttiilit ovat täysin avattuina. Venttiilit on oltava avattuina ennen kiertovesipumpun käynnistämistä, jotta paineiskut eivät vaurioita mittauslaitteistoa tai lämmönsiirtoputkistoa lämpökaivossa.

Varaajaan asennettuja sähkövastuksia kytketään päälle 1 kW vastaava tehonlisäys kerrallaan. Vastusten sähkötehoa mitataan järjestelmään asennetulla energiamittarilla. Kunkin vastuksen tehonlisäys tulisi näkyä portaana energiankulutuksen mittauksessa. Näin voidaan samalla tarkistaa, että kaikki vastukset ovat ehjiä. Lämpökaivoon upotetun polyeteeniputken kestävyys heikkenee merkittävästi lämpötilan noustessa. Kuumennuksen aikana on huolehdittava siitä, että nesteen lämpötila ei nouse korkeammaksi kuin 40 °C. Lämmönsiirtonesteen kierrätyksen aikana tarkistetaan myös, onko järjestelmässä korjattavia vuotoja. Jos vuotoja löytyy, ne on korjattava testauksen päätyttyä.

Kierrätyksen aikana tarkistetaan, että kaikki järjestelmään kytketyt anturit antavat luotettavia tuloksi. Ennen testauksen aloittamista lämpötila-anturit on syytä kalibroida tarkkuuslämpömittarista saatavia arvoja vastaaviksi. Kalibrointi tapahtuu asettamalla lämpötila-anturit ja tarkkuuslämpömittari tasaisessa lämpötilassa pysyvään nesteeseen. Jääveden lämpötila on hyvin tarkkaan 0 °C, joten se on yksi hyvä referenssi. Toinen vastaava mittaus toteutetaan samalla tavalla korkeammassa lämpötilassa. Mittauslähetimen tulokanavan asetusta muuttamalla, säädetään lämpötila-anturin mittausarvo vas-

taamaan tarkkuuslämpömittarista saatua lukemaa. Kalibroinnissa käytettävät referenssilämpötilat kannattaa valita lämpökaivossa vallitsevia lämpötiloja vastaaviksi, koska tällöin todelliset mittaustulokset saadaan mahdollisimman tarkkoina.

4. TOTEUTUKSEN ANALYSOINTI

4.1. Laitteiston yleisen käytettävyyden arviointi

Suunniteltu laitteisto (kuva 21) soveltuu hyvin tavoitteiden mukaiseen käyttöön ja täyttää ne suunnittelun lähtökohdat, jotka työtä aloitettaessa asetettiin. Järjestelmällä saavutetaan riittävässä määrin siirrettävyyteen, monipuoliseen tutkimukseen, järjestelmän skaalautuvuuteen ja langattomaan tiedonsiirtoon liittyvät tavoitteet.

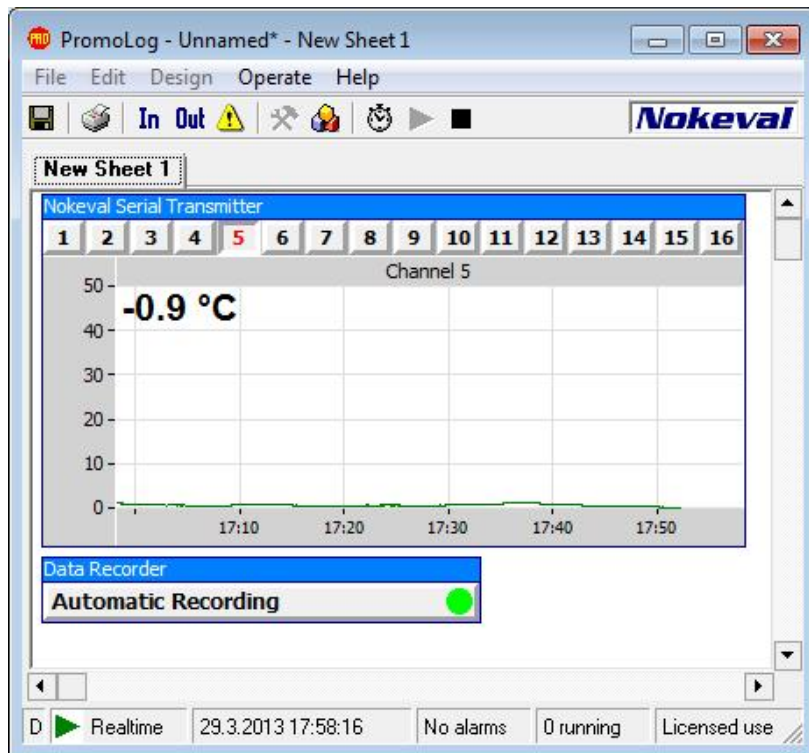
Turvallisuuteen liittyvät näkökohdat on pyritty ottamaan kaikin tavoin huomioon, niin sähkön käytön, paineastioita koskevien määräysten kuin tieliikenteeseenkin liittyvien asioiden osalta.



Kuva 21. Toteutettu TRT-vaunu. Kuvassa demonstroidaan porakaivon termisen vastetestin tekemistä, eristetyt lämmönsiirtoputket on liitetty kaivon putkistoon.

4.2. Mittaustulokset

Mittaustulosten analysoimista varten mittaustiedot tallennetaan mittaustietokoneelle yhteen tiedostoon. Tiedostoon tallentaminen toteutetaan PromoLog-ohjelman (kuva 22) tallennusmoduulilla (Data Recorder), johon määritellään mittaustietoa välittävät mittauslähettimet ja niistä halutut mittauskanavat. Käytössä olevasta RMD680 16-kanavainen mittauslähettimestä valitaan kanavat 1 – 6 ja 8 – 9, joista saadaan sähköenergian kulutus, virtausmäärä, lämpötilat lämpötila-antureilta (3 – 6) ja paineet paineantureilta (8 – 9).



Kuva 22. Promolog-ohjelma käynnissä, näytöllä kanava 5:n liitetyn lämpötila-anturin lukema. Data Recorder – moduuli tallentaa kanavakohtaiset tiedot asetusten mukaiseen ulkoiseen tiedostoon.

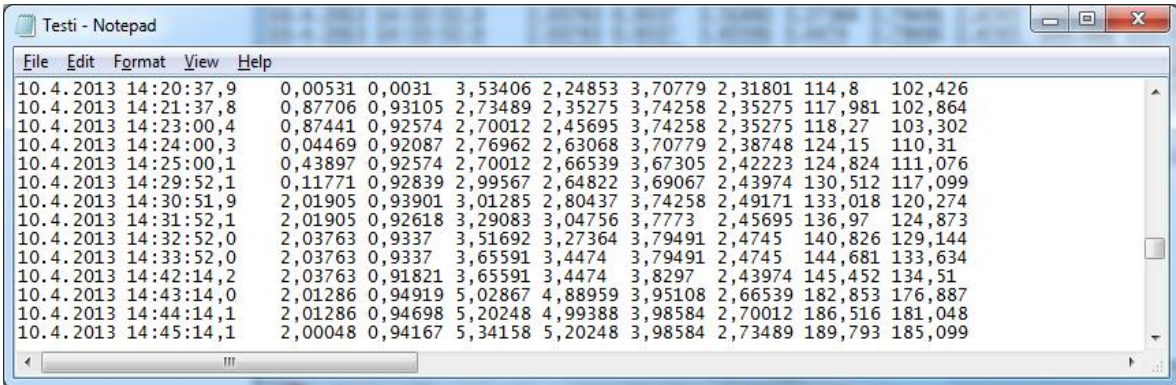
4.3. Mittaustietojen siirto työasemaan käsiteltäväksi

Mittaustiedot tallentuu automaattisesti PromoLog –ohjelman tallennusmoduulissa määritettyyn tiedostoon. Tiedoston siirto työasemaan voidaan toteuttaa joko sähköpostin liit-

teenä, kopioimalla tiedosto etäyhteyden avaamisen jälkeen työasemaan tai toteuttamalla automaattinen siirto hyödyntäen ajastettua FTP-tiedonsiirtopalvelua. Sähköpostiohjelmiston asentaminen mittaustietokoneelle on tarpeetonta. Kevein ja turvallisin tapa on automatisoida siirto FTP-palvelimen avulla.

4.4. Mittaustietojen tarkastelu

Mittauslaitteistoa ei sen toteutuksen yhteydessä ole testattu kenttäolosuhteissa. Laitteistosta on kuitenkin mitattu lämpötiloja, virtausnopeuksia, paine-arvoja ja sähkönkulutusta koekäytön aikaisesti. Lämpötila-antureille on haettu nollakohta jäävesihauteessa ja kalibroitu tätä vastaava arvo mittauslähettimeen.



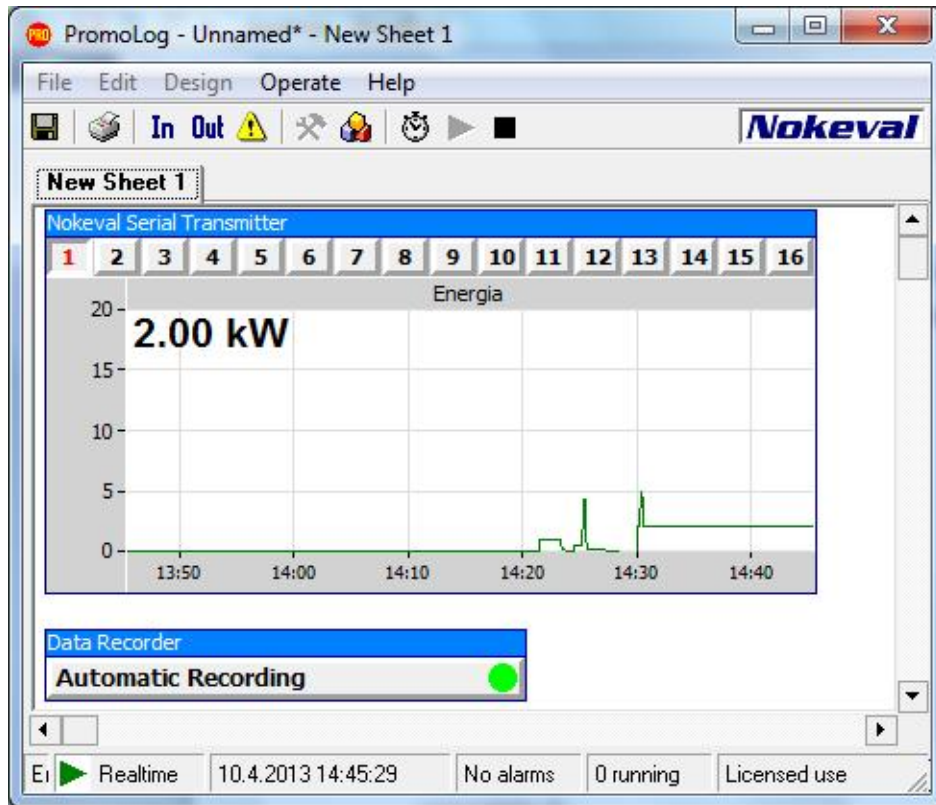
Time	1	2	3	4	5	6	7	8	9
10.4.2013 14:20:37,9	0,00531	0,0031	3,53406	2,24853	3,70779	2,31801	114,8	102,426	
10.4.2013 14:21:37,8	0,87706	0,93105	2,73489	2,35275	3,74258	2,35275	117,981	102,864	
10.4.2013 14:23:00,4	0,87441	0,92574	2,70012	2,45695	3,74258	2,35275	118,27	103,302	
10.4.2013 14:24:00,3	0,04469	0,92087	2,76962	2,63068	3,70779	2,38748	124,15	110,31	
10.4.2013 14:25:00,1	0,43897	0,92574	2,70012	2,66539	3,67305	2,42223	124,824	111,076	
10.4.2013 14:29:52,1	0,11771	0,92839	2,99567	2,64822	3,69067	2,43974	130,512	117,099	
10.4.2013 14:30:51,9	2,01905	0,93901	3,01285	2,80437	3,74258	2,49171	133,018	120,274	
10.4.2013 14:31:52,1	2,01905	0,92618	3,29083	3,04756	3,7773	2,45695	136,97	124,873	
10.4.2013 14:32:52,0	2,03763	0,9337	3,51692	3,27364	3,79491	2,4745	140,826	129,144	
10.4.2013 14:33:52,0	2,03763	0,9337	3,65591	3,4474	3,79491	2,4745	144,681	133,634	
10.4.2013 14:42:14,2	2,03763	0,91821	3,65591	3,4474	3,8297	2,43974	145,452	134,51	
10.4.2013 14:43:14,0	2,01286	0,94919	5,02867	4,88959	3,95108	2,66539	182,853	176,887	
10.4.2013 14:44:14,1	2,01286	0,94698	5,20248	4,99388	3,98584	2,70012	186,516	181,048	
10.4.2013 14:45:14,1	2,00048	0,94167	5,34158	5,20248	3,98584	2,73489	189,793	185,099	

Kuva 23. Koekäytön aikaiset mittaustiedot ovat tiedostoon tallentuneina. Mittausseuranta ei tässä tapauksessa ole ollut koko ajan käytössä.

Mittaustiedot tallentuvat automaattisesti ohjelmiston ohjaustiedoissa määriteltyyn tiedostoon. Myös aikaväli, kuinka usein mittaustiedot tallentimelta luetaan, on asetettavissa. Kuvan (23) mukaisessa tilanteessa luenta on tapahtunut ajastetusti minuutin välein, suuremmat aikaerot johtuvat testaajan aiheuttamista ohjelmakeskeytyksistä.

Lukuarvojen tarkkuus ylittää selvästi todellisen mittaustarkkuuden. Mittaustuloksia analysoitaessa on niiden merkitsevä tarkkuus virherajoineen huomioitava erikseen.

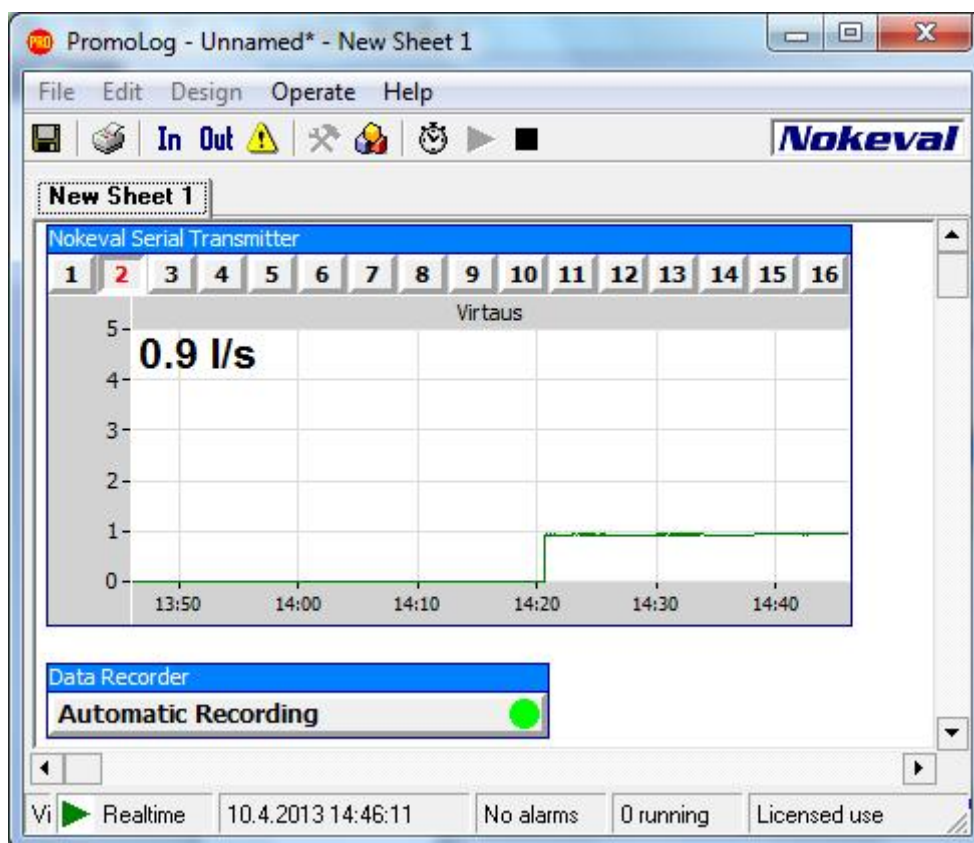
Kanavalta 1 saadaan sähkövastusten teho (kuva 24), joka pysyy vakiona koko mittauksen ajan. Sähköenergian kulutus lämmönsiirtonesteen kuumentamiseen lasketaan sähkötehon ja käytetyn ajan perusteella, mittaustietojen tulojen summana.



Kuva 24. Sähkötehon mittaus: klo 14:30 alkaen teho on ollut sähkövastuksen mukainen 2,00 kW.

Sähköteho saadaan mitattuna arvona pulssimuuntimen kautta, joka on kytketty energiamittariin. Pulssitiheys määräytyy vastusten sähkön kulutuksen mukaan. Mittamuunnin muuttaa pulssitiheyden jänniteviestiksi, jolloin energian kulutus ilmenee mittaustiedoissa sähkötehona (kuva 24).

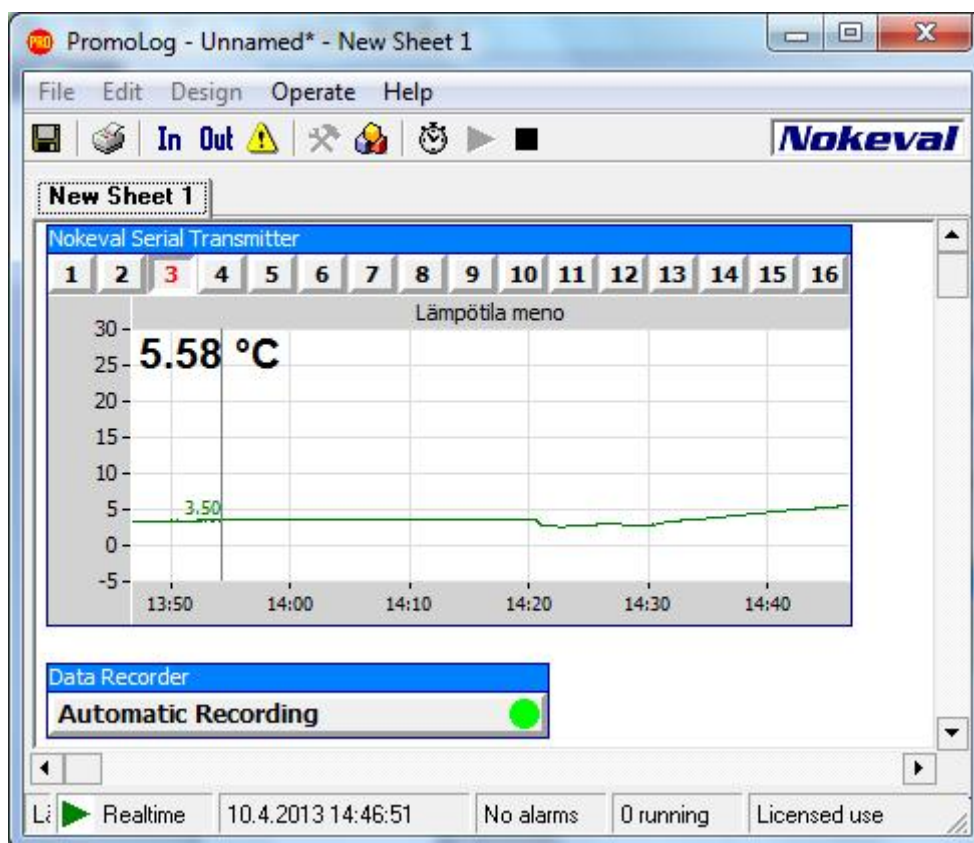
Sähköenergian kulutus tulee mittaustietoa analysoitaessa laskea keskimääräisenä mittauksen aikaerojen ja mitattujen sähkötehojen tulojen summana. Mittauksen aikaista sähköenergian määrää verrataan siihen energiamäärään, joka lämmönsiirtonesteen lämpövirtana laskennallisesti saadaan. Näiden arvojen tulisi, mahdolliset häviöt huomioiden, vastata toisiaan.



Kuva 25. Lämmönsiirtonesteen virtausmäärän mittaus: kiertovesipumppu on käynnistetty klo 14:20, jonka jälkeen virtausmäärä on ollut vakio 0,9 l/s.

Virtausmäärän mittaus (kuva 25) perustuu samanlaiseen mittamuuntimelta saatuun pulssitiheyden arvoon kuin sähköenergian mittauksessakin. Virtausmittarin pulssinopeus vastaa kuitenkin suoraan virtausmäärää, koska se perustuu virtausnopeuden mittamiseen tunnetun poikkipinnan läpi. Mittauksessa saadaan näin ollen suoraan virtauksen hetkellisarvo.

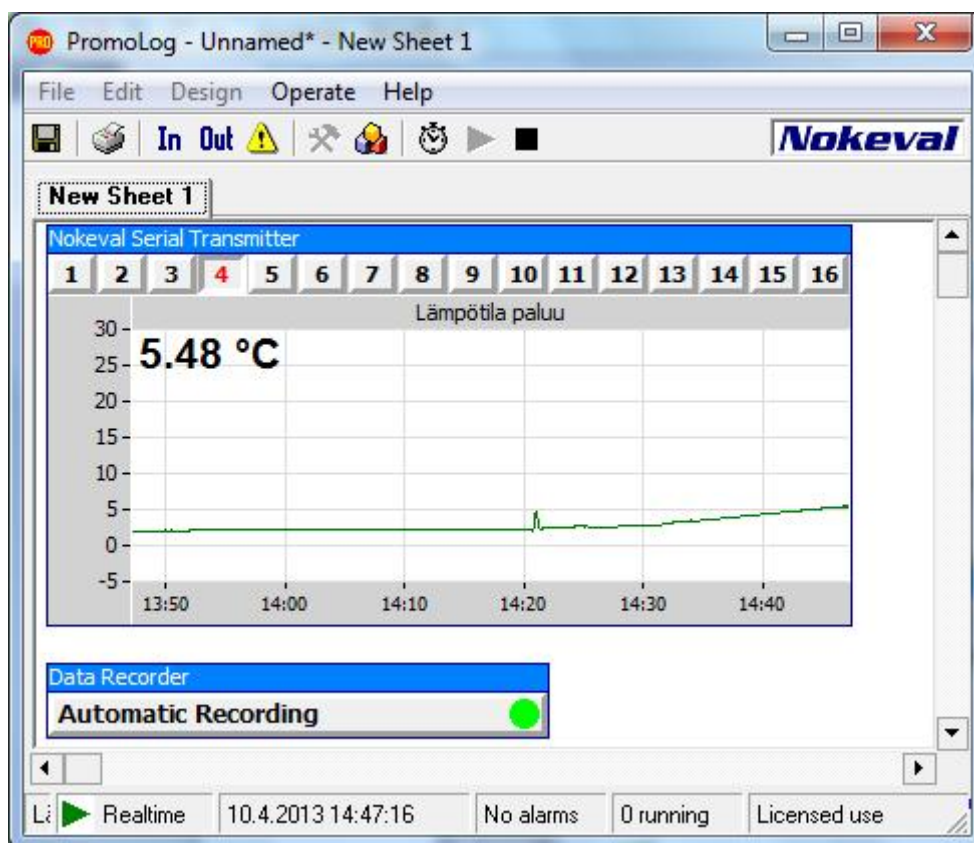
Lämmönsiirtonesteen virtausmäärän, sekä lähtevän ja palaavan virtauksen lämpötilojen perusteella, saadaan laskettua lämmönsiirtoihin luovuttaman lämpöenergian määrä. Tähän arvoon sisältyy myös lämmönsiirron aikana tapahtuneet lämpöhäviöt, joiden suuruutta on mittausolosuhteiden ja mittaustietojen perusteella mahdollisuus arvioida erikseen. Virtauksen mittaustietojen mukaan laskettu energiamäärä tulisi vastata mitattua sähköenergian kulutusta, koska molempiin pitäisi sisältyä samat lämmönsiirtohäviöt.



Kuva 26. Lämmönsiirtonesteen lämpötila. Sähkövastukset on kytketty käyttöön klo 14:30, jonka jälkeen lämpötila alkaa nousta.

Lähtevän virtauksen lämpötila (kuva 26) saadaan kuumavesivaraajan putkiliittimeen tai lämpökaivon putkiliitäntään asennettavasta lämpötila-anturilta. Jos jälkimmäinen vaihtoehto on käytettävissä, saadaan oikeampi arvo lämmönkiirtonesteen lämpötilalle, koska vaunun ja kaivon välisten putkiosuuksien lämpöhäviöt jäävät tällöin kokonaan pois laskennasta.

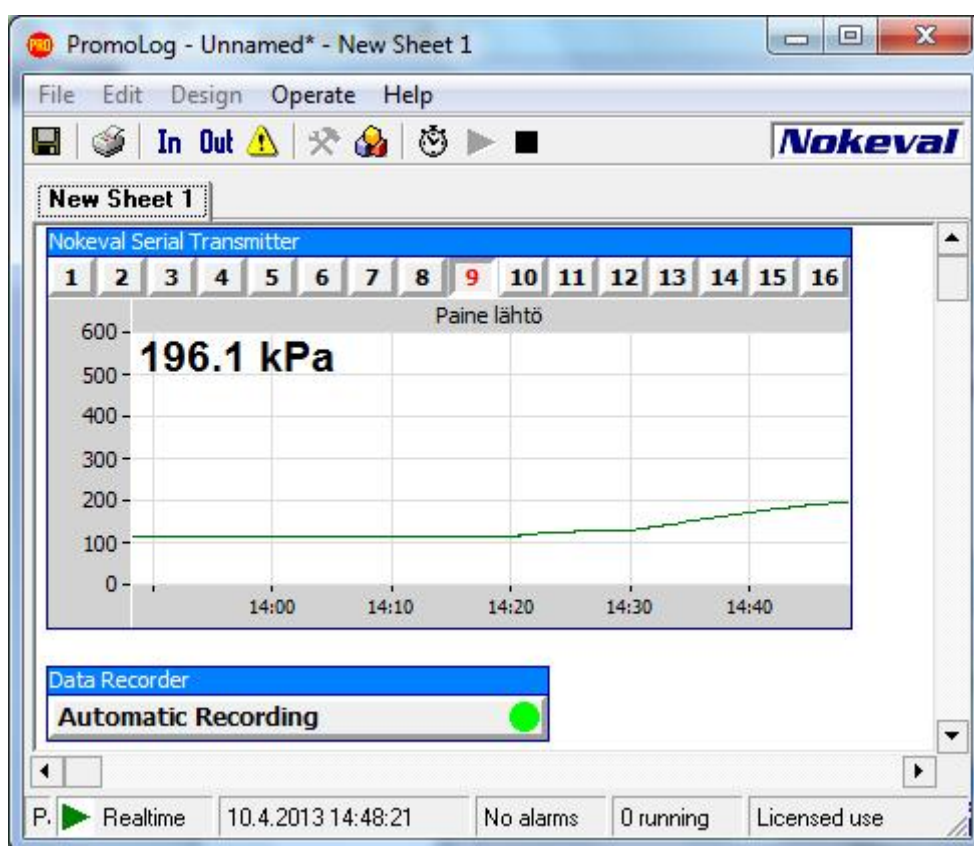
Lämmönsiirtonesteen lämpötila alkaa nousta kun vastukset ovat alkaneet kuumentaa lämmönsiirtonestettä. Muutos havaitaan mitatuissa arvoissa selvästi (kuva 26). Lähtölämpötila on ollut ennen kuumennusta 3,5 °C kun mittaushetkellä lämpötila on 5,6 °C. Lämpötila-anturin, vastukset ja mittausjärjestelmä toimivat näiden mittauksen mukaan normaalisti.



Kuva 27. Paluuvirtauksen lämpötila on lähes sama kuin lähtevän virtauksen lämpötila johtuen siitä, ettei lämmön kulutuskohdetta ole käytössä.

Laitteiston testaustilanteessa mittausletkut, jotka normaalisti mittauksen aikana on kytettyinä lämpökaivoon lähtevään putkistoon, liitettiin toisiinsa putkilenkillä. Mittausjärjestelmän testauksen yhteydessä varmistettiin näin myös letkuliitosten ja putkiston pitävyys paineenalaisena.

Lähtö- ja paluuvirtauksen osalta havaittiin mittausjärjestelmän testauksen yhteydessä 0,1 °C lämpötilaero (kuvat 26, 27). Todellisia lämpökaivoja mitattaessa lämpötilaero tulisi olla keskimäärin 3,0 °C, koska lämpöpumppujen mitoituksessakin käytetään kyseistä arvoa.



Kuva 28. Lähtevän virtauksen paineen havaitaan nousevan hieman, kun vastukset ovat alkaneet kuumentaa lämmönsiirtonestettä.

Paineantureilta, jotka on liitetty lämmönsiirtopiiriin meno- ja paluuputkeen, saadaan mitauskohdassa vallitseva paine (kuva 28) ja lämmönsiirtoputkiston aiheuttama dynaaminen painehäviö näiden arvojen perusteella.

Painearvoilla ei ole merkitystä geoenergiälähteen ominaisuuksien mittaamisessa. Näitä arvoja tarvitaan lähinnä poikkeustilanteiden hallintaan ja järjestelmän valvontaan. Painearvojen pitäisi, paisuntasäiliössä olevan nestemäärän ja putkivastusten puitteissa, pysyä tietyissä rajoissa. Jos poikkeavia painearvoja havaitaan, niin järjestelmässä on joko vuoto tai tukos, joka vaatii huoltotoimenpiteitä ja mahdollisesti mittauksen keskeyttämistä.

5. JOHTOPÄÄTÖKSET

5.1. Mittausjärjestelmän hyviä ja huonoja puolia

Mittausjärjestelmä soveltuu hyvin paikkoihin, joissa on riittävästi tilaa mittausvaunun liittämiseen geoenergialähteeseen. Toteutuksessa pyrittiin monipuoliseen, laaja-alaiseen ja joustavaan mittausjärjestelmän toteutukseen ja tämä tavoite saavutettiin hyvin. Järjestelmän kytkeminen ja käyttöönotto sujuu tehokkaan täyttöpumpun avulla nopeasti. Sähkötehon säädettävyys ja laajuus ovat riittävät suurtakin tehontarvetta vaativiin mittauskohteisiin. Virtausmäärän ja virtausnopeuden säädettävyyden vaatimus on huomioitu myös kiertovesipumpun mitoituksessa.

Mittausantureilta saatavat tiedot tallentuvat automaattisesti vaunuun asennettuun tietokoneeseen. Mittaustiedot ovat, käyttöoikeuksien puitteissa, etäyhteyttä käyttäen siirrettävissä mihin tahansa työasemaan.

Järjestelmän käytön turvallisuuteen on kiinnitetty erityistä huomiota. Kaikki turvallisuusnormit on pyritty ottamaan kaikin tavoin huomioon järjestelmän suunnittelussa ja toteutuksessa.

Vaunu vaatii suhteellisen paljon tilaa ja vähintään keskikokoisen henkilöauton perävauunun hinaamiseen. Ahtaissa tai vaikeasti saavutettavissa paikoissa tämä vaikeuttaa järjestelmän hyödyntämistä. Liitettäessä mittausvaunu tällaiseen kohteeseen, joudutaan mahdollisesti käyttämään pitkiäkin putkilinjoja. Tällöin häviöt varsinaisen energialähteen ja mittausvaunun välillä vaikuttavat haitallisesti mittaustietojen luotettavuuteen. Tyypilliset mittauskohteet kuten porakaivokentät ovat kuitenkin yleensä avoimessa maastossa, joten ongelmatilanteita tulee harvoin vastaan.

5.2. Kehittämistarpeet

Mittausjärjestelmän monipuolisuutta voidaan lisätä asentamalla vaunuun lisäksi lämpöpumppu ja puhallinlauhdutin, jolloin mittaustapa saadaan vastaamaan normaalia lämpöpumpun käyttöä. Tästä ominaisuudesta on hyötyä erityisesti silloin, kun on tarve arvioida kallioperän lämmönvarastointikykyä tai selvitetessä pohjavesivirtausten vaikutusta lämmönsiirtoon kallioperässä. Toisaalta samalla järjestelyllä saadaan luotettavammin arvioitua esimerkiksi vesistölämmönvaihtimen energiantuottokykyä, lämpöä luovuttavan massan vaihtuessa virtauksen myötä jatkuvasti.

Mittausanturien tarkkuutta voitaisiin jossain määrin parantaa. Nykyisellään anturit ovat kolmijohtimisia, johtuen siitä, että valittu mittauslähetin edellyttää kolmijohdinjärjestelmää. Kolmijohdinjärjestelmää käyttäen saadaan osittain kompensoitua mittausjohtimien vastuksista aiheutuvat virheet. Parempaan tarkkuuteen päästäisiin käyttämällä nelijohdinkytkentää ja tällaista järjestelmää tukevaa mittauslähetintä. Nelijohdinkytkennällä olisi mahdollista kompensoida kaikki mittausjohtimien vastuksista aiheutuvat mittausvirheet. Vaihtoehtoisesti voitaisiin käyttää langattomia antureita. Näissä mittausjohtimet ovat hyvin lyhyitä, tällöin mittausjohtimiin indusoituvien sähkömagneettisten häiriöiden vaikutuskin jää vähäiseksi.

Tiedonsiirto mittautietokoneesta työasemaan voitaisiin ohjelmallisesti automatisoida ajastetuksi toiminnoksi, mutta saavutettava hyöty olisi kuitenkin melko marginaalinen. Nykyisellään tiedonsiirto tapahtuu noutamalla mittausdata etäyhteydellä mittautietokoneesta. Tämä prosessi voitaisiin automatisoida siten, että työasema ottaisi automaattisesti yhteyden mittautietokoneeseen ja siirtäisi mittautiedot aikaleimalla varustettuna työasemaan ennalta määritelyyn tiedostokansioon.

Kopillisen mittausvaunun ulkoseiniin voitaisiin lisätä markkinointityyppisiä maalauksia tai teippauksia. Näin olisi mahdollista kiinnittää asiasta kiinnostuneiden huomio kyseiseen mittauslaitteistoon ja tutkimusyksikköämme kohtaan. Markkinoinnin myötä syntyvä kiinnostus saattaisi johtaa uusiin asiakassuhteisiin ja yhteistyöhön eri geoenergia-hankkeissa. Vaunuun liitetystä informaationvälityksestä tulisi ilmetä yhteystiedot, laitteiston käyttötarkoitus ja geoenergian hyödynnettävyys eri käyttötarkoituksiin.

5.3. Yleisarvio työn onnistumisesta

Mittausjärjestelmän toteutus onnistui odotusten mukaisesti. Paineastioiden turvallisuuden osalta jouduttiin tekemään selvitystyötä sen osalta, tarvitaanko hyväksyntää paineastioiden tarkastuslaitoksilta. Tarkempi turvallisuusnormien läpikäynti lämmönsiirtonesteen lämpötilojen ja paineiden osalta osoitti, että tällaiseen käytäntöön ei ole tarvetta vaan riittää, että laitteisto on kaikilta osiltaan toteutettu hyvää konepajakäytäntöä noudattaen.

Laite on suhteellisen vähällä vaivalla kytkettävissä geoenergialähteeseen ja sähköverkkoon. Järjestelmän täyttö on täyttöpumppua käyttäen mahdollista mittauspaikalla, kun käytössä on riittävästi kyseiseen kohteeseen soveltuvaa lämmönsiirtonestettä. Kierto-vesipumpun nopeuden asetus taajuusmuuttajan avulla sopivalle tasolle onnistuu melko helposti. Liiallisen ylipaineen välttämiseksi pumpun pyörintänopeus on syytä kuitenkin asettaa alustavasti alhaiselle tasolle ja lisätä pyörimisnopeutta tarpeen mukaan virtausmittarilta saadun lukeman perusteella.

Mittautietojen kerääminen tietokoneelle edellyttää tietokoneen liittämistä mittausjärjestelmää ja mittautietoja keräävän ohjelmiston käynnistämistä. Lisäksi tulee käynnistää etäyhteysohjelmiston palvelin langatonta tiedonsiirtoa varten. Etäyhteyden toteuttamiseen käytetään langattomaan yhteydenpitoon soveltuvaa reititintä. Testauksessa kokoonpano toimi, reitittimen ohjelmistopäivityksen jälkeen, moitteettomasti.

Kokonaisuuden osalta ei ole tässä vaiheessa tullut esiin puutteita järjestelmän suunnittelussa, toteutuksessa tai käytettävyydessä. Mittauksia todellisessa ympäristössä ei ole päästy vielä tekemään, joten kokemukseräistä tietoa mahdollisista puutteista ei ole tällä hetkellä käytettävissä. Demonstroitu mittaus tilanne ei kuitenkaan antanut viitteitä siitä, että olisi odotettavissa ongelmia todellisessa mittauskäytössäkään.

6. YHTEENVETO

Maan- ja vesistöjen alaisten matalaenergisten lämmönlähteiden hyödyntäminen energiantuotannossa ja -varastoinnissa edellyttää mittauksia, joiden perusteella voidaan energialähteen soveltuvuus eri käyttötarkoituksiin selvittää mahdollisimman hyvin. Käytettäessä lämpöpumpputekniikkaa lämmöntuotannossa, on tunnettava lämmönsiirtoon liittyvät lähtökohdat. Erityisesti on huomioitava lämmönjohtokyky ja ominaislämpökapasiteetti, kun kyse on johtumiseen perustuvasta lämmönsiirrosta. Paikallisesti lämmönsiirtoon vaikuttaa lisäksi lämmön kulkeutuminen massavirran mukana, esimerkiksi pohjavesivirtausten osalta.

Laaja-alainen matalaenergisten geoenergialähteiden tutkimus edellyttää mittauskalustoa, jolla on mahdollista tutkia hyvin erityyppisiä ja kokoisia lämmönlähteitä. Geoenergialähteiden geologinen rakenne voi vaihdella paikkakunnittain hyvin paljon koostumukseltaan ja rakenteeltaan. Näiden muuttujien lisäksi porakaivoja on mahdollista tehdä eri syvyyteen maan alle, jolloin putkipituudet ja mittauksissa käytettävä tehon tarve vaihtelee kohteittain merkittävässä määrin.

Mittauskalusto voi koostua lämmönsiirron ja lämpötilajakauman mittaamiseen soveltuvasta laitteistosta. Lämpötilajakauman tehokkain nykyaikainen mittaustapa perustuu putkistoon tai sen ympäristöön sijoitettavaan valokuituun, jonka lämpötilat saadaan parhaimmillaan mitattua yhden metrin välein kuidun koko pituudelta. Lämmönsiirtoon perustuvassa mittauksessa energialähteestä joko otetaan lämpöä tai sinne viedään lämpöä ja näissä yhteyksissä tutkitaan nestevirtaukseen perustuen lämmönsiirron tehokkuutta energialähteestä tai energialähteeseen.

Termisellä vastetestillä mitataan energialähteen kykyä ottaa lämpöä vastaan. Riippuen energialähteen luonteesta, se voi joko varastoida lämpöä tai siirtää lämpöä pois lämmönsiirtoputkiston ympäristöstä. Kallio- ja maalämpöön perustuvissa ratkaisuissa lämpöä voidaan varastoida ympäröivään ainekseen, mikäli maa- tai kallioperä on tarpeeksi kiinteä, jolloin lämpö kulkeutuu lämmönsiirtoputkiston ympäristöön pelkästään johtamalla. Energialähteet, joissa lämmönsiirto perustuu massavirran kulkeutumiseen, eivät

sovellu lämmön varastointiin. Niiden osalta on mahdollista mitata vain lämmönvaihdon tehokkuutta.

Laaja-alaiseen ja monipuoliseen termisen vastetestin tekemiseen ei ole saatavissa kaupallisia laitteistoja, jotka omaisivat riittävän kapasiteetin ja muunneltavuuden erityyppisten energialähteiden tutkimukseen. Työn tarkoituksena oli kehittää Vaasan Yliopiston energiatekniikan tutkimustyöhön soveltuva mittauslaitteisto, jonka avulla saatuja tuloksia pyritään hyödyntämään myös lämmönsiirtolaitteistojen kehitystyössä.

Riittävän kapasiteetin ja laitteiston siirrettävyyden varmistamiseksi hankittiin tilava eristetty perävaunu, johon mittauksiin soveltuva laitteisto olisi mahdollista sijoittaa. Laitteet hankittiin tarjousten perusteella eri toimittajilta. Suunnitelman mukaisina peruskomponentteina olivat sähkövastuksin varustettu kuumavesivaraaja, paisuntasäiliö, kiertovesipumppu, virtausmittari, täyttöpumppu sekä putkisto venttiileineen. Turvallisuuden varmistamiseksi järjestelmään asennettiin lisäksi ylipaineventtiili ja painekatkaisin täyttöpumpun yhteyteen.

Laitteiston sijoittelussa vaunun sisään on pyritty ottamaan huomioon kuljetuksen aikaiset dynaamiset voimavaikutukset. Etanoli aiheuttaa korroosiota, joten laitteet on kiinnitetty haponkestävin teräslevyin, haponkestävin pultein ja kuumasinkityin teräsruuvein tukevasti vaunun lattiaan. Lujuuslaskelmien mukaan suunnitelman mukaiset kiinnitykset ylittävät selvästi kuorman kiinnitykselle asetetut tieliikennelain mukaiset vaatimukset.

Koska laitteistolta vaaditaan erittäin suurta käyttövarmuutta, päädyttiin ratkaisuun jossa mittauslaitteisto saa käyttöenergiansa joko valtakunnallisesta sähköverkosta tai ulkopuolisesta polttomoottorikäyttöisestä aggregaatista. Sähkökeskuksessa olevilla kytkimillä valitaan tarkoitukseen sopiva lämmitysteho 1 – 18 kW:n väliltä. Kiertovesipumpun pyörintänopeus on asetettavissa taajuusmuuttajalla halutuksi. Näin lämmönsiirtonesteen tilavuusvirta on säädettävissä tarpeen mukaan.

Mittaustekniikan osalta päädyttiin ratkaisuun, jossa käytetään mittauslähetintä joka sisältää RS-485 sarjaliikenneväylän. Mittausanturit liitetään tähän lähettimeen, joko suo-

raan tai erillisten mittamuuntimien kautta. Lämpötila-anturit liitetään lähettimeen suoraan. Pulssianturin sisältävät laitteet, kuten sähköenergiamittari ja virtausmittari, liitetään mittauslähettimeen erillisen mittamuuntimen kautta, joka muuttaa pulssimäärät virta- tai jänniteviestiksi. Mittamuuntimien ja mittauslähettimen kanavat kalibroidaan vastaamaan todellisia mitattavia arvoja. Lämpötila-antureiden osalta kalibrointi tehdään jäävesihauteessa ja tarkkuuslämpömittarista saatavalla lämpötila-arvolla.

Mittaustietokone, johon mittauslähetin on RS-485/USB-muuntimen kautta kytketty, lukee ohjelmallisesti tiedot mittauslähettimeltä ja tallentaa ne tiedostoon tietokoneen kiintolevylle. Tiedosto on siirrettävissä langattoman etäyhteyden kautta työasemaan, tulosten analysointia varten.

Järjestelmän testaus, demonstroimalla todellista mittaustapahtumaa, osoitti että järjestelmä toimii toivotulla tavalla kaikilta osiltaan. Mittausvaunun kytkeminen energialähteeseen ja todellisten mittausten tekeminen tulee osoittamaan mahdolliset puutteet ja parannuksia vaativat kohdat laitteistossa. Järjestelmää on tarkoitus laajentaa lämpöpumppuratkaisulla, jolloin terminen vastetesti voidaan toteuttaa molempiin suuntiin. Tällöin saadaan mahdollisimman tarkkaa tietoa energialähteen soveltuvuudesta haluttuun käyttötarkoitukseen.

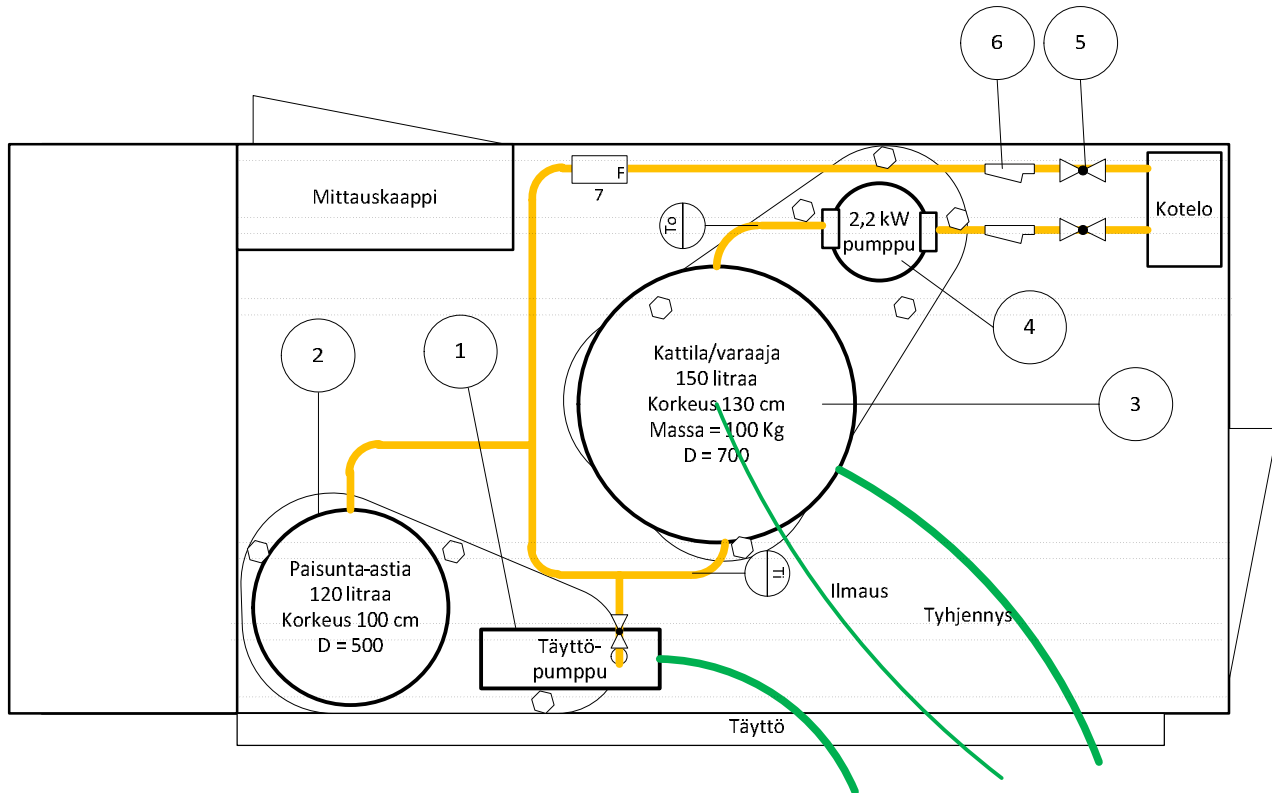
LÄHDELUETTELO

- Banks, David. (2009). *An Introduction to Thermogeology Ground Source Heating and Cooling*. Blackwell Publishing. ISBN 978-1-4051-7061-1.
- Cengel, Yunus A. (2002). *Heat Transfer: A Practical Approach*. 2. painos. 932s. McGraw-Hill, New York, USA. ISBN 0-07-245893-3.
- Glassley, William. E. (2010). *Geothermial Energy, Renewable Energy and the Environment*. CRC Press Taylor & Francis Group, LLC. ISBN 978-1-4200-7570-0.
- Helström, Göran. (2011). *Advance Thermal Response Testing and Its Relevance to Complex UTES Arrays*. Neo Energy Sweden Ltd, 2011. Saatavana Internetistä: <URL:http://www.gshp.org.uk/GroundSourceLive2011/GoranHellstrom_UTES_gsl.pdf>
- Juvonen, Janne (toim.). (2009). *Lämpökaivo. Maalämmön hyödyntäminen pientaloissa*. Suomen Ympäristökeskus (SYKE). Ympäristöopas 2009. Saatavana Internetistä: <URL:<http://www.ymparisto.fi/download.asp?contentid=108597&lan=fi>>. ISSN (online) 1796-167X. ISBN (PDF) 978-952-11-3531-6.
- Kaltschmitt, Martin., Streicher, Wolfgang & Wiese, Andreas. (2007). *Renewable Energy*. Springer Berlin Heidelberg New York. 564s. ISBN 978-3-540-70947-3.
- Kauppa- ja teollisuusministeriö (KTM). (1999). *Päätös painelaitelaista*. Saatavana Internetistä: <URL:<http://www.finlex.fi/fi/laki/smur/1999/19990938>>.
- Kuisma, Petri. (2013). *Lämpöpumput lämmitysjärjestelminä*. Saatavana Internetistä: <URL:<http://www.lapinenergianeuvonta.fi/wp-content/uploads/2013/07/Kemi-16-5-2013-Lämpöpumput-lämmitysjärjestelminä-P.-Kuisma.pdf>>. Lapin Energianeuvonta.

- Lappeenrannan Teknillinen Yliopisto (LYT). (2007). *Hydrauliteknikka*. Mekatroniikan peruskurssi, kevät 2007. Konetekniikan osasto. Saatavana Internetistä: <URL:<https://noppa.lut.fi/noppa/opintojakso/bk60a0001/lisatty/hydrauliteknikka.pdf>>
- Leppäharju, N. (2008). *Kalliolämmön hyödyntämiseen vaikuttavat geofysikaaliset ja geologiset tekijät*. Pro Gradu tutkielma, Oulun Yliopisto. Oulu.
- Mäkiranta, Anne. (2013). *Distributed Temperature Sensing Method - Usability in Asphalt and Sediment Heat Energy Measurements*. Diplomityö, Vaasan Yliopisto. Vaasa.
- Pynnä, Kari., Suominen Matti & Lammi Kalervo. (1984). *Autotekniikan Käsikirja, Sähkölaitteet*. Painokaari Oy, Helsinki. ISBN 951-30-5215-X.
- Uponor Oy, tiedotteet. (2012). *Käyttövesi / Suunnittelu*. Saatavana Internetistä: <URL:<http://www.uponor.fi/ratkaisut/talotekniikka/pex-kayttovesi/suunnittelu.aspx>>
- White, Frank. M. (2008). *Fluid Mechanics*. Kuudes painos. 864 s. ISBN 978-0-07-293844-7. Mc Graw Hill, Higher Education. 2008. New York.
- Witte Dr. H.J.L. (2001). *Geothermal Response Tests with Heat Extraction and Heat Injection: Examples of Application in Research and Design of Geothermal Ground Heat Exchangers*. Saatavana Internetistä: <URL:<http://www.groenholland.nl/download/Lausanne-Witte.pdf>>
- Yang H., Cui P. & Fang Z. (2010). *Vertical borehole ground coupled heat pumps: A review of models and systems*. Applied Energy. Vol. 87 (2010). Elektroninen Artikkel. Saatavana Internetissä: <URL:<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261909001743#>>

LIITE 1

TRT – vaunu, alustava layout-piirros

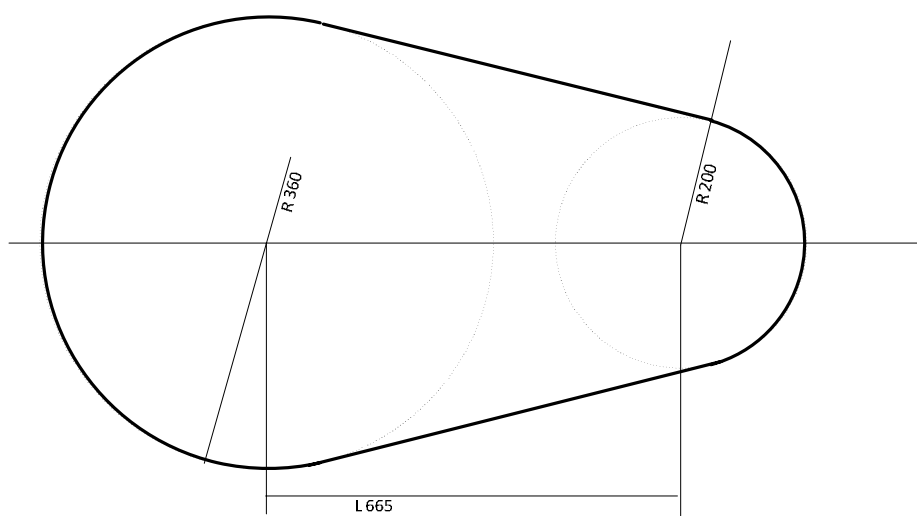
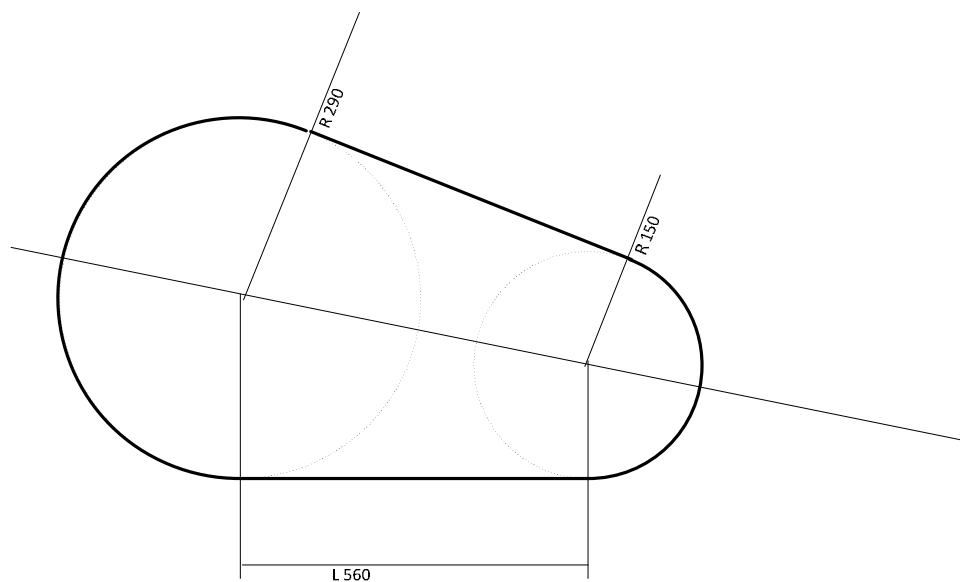


Pääkomponentit:

1. Täyttöpumppu, keskipakoispumppu, Xylem Oy, Lowara 4HMS7T
2. Paisunta-astia, Pumppulohja, LOHJA 120 L / 10 bar KPSV EN1.4404
3. Kuumavesivaraaja, Akvaterm, HST-150L, 6 bar (räätälöity)
4. Paineenkorotuspumppu, Xylem Oy, Lowara 10SV05N022T laipoin
5. Palloventtiili 1", 3 kpl, messinkinen, kupariputkiyhtein, juotettava
6. Mudanerotin / mutasihti, 1", 2 kpl, kupariputkiyhtein, juotettava
7. Virtausmittari 1", 1 kpl, pulssianturilla 1 l/pulssi.
8. PT-100 prosessianturiliitännät (messinkiseen T-haaraan)
9. Koteloon (ei numeroitu) tulee nokkavipuliittimet sovitteineen

LIITE 2

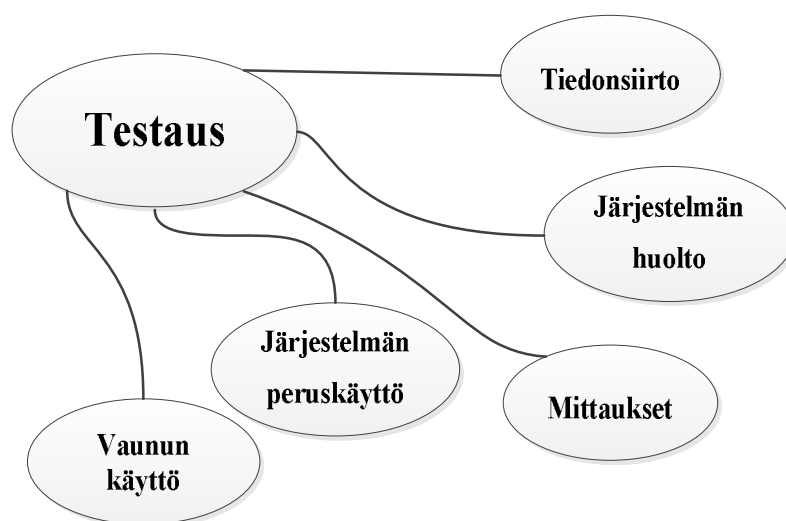
Levyaihiot laitteiston kiinnittämiseksi perävaunun lattiaan:



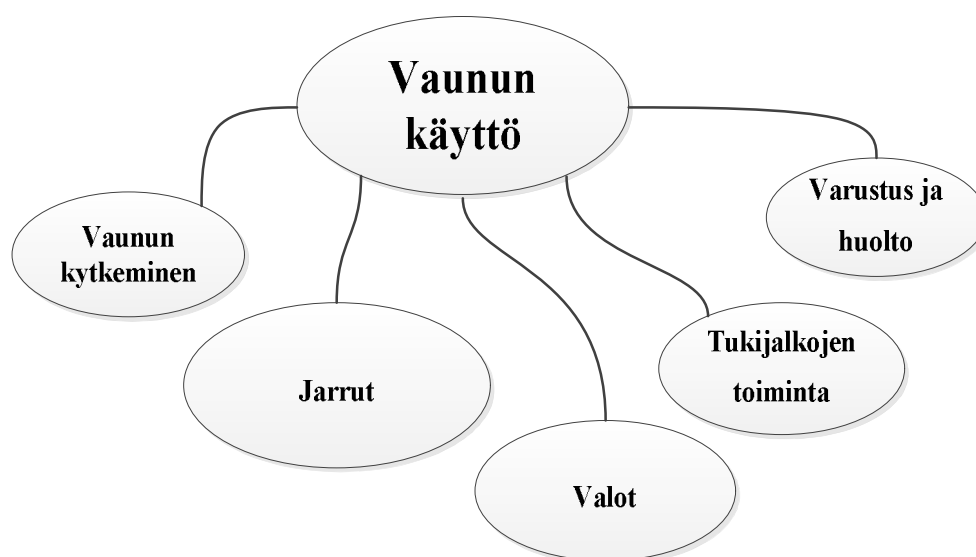
LIITE 3

Testaussuunnitelman rakenne ajatuskarttoina:

Testaukseen sisällytettävät kokonaisuudet:



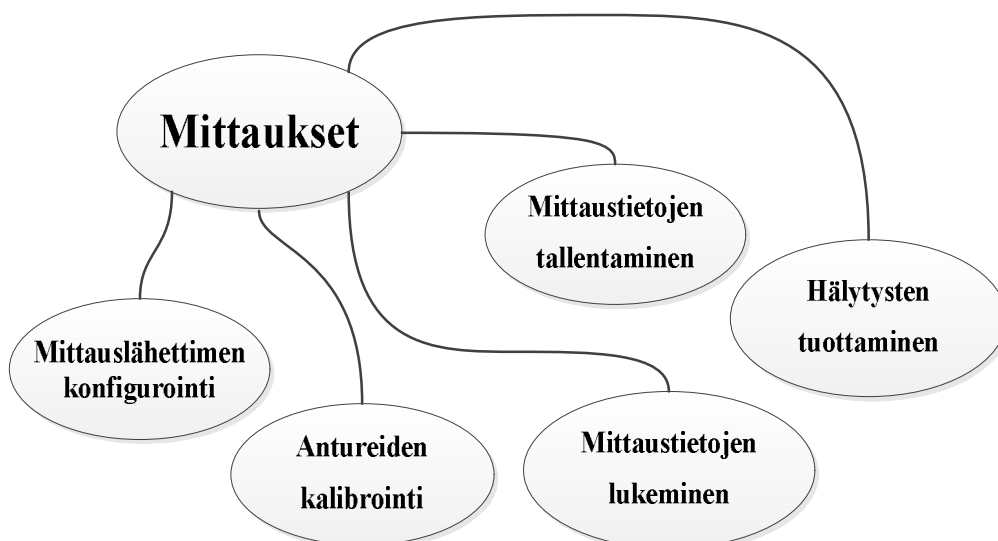
Liikennekäytön osalta testattavat kokonaisuudet:



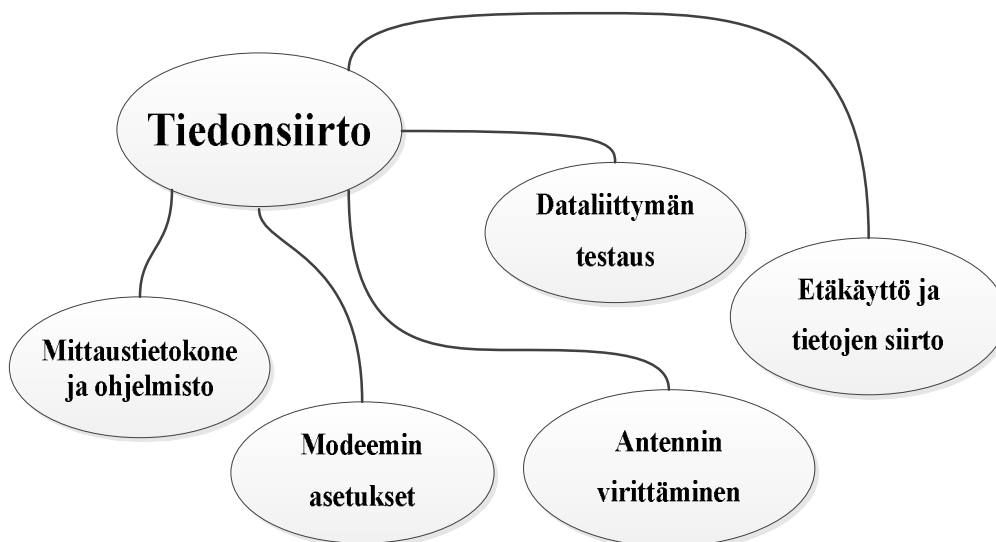
Järjestelmän käyttöön liittyvät mittauspaikalla suoritettavat tehtävät:



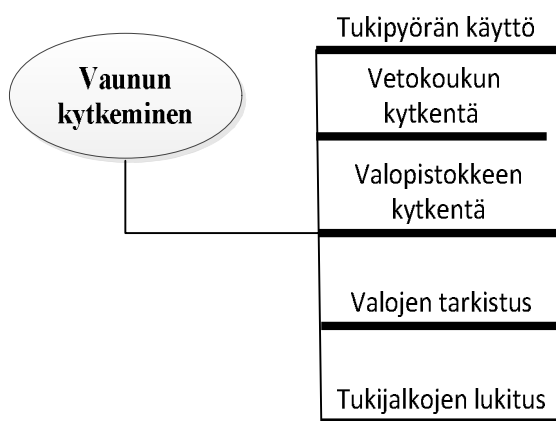
Mittaustietojen käsittelyyn liittyvät tehtävät:



Tiedonsiirtoon liittyvät tehtävät:



Toimintokohtainen erittely, esim. vaunun kytkeminen vetoautoon:



Toimintokohtaisen erittelyyn perustuen on laadittavissa yksityiskohtainen testauspäiväkirja ja/tai ohjeistus järjestelmän käytöstä.