



HYDRAULINEN MALLINTAMINEN JA ALUEMITTAUSJÄRJESTELMÄ KOEVESIJOHTOVERKOSTOSSA

Koulutusala Tekniikan ja liikenteen ala			
Koulutusohjelma Ympäristötekniikan koulutusohjelma			
Työn tekijä Jari Puurunen			
Työn nimi Hydraulinen mallintaminen ja aluemittausjärjestelmä koevesiverkostossa			
Päiväys	1.6.2015	Sivumäärä/Liitteet	58/2
Ohjaajat yliopettaja Pasi Pajula ja lehtori Teemu Räsänen			
Toimeksiantaja/Yhteistyökumppani Savonia-ammattikorkeakoulun Ympäristötekniikan opetus- ja tutkimusyksikkö			
<p>Tiivistelmä</p> <p>Vesihuoltolaitosten pyrkimys lähes reaaliaikaiseen vesienhallintaan luo tarpeita uusien laitteistojen ja menetelmien kehittämiseksi. Tämä opinnäytetyö liittyy Water-M-hankkeeseen, jonka kansallinen rahoitus on koordinoitu Tekesin kautta. Osana Savonian Water-M työpakettia tullaan hyödyntämään olemassa olevaa koevesijohtoverkostoa, jota kuitenkin on muutettava vastaamaan tutkimuksen tarpeita. Työssä tehtiin myös verkoston hydraulinen malli Epanet-ohjelmistolla sekä perehdyttiin kirjallisuustutkimuksena aluemittausjärjestelmän suunnitteluun ja rakentamiseen. Tavoitteena oli saada hydraulisen mallin tarkkuus niin hyväksi, että se kuvaa verkoston virtaustilaa luotettavasti.</p> <p>Opinnäytetyön kirjallisuustutkimusosiossa perehdyttiin vesijohtoverkoston aluemittausjärjestelmään ja vesijohtoverkoston hydrauliseen mallintamiseen. Aluemittausjärjestelmän pääasiallinen tarkoitus on vesijohtoverkoston vuotovesiin liittyvän sijaintitiedon kasvattaminen ja vuotavien vesimäärien hallinta. Työn tutkimusosio alkoi koevesijohtoverkoston tehtävien muutostöiden seuraamisella, jonka jälkeen koevesijohtoverkoston toimivuutta päästiin testaamaan. Mittausjärjestelmä vaati lukuisia toimenpiteitä käyttöönottoaiheessa, kuten sensorien toiminnan todentaminen, pumppauksen toiminnan määrittelyn ja muiden verkoston hydraulikkaan vaikuttavien tekijöiden tunnistaminen. Hydraulisen mallintamisen osalta tehty työ keskittyi olemassa olevan mallin kehittämiseen muutostöitä vastaavaksi. Erityisesti paneuduttiin paikallishäviöiden ja pumppauksen mallintamiseen sekä mallin kalibrointiin ja validointiin pilot-verkostosta saatavan paine- ja virtaamamittaustiedon perusteella.</p> <p>Työn tuloksena Savonia-ammattikorkeakoululla on nyt toimiva aluemittausjärjestelmä koevesijohtoverkostossaan. Järjestelmän avulla Water-M -hanketta voidaan tulevaisuudessa viedä eteenpäin.</p>			
Avainsanat DMA, vesijohtoverkosto, epanet, aluemittausjärjestelmä, vuotovedet, paineenhallinta, mallintaminen			

Field of Study Technology, Communication and Transport			
Degree Programme Degree Programme in Environmental Technology			
Author Jari Puurunen			
Title of Thesis Hydraulic Modeling and District Metering Area in a Test Water Network			
Date	1 June 2015	Pages/Appendices	58/2
Supervisors Mr. Pasi Pajula, Principal Lecturer and Mr. Teemu Räsänen, Lecturer			
Client Organisation /Partners Savonia University of Applied Sciences			
<p>Abstract</p> <p>The development in real-time water control systems and waterworks creates a need to create new technologies. For that reason a project called Water-M was established the goals of which were the basis of this thesis. The goal of this thesis was to create an apparatus for the test water network at Savonia University of Applied Sciences which enables the use of a district metering area (DMA) in pilot scale. The work also included the making of a hydraulic model of the network with the Epanet program and a study on planning and constructing a district metering area. The aim was to get the hydraulic model to work so well that it resembles the state of the network reliably.</p> <p>The first part of the thesis was to study literature about how a district metering area works inside a water network and what is the process of planning and constructing a DMA. The main purpose of a DMA is to prevent, control and locate leakages inside water networks. The study part of the thesis began by following and documenting the changes that were made in the water network. After the changes had been done, the testing of the functioning of the water network began. The initializing of the system demanded several operations such as testing the workability of the sensors, defining of the variables of the pump and identifying all of the other factors that have an impact on the hydraulics of the test water network. The work on hydraulic modelling focused on upgrading the already existing model to match the changes that had been made in the network. The work focused especially on modelling the local pressure losses and pumping station as well as the calibration and validation of the model based on the pressure and flow measurements from the pilot-water network.</p> <p>As a result of this thesis Savonia University of Applied Sciences has now a working district metering area system in the test water network. With the results of the thesis the Water-M project can be developed further.</p>			
<p>Keywords</p> <p>DMA, water network, epanet, district metering area, water leakage, pressure management, modelling</p>			

SISÄLTÖ

1	JOHDANTO	6
2	VESIJOHTOVERKOSTON ALUEMITTAUSJÄRJESTELMÄ	7
2.1	Aluemittausjärjestelmän toimintaperiaate	7
2.2	Aluemittauksen hyödyt ja tarve vesijohtoverkoissa	9
2.3	Aluemittausjärjestelmän suunnittelu ja toteutus	11
2.3.1	DMA:n koko	11
2.3.2	Aluemittausjärjestelmän vaikutus verkostoveden laatuun	12
2.3.3	Aluemittauksen kiinteistömäärä ja rajojen määrittäminen	12
3	VESIJOHTOVERKOSTON VIRTausmallinnus	15
3.1	Vesijohtoverkoston hydraulisen mallinnuksen teoreettiset perusteet	15
3.2	Virtausmallinnuksen vaiheet ja ohjelmistot	17
4	KOEVESIJOHTOVERKOSTO	19
4.1	Koevesijohtoverkoston kuvaus	19
4.2	Koevesijohtoverkoston varusteet	19
4.3	Mittareiden kalibrointi	21
4.4	Mittaritestaukset ja validointi	23
4.4.1	Paineanturit	23
4.4.2	Paineanturien tarkkuus	24
4.4.3	Virtausmittareiden tarkkuus ja kalibroiminen	25
4.4.4	Virtausmittarien tarkkuus	25
5	KOEVESIJOHTOVERKOSTON HYDRAULINEN MALLI	28
5.1	Hydraulisen mallin luonti	28
5.2	Paikallishäviöt	28
5.3	Koevesiverkoston paikallishäviöt	29
6	KOEVESIJOHTOVERKOSTON HYDRAULISEN MALLIN KALIBROINTI JA VALIDOINTI	31
6.1	Koeajot ja tietokonemallin kalibrointi	31
6.2	Vesijohtoverkoston hydraulisen mallin validointi	35
7	JOHTOPÄÄTÖKSET	38
	LÄHTEET	40
	LIITE 1. PAIKALLISHÄVIÖIDEN LASKENNAT	41

LIITE 2. EPANET INPUTFILE.....	45
--------------------------------	----

1 JOHDANTO

Tässä opinnäytetyössä tutkitaan vesijohtoverkoston tietokonepohjaista suunnittelua ja mallintamista laboratorio-olosuhteissa. Työ sisältää tutkittavan verkoston kokonaisuuden mallintamisen ja tietokonemallin kalibroinnin sekä validoinnin erilaisten koevesijohtoverkoston luotujen virtaustilanteiden ja niistä mitatun paine- ja virtaamamittatiedon perusteella. Lisäksi työssä testataan koevesijohtoverkoston paine- ja virtausmittaussensoreiden toimivuus ja tarkkuus. Savonia-ammattikorkeakoulun laboratorion olemassa oleva koevesijohtoverkko päivitetään vastaamaan aluemittausjärjestelmää lisäämällä siihen tarvittavat mittalaitteet ja päivittämällä järjestelmän ohjelmisto. Työn keskeisin tavoite oli kalibroida koevesijohtoverkoston paine- ja virtausmittarit sekä luoda verkostosta hydraulinen malli.

Aluemittausjärjestelmä on vedenjakelujärjestelmän seuranta- ja ohjausjärjestelmä, jonka avulla saadaan vähennettyä vuotovesien määrää. Suomessa jatkuvatoiminen vuotavuudenseurantajärjestelmä on vielä varsin tuntematon käsite ja sen käyttö tulee jatkossa varmasti lisääntymään. Vaikka aluemittausjärjestelmää sovelletaan maailmalla runsaasti verkoston vuotavuuden hallinnassa, ei mentelmää ole juurikaan tutkittu Suomessa. Tästä johtuen kirjallisuudessa käsitelty aluemittausjärjestelmän suunnittelun ja rakentamisen periaatteet eivät välttämättä päde täysin Suomen olosuhteisiin. Tämän opinnäytetyön varsinainen tutkimus- ja kehitystyö koostuu laboratoriossa tehdyistä muutos-, mitta- ja testaustöistä sekä koevesijohtoverkoston luodun hydraulisen virtausmallin tarkentamisesta uutta konstruktia vastaavaksi.

Opinnäytetyön tavoitteena on toteuttaa aluemittausjärjestelmä Savonia-ammattikorkeakoulun laboratorion koevesiverkoston sekä luoda verkostoa vastaava tietokonemalli. Työhön kuuluu uusien mittalaitteiden asentaminen ja kaikkien hydraulisten mittauksen luotettavuuden varmistaminen. Tämän jälkeen koevesijohtoverkoston toteutetaan hydraulisen mallin kalibroinnin ja validoinnin vaatimat koeajot joiden perusteella on mahdollista kalibroida ja validoida virtausmalli.

2 VESIJOHTOVERKOSTON ALUEMITTAUSJÄRJESTELMÄ

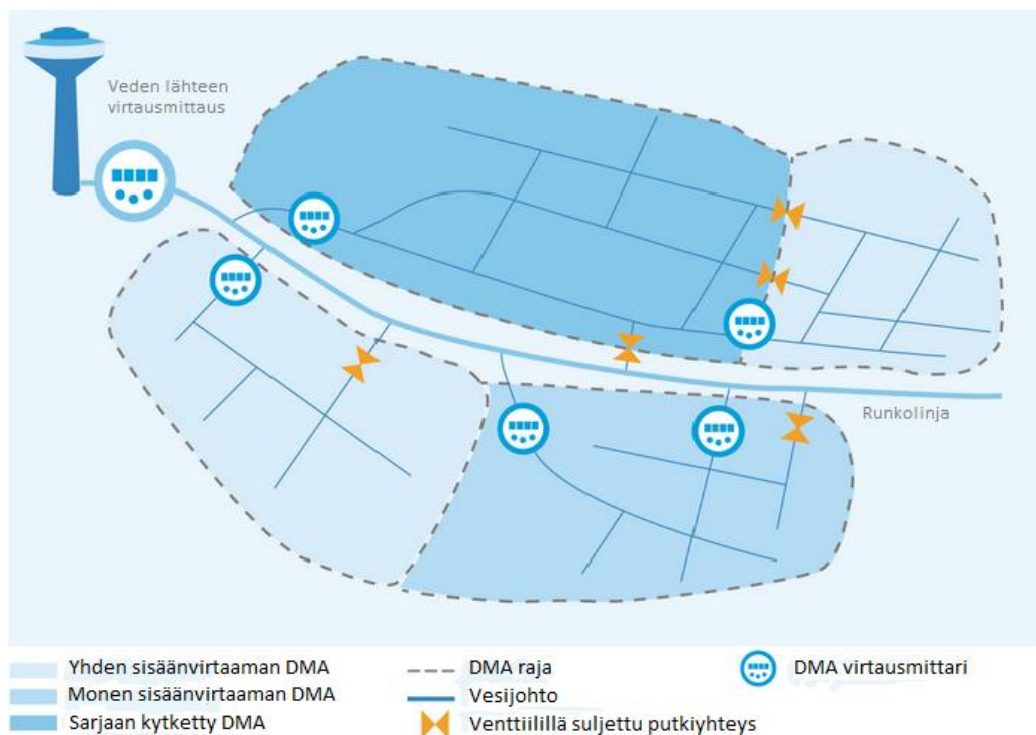
2.1 Aluemittausjärjestelmän toimintaperiaate

Aluemittausjärjestelmä (DMA, engl. *district metering area*) on tekniikka, jolla parannetaan vedenjakelujärjestelmän (WDS engl. *water distribution system*) hallintaa ja se sisältää vesijohtoverkoston jakamisen pienempiin, hydraulisesti hallittuihin alueisiin. Näitä alueita hallitaan eristämällä DMA:sta toiseen yhdistävät putket sulkuventtiileillä ja asettamalla virtausmittarit jäljelle jääneisiin yhdistäviin putkiin. Jokaisen aluemittausjärjestelmän aluemittauspiirin mitatun tulo- ja lähtövirtaaman avulla voidaan selvittää alueellinen vesitase ja seurata yöllisiä minimikulutusarvoja, joiden avulla voidaan selvittää vuotovesien määrä (Alvisi & Franchini 2013).

Aluemittausjärjestelmä on yksi keino hallita vesijohtoverkon vuotovesiä tai laskuttamattomia vesiä (NRW, engl. *non revenue water*). DMA:lla rajataan vesijohtoverkon alueita pysyvästi määritellyille rajoille (Kuvio 1), jolloin alueen tulevaa ja lähtevää virtaamaa voidaan mitata ja laskea niiden perusteella alueellinen vedenkulutus, vesitase ja vuototaso. (Farley ja Trow 2003, 103.) Tehokkaimmaksi havaittu vuotojen tunnistamisen menetelmä on yökulutusten seuranta (Farley 2010).

Aluemittaus ei ole vuotovuodenseurantamenetelmänä uusi, vaan ensimmäisiä aluemittauskohteita oli Isossa-Britanniassa jo 1980-luvulla ja menetelmä esiintyi ensimmäistä kertaa julkaisussa 1980-luvun lopulla (Farley ja Trow 2003, 103–104.) Menetelmän yksinkertaisuus ja sen aikaansaamat taloudelliset säästöt ovat taanneet sen suosion ympäri maailmaa (Farley 2010).

Aluemittausta hyväksikäyttämällä kyetään selvittämään vesijohtoverkoston hetkellisiä vuototasoja ja nähdään vuotojen muutokset päivittäisessä vedenkulutuksessa. DMA:ta käyttämällä voidaan havaita yksittäisien vuotojen synty sekä taustavuotojen määrä, jota on vaikea huomata muilla tavoilla. Hyvin toimivalla aluemittausjärjestelmällä vesijohtoverkon vuodot voidaan havaita jo ennen merkittävien vahinkojen syntymistä. (AWWA 2009, 125–126.) Aluemittausjärjestelmän vuotovesienseuranta perustuu usein aamuyön minimituntikulutukseen, koska vuotavuuden osuus kokonaiskulutuksesta on minimikulutustilanteessa suurimmillaan. (AWWA 2009, 129.)



Kuvio 1. Aluemittausjärjestelmän periaate (muokattu lähteestä Farley, M., Leakage management and Control. WHO, 2001)

Verkoston osioimisen jälkeen voidaan mittaustiedon pohjalta saada myös parempi käsitys alueen normaalista toiminnasta ja sitä kautta huomata vuodot ja poikkeukset vedenkäyttötilanteissa (Farley 2010). Järjestelmän hyödyt näkyvät alueellisella ja ajallisella tasolla, sillä se helpottaa virtaaman ja paineprofiilien tulkintaa sekä tukee selvitystä ongelma-alueiden havaitsemisessa (Farley ja Trow 2003, 83). Tiedonkeruun jatkuvuus tuottaa pitkän aikasarjan mittaustietoa, jonka avulla on mahdollista selvittää verkostoissa syntyneitä ongelmia myös jälkikäteen. Laajasta mittausaineistosta on mahdollista tuottaa aluekohtaisia vedenkäytön ominaisarvoja ja tehostaa vuotavuudenhallintaa (Farley ja Trow 2003, 83).

Aluemittausjärjestelmän suunnittelu vaatii vesijohtoverkoston jakamista osa-alueisiin, jotka ovat kooltaan ja liittyjä määrältään mahdollisimman yhdenmukaisia. Lisäksi osioimista varten täytyy selvittää mitkä alueita yhdistävät putket voidaan sulkea ja mitkä jätetään auki. Kun vesijohtoverkosto jaetaan osa-alueisiin, menetetään toisaalta osa silmukkamaisten verkostojen hyödyistä. Alueen vedensaannin varmuus heikkenee esimerkiksi putkirikkotapauksissa, kun kiertoyhteydet eivät ole heti käytettävissä. Samoin riittävän virtaaman saaminen sammutusvesitarpeisiin voi muodostua ongelmaksi. Aluemittaus on siten ristiriidassa tyypillisesti ajatellun hyvän vedenjakelujärjestelmän suunnittelun kanssa, jossa pyritään rakentamaan silmukkarakenteisia vesijohtoverkostoja, joissa vettä voidaan syöttää kulutusalueille tarvittaessa useammasta suunnasta. DMA:ta rakennettaessa verkoston luotettavuus vähenee yhteysputkien sulkemisen jälkeen ja on mahdollista, että virtauksen kitkahäviöt kasvavat paikallisesti, mikä voi aiheuttaa riittämätöntä vedenpainetta kuluttajien liittymissä. Toisaalta on todettava, että lähes kaikki edellä mainitut ongelmat pystytään välttämään hyvällä suunnittelulla.

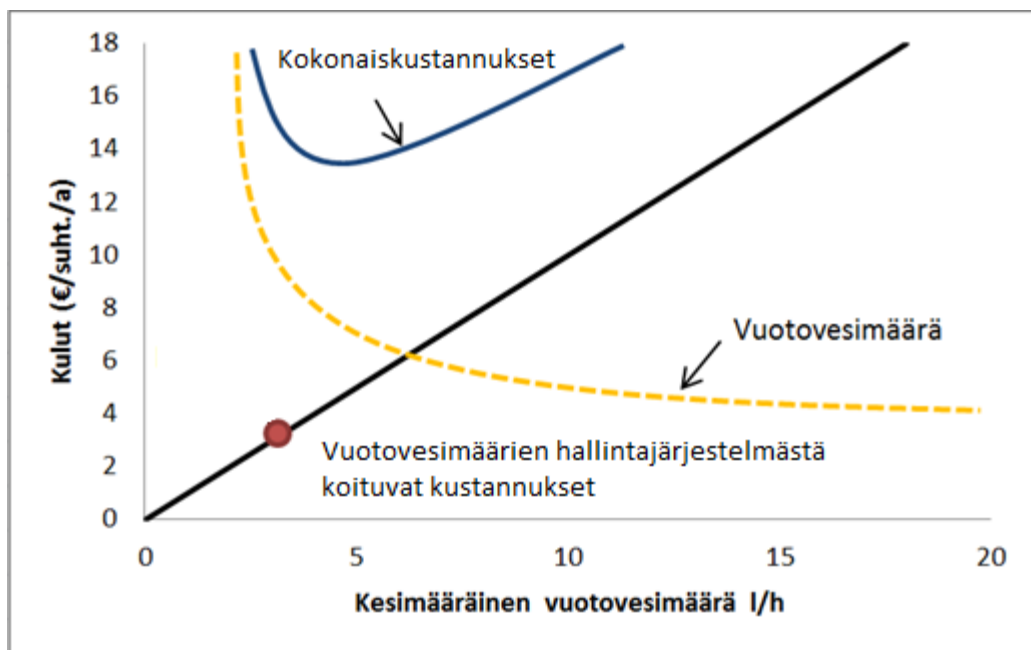
Aluemittausjärjestelmän toteuttaminen olemassa olevaan vesijohtoverkoston ei ole aivan yksinkertaista, johtuen verkoston rakenteen silmukkamaisuudesta. Tähän onkin maailmalla kehitetty menetelmiä, jotka auttavat aluemittauspiirien luomista. Ne perustuvat esimerkiksi verkoston rakenteen graafiseen tulkintaan sekä verkostosta tehtäviin hydraulisiin mallinnuksiin (Alvisi & Franchini 2013).

2.2 Aluemittauksen hyödyt ja tarve vesijohtoverkoissa

Aluemittausjärjestelmä otetaan yleensä käyttöön, jotta vesijohtoverkoston vuotovesimäärät saadaan selvitettyä eri verkoston osissa. Näin pystytään paremmin tunnistamaan vuotavat verkoston osa-alueet ja samalla on mahdollista seurata alueen vedenkulutuksen muutostrendejä kertyvän mittausaikasarjan perusteella. Osa-alueen vuotovesimäärää voidaan arvioida alueen vedenkäyttäjien vedenkulutustietojen perusteella tai tarkkailemalla yöaikaista vedenkulutusta. Osana aluemittausjärjestelmää on hyvä tarkastella myös alueen käyttöpisteiden korkeusvaihteluja ja vedenkäyttäjien painevaatimuksia. Verkoston painevaatimusten perusteella voidaan harkita osa-alueen paineenhallinnan tarvetta. Aluemittausjärjestelmään on mahdollista kytkeä myös veden laatua mittaavia sensoreita.

Vuotovedet muodostavat vesihuoltolaitoksille usein merkittävän kuluerän ja tästä johtuen laitokset pyrkivät pienentämään vuotovesimääriä systemaattisesti. Kuvassa 2 havainnollistetaan vuotovesimäärien pienentämiseen tähtäävien toimien aiheuttamien kustannuksien suhdetta vuotovesimääriin ja vedentuotannon ja jakelun kokonaiskustannuksiin. Periaatteessa laitoksen kannattaa tähdätä vuotovesien hallintaan liittyvässä toiminnassa kokonaiskustannuksien minimiin. Kuvion 2 mukainen optimointitehtävä on laitospohjainen ja vaatii tuekseen esimerkiksi vesijohtoverkoston aluemittausjärjestelmän alueittaista mittausaineistoa.

Vuotovesimäärien hallintajärjestelmästä aiheutuvien kulujen ja sillä saavutettavien kustannussäästöjen optimointi on varsin monimutkainen tehtävä, joka täytyy lisäksi tehdä vesilaitoskohtaisesti. Lisäksi tehtyjen toimenpiteiden seurauksena optimointi pitää tehdä uudestaan muuttuneeseen tilanteeseen. Käyrien suhteiden tulee olla tilannekohtaisia ja niiden täytyy perustua laadukkaaseen dataan ja muuttujien ymmärtämiseen (Farley 2001, 58–60).



Kuvio 2. Vesijohtoverkoston vuotovesimäärän ja siihen liittyvien kustannusten suhde (muokattu lähteestä Farley, Leakage management and Control. WHO, 2001)

Aluemittauksen tavoitteet ovat vuotavuudenhallinta sekä huoltotoimenpiteiden vähentäminen vesijohtoverkostossa. DMA:n suunnitteluun on olemassa useita erilaisia lähestymistapoja, mutta yleiset periaatteet ja kriteerit ovat pitkälti samat jokaisessa (Farley 2001; Farley ja Trow 2003).

Osana aluemittausjärjestelmää toteutetaan usein myös vesijohtoverkoston paineenhallintajärjestelmä. Osa-alueen painetasojen optimointi vähentää putkirikkojen ja vuotovesien määrää. Usein se myös pienentää pumppaukseen kuluvan energian määrää, kun verkostopainetta ei nosteta tarpeettoman korkeaksi paineenkorotuspumppamoilla tai ylävesisäiliöissä. (Farley 2001, 58) jakaa vuotavuudenhallintajärjestelmän kahteen osaan:

1. Vesijohtoverkosto ositetaan pienempiin alueisiin, jotta kyetään seuraamaan alueellisia yökulutuksia ja havaitaan mahdolliset vuodot.
2. Jaettujen alueiden verkostopaine optimoidaan vuorokautisten kulutusten mukaan, mikä ei pelkästään vähennä vuotomääriä vaan myös ehkäisee niiden syntymistä.

Aluemittausjärjestelmillä saavutettavista hyödyistä tai havaituista haitoista ei löydy juurikaan laadukasta pitkäaikaista tutkimustietoa laitosmittakaavassa. Italiassa Enian vesilaitosyhtiö aloitti ensimmäiset vuotovesien hallintaan liittyvät työt vuonna 1989 osittamalla verkostoa, johon sisältyi n. 4 850 km vesijohtoa. Vedenjakelujärjestelmä jaettiin yli 260: een aluemittauspiiriin. Osana järjestelmää toteutettiin myös paineenhallintaa. Vuoden 2001 jälkeen toteutetun seurannan perusteella hankkeen vaikutuksesta verkostoon pumpattavan vesimäärän on arvioitu pienentyneen yli 16 % yhtä vedenkäyttäjää kohti laskettuna. Myös putkirikkojen määrä on pienentynyt noin 20 % toteutetun paineenhallinnan ja tarkasti kohdennetun verkostosaneeraamisen vaikutuksesta. (Fantozzi, Calza & Lambert 2009).

Isossa-Britanniassa pohjoisen Yorkshiren alueella on raportoitu merkittävistä hyödyistä aluemittausjärjestelmän käyttöönoton seurauksena. Kohdealueen vesijohtoverkoston kokonaispituus on 6 272 km ja vedenkäyttäjinä on 409 kotitaloutta ja 11 teollisuuslaitosta. Ennen aluemittausjärjestelmän ja paineenhallinnan käyttöönottoa alueelle yöaikaan johdettu keskimääräinen minimivirtaama on ollut 0,5 l/s ja koko vuorokauden maksimivirtaama vastaavasti 3,5 l/s. Aluemittausjärjestelmän ja paineenhallinnan yhdistelmällä verkoston vuotovesimääriä on saatu pienennettyä noin 30 % lähtötilanteeseen verrattuna. (Ulanicki, Abdelmeguid, Bounds & Patel 2008).

Aluemittausjärjestelmän ja paineenhallinnan avulla saadaan siis todistettua tuloksia, joilla on merkittäviä taloudellisia vaikutuksia. Vuotovesimäärät ovat pienentyneet kymmeniä prosentteja lisäksi putkien rikkoutumiset ja sitä kautta korjaustarpeet ovat vähentyneet selvästi alennettujen verkostopaineiden ansiosta.

2.3 Aluemittausjärjestelmän suunnittelu ja toteutus

2.3.1 DMA:n koko

DMA:n koko ilmaistaan verkoston liittyjämäärä mukaan. Tyypillinen DMA:n koko kaupunkialueilla vaihtelee 500 ja 3000:n verkostoon liittyjän välillä. Yksittäisen DMA:n koko vaihtelee kuitenkin myös riippuen alueellisista tekijöistä ja vesijohtoverkoston ominaispiirteistä kuten (Farley, 2001, 65)

- vesijohtoverkoston vuotovesimäärän optimoinnin vaatimuksista
- alueen maastollisista ominaisuuksista, kuten korkeuseroista ja verkoston rakenteesta ja liittyjien sijoittumisesta
- vuotovesien hallintajärjestelmän ja siihen liittyvien tekniikoiden lähtötasosta
- alueellisen vesilaitoksen näkemyksistä liittyen palveluntarjontaan (palveluntarjonta ja sijainti)
- verkoston hydraulisista ominaisuuksista (sulkuventtiilien rajoitettu määrä nykyisessä verkostossa ja veden laatustandardien vaatimukset)

Tiheään asutuilla alueilla DMA:n alueilla voi olla yli 3 000 liittyjää. Haja-asutusalueilla on vaikea asettaa ohjearvoja DMA-alueiden koon suhteen, sillä alueet voivat käsittää joko yhden kylän verkoston tai monen pienen erillään sijaitsevan asuinalueen laajalla alueella. Mikäli yhdessä aluemittauspiirissä on yli 5 000 liittyjää, on pienten putkirikkojen havaitseminen virtausmittausaineistosta jo vaikeaa. Lisäksi vuotojen paikallistaminen vaikeutuu. Suuret alueet voidaan kuitenkin jakaa muutamiksi pienemmiksi DMA -alueiksi sulkemalla väliaikaisesti niitä yhdistävät vesijohdot, edellyttäen että tämä asia on otettu huomioon DMA:ta suunniteltaessa. Käytännössä DMA:n koolla on 3 eri kategoriaa: (Farley, 2001, 65).

- pienet DMA:t joissa on alle 1 000 kiinteistöä eli liittyjää
- keskikokoiset, joissa on 1 000 – 3 000 kiinteistöä eli liittyjää

- suuret 3 000 – 5 000 kiinteistöä eli liittyjää

2.3.2 Aluemittausjärjestelmän vaikutus verkostoveden laatuun

DMA:n rakentaminen vaatii alueita yhdistävien vesijohtojen sulkemisen. Tästä syystä vesijohtoverkoston umpiperät lisääntyvät verrattuna perinteiseen silmukkaverkistorakenteeseen. Tämän seurauksena veden laadussa voi esiintyä muutoksia varsinkin DMA:n vaatimien venttiilien asentamisen tai venttiilien sulkemisen aikana. Ongelmaa voidaan lievittää verkoston säännöllisellä huuhtelulla (Farley, 2001, 65).

2.3.3 Aluemittauksen kiinteistömäärä ja rajojen määrittäminen

Aluemittausjärjestelmään liittyvien kiinteistöjen tarkan lukumäärän tietäminen ei ole välttämätön tieto järjestelmän suunnittelemisen alkuvaiheessa. Sen sijaan arvioitaessa alueen yökulutuksen määrää, tarvitaan tieto liittyjien lukumäärästä ja mahdollisista teollisuuden vedenkäyttäjistä. Verkostomallia käytettäessä kiinteistöjen määrä on usein jo etukäteen tiedossa. Mikäli alueelle on jo aikaisemmin laadittu kaikki jakelujohdot sisältävä verkoston hydraulinen malli, saadaan liittyneiden kiinteistöjen lukumäärä selville usein jo kyseisestä mallista. Liittymätietoja ja verkstorakennetta selvitettäessä voidaan hyödyntää myös paikkatietopohjaisia verkstotietojärjestelmiä, laskutustietoja, osoitetietoja tai kyselytutkimusta (Farley, 2001, 66).

Suunnitteluvaiheessa vedenjakelujärjestelmä jaetaan sopivan kokosiin aluemittauspiireihin. Ensimmäinen vaihe aluemittauspiirien hahmottelussa voidaan tehdä tarkastelemalla vesilaitoksen päävesijohtoverkoston rakennetta. Tässä vaiheessa suunnittelua käytetään apuna paikallista vesilaitoksen tietotaitoa ja verkoston hydraulista dataa (paine ja virtaama) verkoston ongelmakohtien tunnistamiseksi. Ongelmakohtien sijainti on tärkeä selvittää, sillä DMA:n asennus saattaisi pahentaa ongelmia entisestään (Farley, 2001, 66).

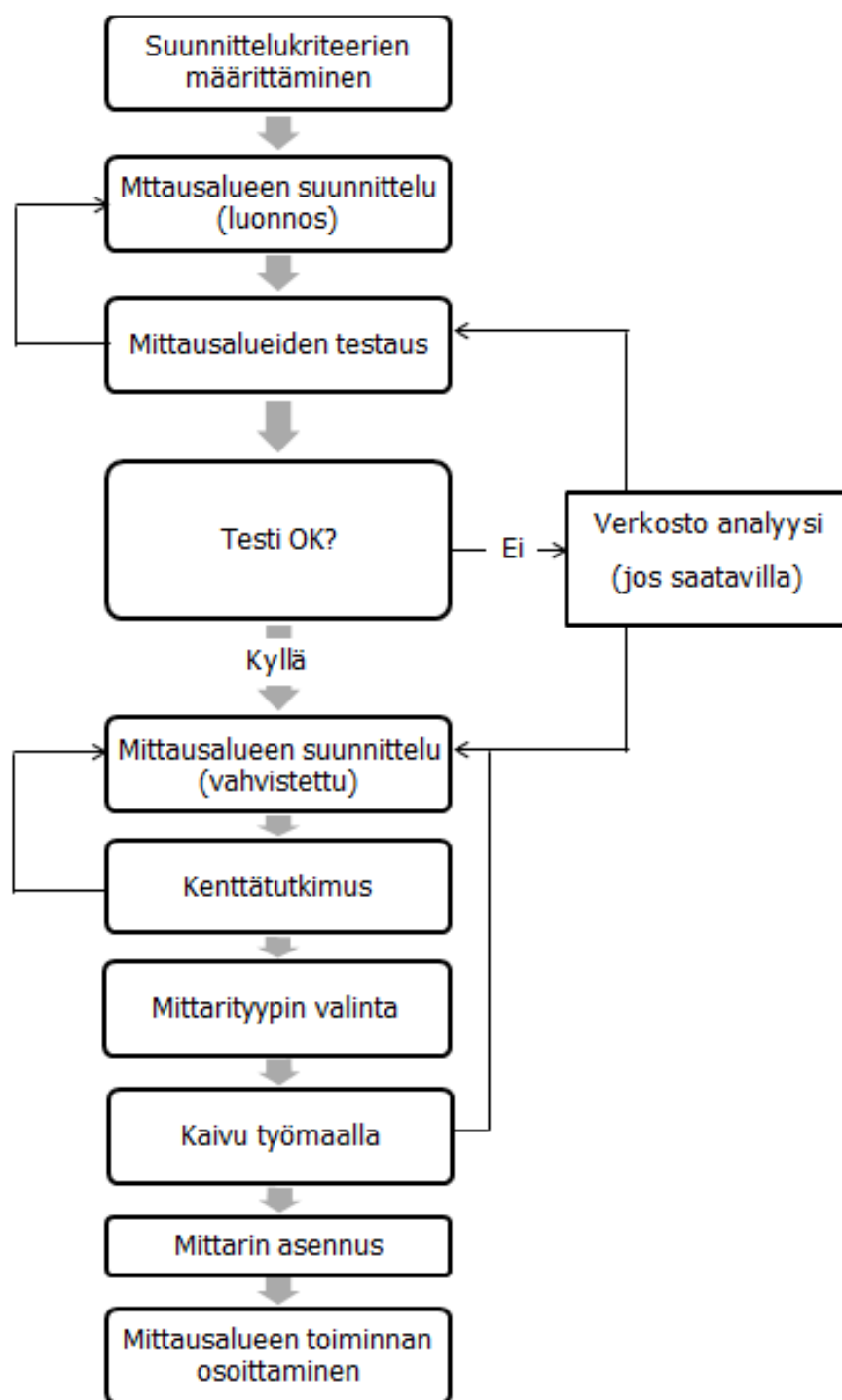
Vedenjakeluverkoston ongelmat voivat olla esimerkiksi liiallinen tai liian vähäinen verkstotopaine. DMA-alueen muodostaminen saattaa myös vaikuttaa verkoston virtauskapaasteettia pienentävästi, kun silmukkayhteyksiä suljetaan tai kun mittausasema aiheuttaa merkittäviä paikallishäviöitä jo ennestään hydraulisesti kuormittuneessa verkstossa.

Alueen rajoja ei pidä suunnitella pelkästään täyttämään DMA:n suunnittelukriteerejä. Muodostettava alue ei saisi ylittää runkovesijohtojen rajaamia alueita. Samoin alueen tulisi ottaa huomioon alueen asutuksen sijainti, maanpinnan muodot ja verkoston hydrauliset ominaispiirteet, jotta DMA muodostuisi teknistaloudellisesti mahdollisimman tarkoituksenmukaisella tavalla. Suuret päävesijohdot (yli 300 mm) tulee mahdollisuuksien mukaan pitää DMA:n ulkopuolella hintavien virtausmittarien asentamisen välttämiseksi ja mikä tärkeämpää tarkemman virtausmittausdatan takaamiseksi.

Runko- ja päävesijohtojen sisällyttäminen DMA:n alueeseen voidaan välttää muodostamalla vierekkäisten aluemittauspiirien rajat päävesijohtolinjan suuntaisesti ja mittaamalla näin muodostuvien jakelualueiden virtaama ja paine kohdassa, jossa ne liittyvät runkoverkkoon. Joskus tulee kuitenkin tapauksia, joissa tämä ei ole kustannustehokasta esimerkiksi, jos päävesijohdosta lähtee useita runkojohtoja. Tällöin pitää päättää joko: (Farley, 2001, 66–68).

- pienempien runkojohtojen sulkemisesta, jättäen vain yhden syöttöputken
- aluemittauksen rakentamisesta jokaisen runkojohdon ympärille
- alueen jättämisestä kokonaan aluemittauksen ulkopuolelle, mikäli kyseessä on pieni vedenjakelualue

Kuvassa on esitetty kaavio yhden aluemittauspiirin suunnittelun ja rakentamisen vaiheista. Samat vaiheet toistuvat suunnittelussa, rakentamisessa ja valvontajärjestelmää luotaessa.



Kuvio 3. Mittausalueen suunnittelun ja rakentamisen vaiheet (Muokattu lähteestä UKWIR. 1999, 5)

3 VESIJOHTOVERKOSTON VIRTausmallinnus

Vedenjakelujärjestelmän johtoverkoston mallintamisen prosessi sisältää verkoston putkissa virtaavan vesimäärän laskennan putkikohtaisesti ja putkistopaineen selvittämisen solmupisteittäin.

Mallintamisessa huomioon otettavia asioita ovat mm. painehäviön laskentatapa, verkostosta otettavan veden määrä, verkoston rakenne ja putkien ominaisuudet sekä virtauksen vuorokautinen vaihtelu (Hermann, 2013). Virtausmallinnuksen tarve kasvaa jatkuvasti ja sitä tehdään vesijohto- ja viemäriverkostojen lisäksi esimerkiksi maakaasu- ja öljylinjaputkille.

3.1 Vesijohtoverkoston hydraulisen mallinnuksen teoreettiset perusteet

Vesijohtoverkoston hydraulisen tilan mallintaminen perustuu kahteen fysiikan säilymislakiin — massan säilymiseen ja energian säilymiseen. Tarkasteltaessa vesijohtoverkoston jotakin kohtaa, täytyy pisteeseen tulevan massavirran olla yhtä suuri kuin sieltä lähtevä massavirta. Energian säilymistä voidaan havainnollistaa ajattelemalla vesijohtoverkostossa olevan putken alkupään ja loppupään virtaustilaa. Mikäli putkessa kulkeva massavirta ei muutu putken alku- ja loppupään välillä, säilyy myös kokonaisenergia vakiona alku- ja loppupään välillä. Tarkasteltavina energiamuotoina vesijohtoverkoston hydraulisissa malleissa ovat tällöin potentiaalienergia, liike-energia, paine-energia ja viskositeetista aiheutuvat energiahäviöt (Epanet manual 2000).

Virtaus ja painehäviön suhde samassa putkessa olevien solmupisteiden i ja j välillä lasketaan kaavalla 1:

$$H_i - H_j = h_{ij} = rQ_{ij}^n + mQ_{ij}^2 \quad (1)$$

jossa: H on solmupisteen paine, h on kitkallisen virtauksen aiheuttama painehäviö tarkasteltavien pisteiden välillä, r on painehäviökerroin, Q on virtaama, n on eksponentti, jolla kuvataan painehäviön kasvua virtaaman suhteen ja m on paikallishäviökerroin.

Painehäviökertoimen arvo lasketaan jollakin yleisesti tunnetulla painehäviön laskentakaavalla. Painehäviön suuruus riippuu esimerkiksi virtaavan nesteen tai kaasun viskositeetista, joka taas on lämpötilan suhteen muuttuva ominaisuus. Tässä opinnäytetyössä painehäviö laskettiin ns. Darcy-Weisbach:n yhtälöllä, joka on muotoa:

$$h_f = f_D * \frac{L}{D} * \frac{u^2}{2g} \quad (2)$$

jossa: h_f on kitkallisen virtauksen aiheuttama painehäviö, f_d on dimensioton kitkahäviökerroin, joka on Darcyn yhtälössä 0.018, L on vesijohdon pituus, D on vesijohdon sisähalkaisija, u on keskimääräinen virtausnopeus, g on maanvetovoiman aiheuttama putoamiskiintyvyys.

Vesijohtoverkostossa olevia pumppuja voidaan kuvata esimerkiksi kaavalla 3 muodossa:

$$h_{ij} = -\omega^2(h_0 - r(\frac{Q_{ij}}{\omega})^n) \quad (3)$$

,missä h_{ij} ilmoittaa pumpun aikaansaaman paineen kasvun, joka saadaan laskettua kuvaamalla pumpun käyntinopeuden ja ominaiskäyrän välistä riippuvuutta edellä esitetyllä yhtälöllä. H_0 on pumpun tuottama maksimipaine 0 virtauksella eli suljetulla lähdöllä, ω on pumpun suhteellinen nopeus asetus, r ja n ovat pumppukäyrien koeffisienttejä.

Massan säilyminen esitetään malleissa yleensä jatkuvuusyhtälön avulla, joka on muotoa

$$\sum_j Q_{ij} - D_i = 0 \quad \text{kun } i = 1, \dots, N. \quad (4)$$

,missä D_i on ulosottovirtaus solmupisteessä i . Solmupisteeseen tulevien massavirtojen ja sieltä lähtevien massavirtojen summa on 0. Massa siis säilyy jokaisessa solmupisteessä.

Edellä esitettyjen säilymislakien tulee toteutua verkoston jokaisessa laskentapisteessä eli ns. solmupisteessä. Kun yhtälöt laaditaan jokaiseen laskentapisteeeseen, on tuloksena ryhmä yhtälöitä, jotka yleensä ratkaistaan matriisilaskennan avulla. Yhtälöryhmän ratkaisemisessa käytetään iteratiivista laskenta-algoritmia, jossa paineelle ja virtaamalle asetetaan ns. reunaehdot eli esimerkiksi painereunaehto systeemin rajapinnassa ja vedenkäyttäjien ottama virtaama eri solmupisteissä. Tämän jälkeen yhtälöryhmä pystytään ratkaisemaan iteratiivisesti jollakin soveltuvalla matriisilaskenta-algoritmilla. Ratkaistavat matriisit ovat kaavan 5 esittämää muotoa (Epanet manual 2000).

$$AH = F \quad (5)$$

,missä: A on $(N \times N)$ Jacobin matriisi, H on $(N \times 1)$ tuntemattomien solmupisteiden paineiden vektori ja F on $(N \times 1)$ oikean puolen termien vektori

Jacobin matriisin diagonaaliset elementit lasketaan kaavalla 6:

$$A_{ii} = \sum_j P_{ij} \quad (6)$$

Nollaraja määritetään kaavalla 7:

$$A_{ij} = -P_{ij} \quad (7)$$

,missä P_{ij} on derivaatan käänteisluku painehäviöstä solmupisteiden i ja j välillä. Putkille painehäviö lasketaan derivaatan käänteisluvusta kaavalla 8:

$$P_{ij} = \frac{1}{nr|Q_{ij}|^{n-1} + 2m|Q_{ij}|} \quad (8)$$

Pumpuille painehäviön tai oikeastaan paineen kasvun derivaatan käänteisluku lasketaan kaavalla 9:

$$P_{ij} = \frac{1}{n\omega^2 r \left(\frac{Q_{ij}}{\omega}\right)^{n-1}} \quad (9)$$

Jokainen yhtälön oikealla puolella oleva termi koostuu nettovirtauksen erotuksesta solmupisteessä ja lisäksi virtauksen korjauskertoimesta, joka lasketaan kaavalla 10:

$$F_i = [\sum_j Q_{ij} - D_i] + \sum_j y_{ij} + \sum_f P_{if} H_f \quad (10)$$

,missä viimeinen termi pätee mihin tahansa putkeen, joka yhdistää solmupisteen i pysyvään solmupisteeseen f, virtauksen korjauskertoimen y_{ij} lasketaan putkille kaavalla 11:

$$y_{ij} = P_{ij} \left(r|Q_{ij}|^n + m|Q_{ij}|^2 \right) \text{sgn}(Q_{ij}) \quad (11)$$

Virtauksen korjauskertoimen pumpuille lasketaan kaavalla 12:

$$y_{ij} = -P_{ij} \omega^2 (h_0 - r|(Q_{ij}/\omega)|^n) \quad (12)$$

Missä: $\text{sgn}(x)$ on 1 jos $x > 0$ ja -1 jos $x < 0$

Kun uudet paineet on laskettu käyttämällä kaavaa (3), saadaan uudet virtaamat kaavasta 13:

$$Q_{ij} = Q_{ij} - (y_{ij} - P_{ij}(H_i - H_j)) \quad (13)$$

Jos absoluuttisten virtausten summa ei vielä täytä ennalta asetettua tarkkuusvaatimusta, lasketaan kaavat (3) ja (12) uudestaan. Virtauksen päivityskaava (12) johtaa aina virtauksen jatkuvuuteen jokaisen solmupisteen ympärillä (Epanet manual 2000).

3.2 Virtausmallinnuksen vaiheet ja ohjelmistot

Virtausmallinnuksen aloittamiseksi on vähimmäisvaatimuksena oltava tieto verkoston pituudesta ja korkeusasemista solmupisteittäin. Yleensä verkostosta tehdään yksinkertaistettu malli, eikä siihen lisätä kaikkia mahdollisia mutkia tai verkoston muotoja. Yksinkertaistettuun verkostomalliin lisätään pumpit ja vesivarastot tai vesitornit. Verkoston perusrakenteen muodostamisen jälkeen malliin voidaan lisätä paineen paikallishäviötiedot sisältäen mm. venttiilit, mutkat, virtausmittarit ja kaikki muut verkoston paineeseen vaikuttavat komponentit. Yksityiskohtaisten tietojen lisäysten jälkeen

aloitetaan mallin kalibroiminen mitatun paine- ja virtausmittausdatan perusteella. Kalibroiminen voidaan suorittaa paineen, virtaaman tai jopa vedenlaadun mukaan.

Epanet

Koevesijohtoverkoston mallintamiseen käytettiin tässä työssä Epanet-ohjelmaa. Epanet on ilmainen, avoimen lähdekoodin vedenejakelujärjestelmien suunnittelu- ja mallinnusohjelma paineellisille putkille. Epanet on hyvin yleisesti käytetty työkalu, koska se on ilmaiseksi saatavilla ja sitä voi muokata omien tarpeidensa mukaan. Tästä syystä suuri osa muista kaupallisista mallintamisohjelmista perustuu Epanetin laskenta-algoritmeihin. Epanet:llä voidaan mallintaa vesijohtoverkostokokonaisuuksia sisältäen vesijohdot, solmupisteet, pumpput, venttiilit, vesisäiliöt ja vesitornit. Sillä voidaan simuloida vedenkäyttötilanteita verkostossa ja luoda ylipäättään hydraulisia malleja paineellisille putkille.

Infowater

Infowater on Innovyze yhtiön ArcGIS-ohjelmaan perustuva vedenjakeluverkoston mallinnus- ja hallintaohjelma. Se kykenee käyttämään Microsoftin .Net – ja ESRI ArcObjects -tiedostoja vesiverkoston mallintamiseen ja optimointiin yhdessä ArcGIS:n kanssa (Innovyze.com).

WaterGEMS

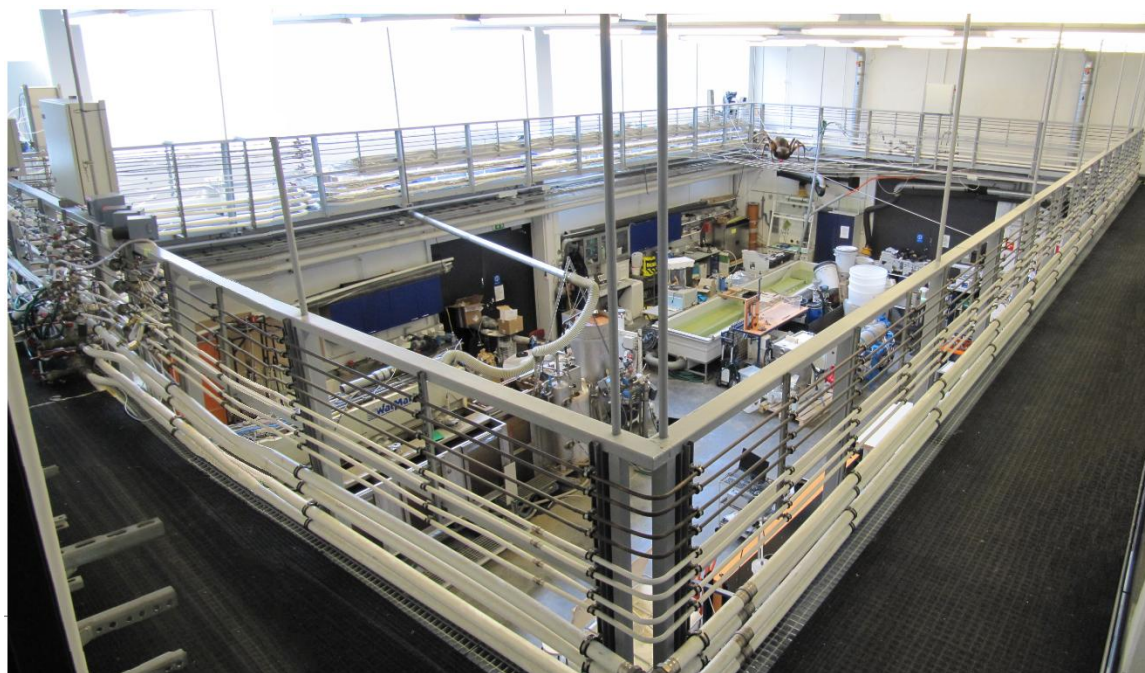
WaterGEMS on Bentley yhtiön kehittämä vedenjakelujärjestelmien suunnitteluohjelma. WaterGEMS -ohjelma on yhteensopiva ArcGIS-, AutoCAD- ja Microstation -ohjelmistojen kanssa tai sitä voidaan käyttää myös omana ohjelmanaan. WaterGEMS on myös yhteensopiva suoraan SCADA – datan kanssa (Bentley.com).

4 KOEVESIJOHTOVERKOSTO

4.1 Koevesijohtoverkoston kuvaus

Savonia-ammattikorkeakoulun koevesijohtoverkoston vesi valmistetaan järvivedestä pilot-kokoluokan perinteisellä pintavesilaitoksella, jonka maksimivirtaama on 3 m³/h. Tarvittaessa verkostossa voidaan käyttää myös Kuopion Veden vesijohtoverkostosta otettavaa vettä. On myös mahdollista kierrättää verkostosta pois johdettua vettä takaisin ylävesisäiliöön, mikä mahdollistaa suurtenkin virtaamien käytön (maksimi n. 70 l/min eli 4,2 m³/h nykyisellä pumppausjärjestelyllä). Järjestelmän säädöt ja mittaukset ovat osa automaatiojärjestelmää, jonka avulla verkostossa tehtävät koeajot voidaan automatisoida.

Verkosto on jaettu kolmeen eri silmukkaan ja verkoston virtaustilaa voidaan vaihdella varsin monipuolisesti erilaisista silmukkaverkostoista haarajärjestelmiin. Ensimmäisessä ja toisessa silmukassa putkisto on ulkohalkaisijaltaan 50 millimetristä Unipipe komposiittiputkea. Kolmas silmukka on samaa Unipipe komposiittiputkea, mutta 16 millimetrin mittaista. Näiden silmukoiden yhteenlaskettu pituus on 388 metriä, jolloin putkiston kokonaistilavuus on noin 35 litraa.



Kuva 4. Savonia-ammattikorkeakoulun vesilaboratorion koevesijohtoverkosto (Puurunen 2015)

4.2 Koevesijohtoverkoston varusteet

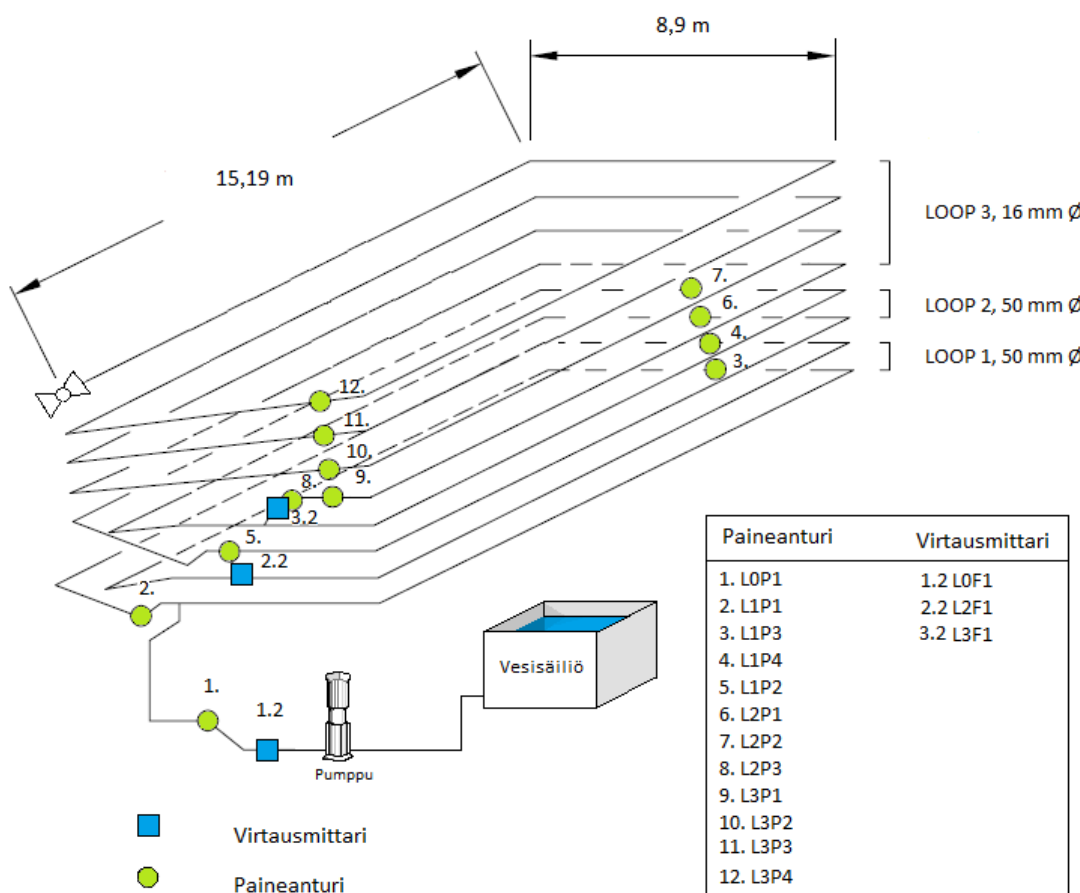
Tähän opinnäytetyöhön liittyvä verkoston instrumentointi esitetään kuvassa 5. Vesijohtoverkoston vesi tulee ylävesisäiliöstä, josta vesi johdetaan paineenkorotuspumpun kautta koevesijohtoverkoston alkupäähän. Tehtäessä vesijohtoverkoston hydraulikkaan liittyvää selvitystä tarvitaan verkostoon lukuisia paine- ja virtausmittareita, joiden sijainti selviää kuvasta 5. Koevesijohtoverkostosta on mahdollista mitata myös laadullisia suureita, kuten veden sähkönjohtavuutta, sameutta ja lämpötilaa. Lämpötila vaikuttaa veden viskositeettiin, mitä tietoa voidaan hyödyntää viskositeettia määrittettäessä.

Verkostossa on kahta eri paineanturityyppiä, joista Siemens Sitrans P 7MF1564-3CA00-1AA1 Serie Z – anturit ovat vuosilta 2004 – 2005 ja Ifm Electronic pt 5404 – anturit vuodelta 2015.

Paineantureiden sijainnit (Kuva 5) ovat pääosin verkoston läntisessä päädyssä, missä sijaitsee myös suurin osa verkostoa ohjaavista venttiileistä. Venttiileitä ja mutkia verkostossa on paljon ja niistä aiheutuu merkittäviä paikallishäviöitä, joita käsitellään tarkemmin hydrauliseen mallinnukseen liittyvässä kappaleessa (5.2).

Toiset hydraulikan kannalta tärkeimmät mittalaitteet ovat verkoston virtausmittarit. Verkostossa kiinteästi olevia mittareita on kolme kappaletta. L0F1 heti pumpun jälkeen, L1F1 silmukoiden 1 ja 2 välissä ja L2F1 silmukoiden 2 ja 3 välissä.

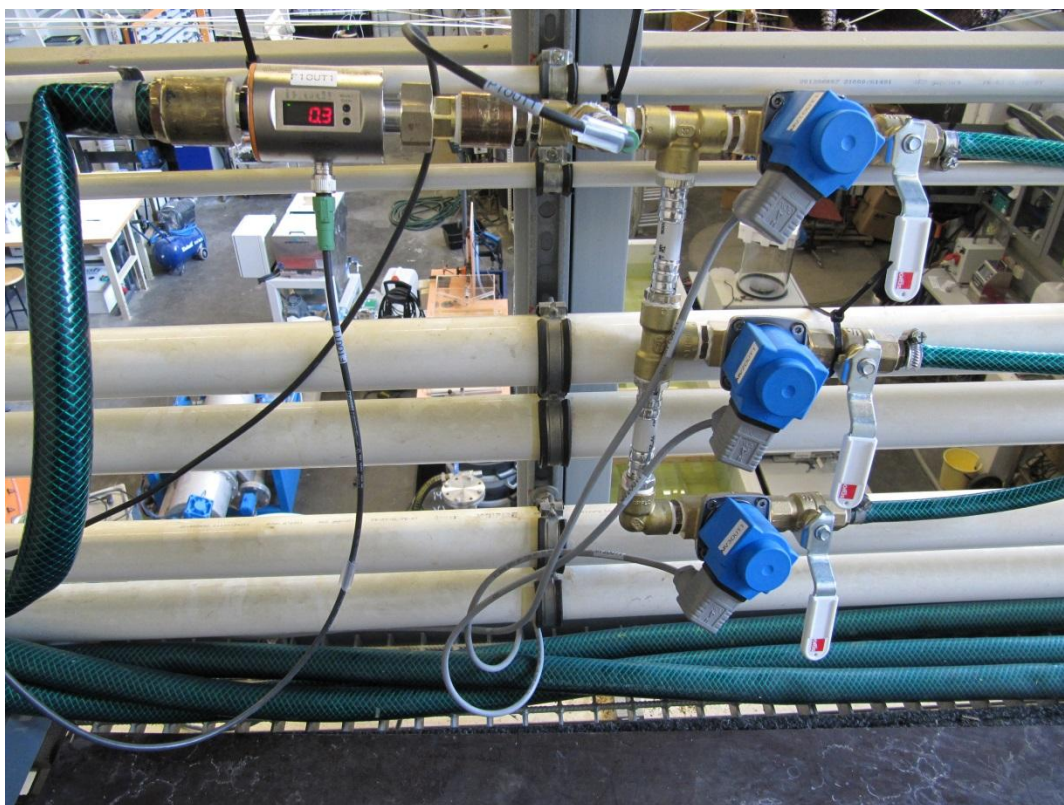
Koevesiverkoston paineenkorotuspumppuna käytetään Grundfos cr-13 – pumppua, joka sijaitsee vesilaboratorion lattiatasolla. Pumpun toimintaa ohjataan Vacon Cx - taajuusmuuttajalla käyttäen joko paineeseen perustuvaa PID -säätöä tai pumpun pyörimisnopeuteen perustuvaa säätöä.



Kuva 5. Verkoston varusteet, mitat ja antureiden tunnus sekä sijainti

Tämän opinnäytetyön aikana olemassaolevaa koevesijohtoverkostoa muutettiin, jotta se soveltuisi vesijohtoverkoston aluemittausjärjestelmiin liittyvään tutkimukseen. Verkosto jaettiin kolmeen erilliseen osioon, joista jokainen muodostaa oman aluemittauspiirin.

Muutoksessa verkostoon lisättiin neljä uutta paineanturia ja neljä jatkuvatoimista virtausmittaria. Silmukoiden välille lisätyt virtaus- ja painemittarit toimivat DMA-rajapintojen mittausasemina. Verkostoon liittyviä vedenkäyttäjää kuvaamaan rakennettiin kaksi virtaus- ja painemittarein sekä magneettiventtiilein varustettua ”tonttiliittymää”, joissa pystytään jäljittelemään vedenkulutuksen vaihtelua. Nämä virtaus- ja painemittarit muodostavat itse asiassa kaksi etäluettavaa vesimittaria, joiden toiminta on myöhemmin mahdollista kytkeä aluemittausjärjestelmän osaksi. Tällaisella kokoonpanolla on mahdollista päästä hyvin lähelle vesijohtoverkoston lähes reaaliaikaista hydraulista hallintaa.



Kuva 6. Vedenkäyttäjän vedenottoa kuvaava toteutus, joka koostuu etäluettavista virtaus- ja paineantureista sekä automaatiojärjestelmällä ohjattavista kolmesta magneettiventtiilistä, joiden erilaisilla avaus- ja kuristusventtiilisäädöillä voidaan jäljitellä verkoston vedenkäytön vaihtelua.

4.3 Mittareiden kalibrointi

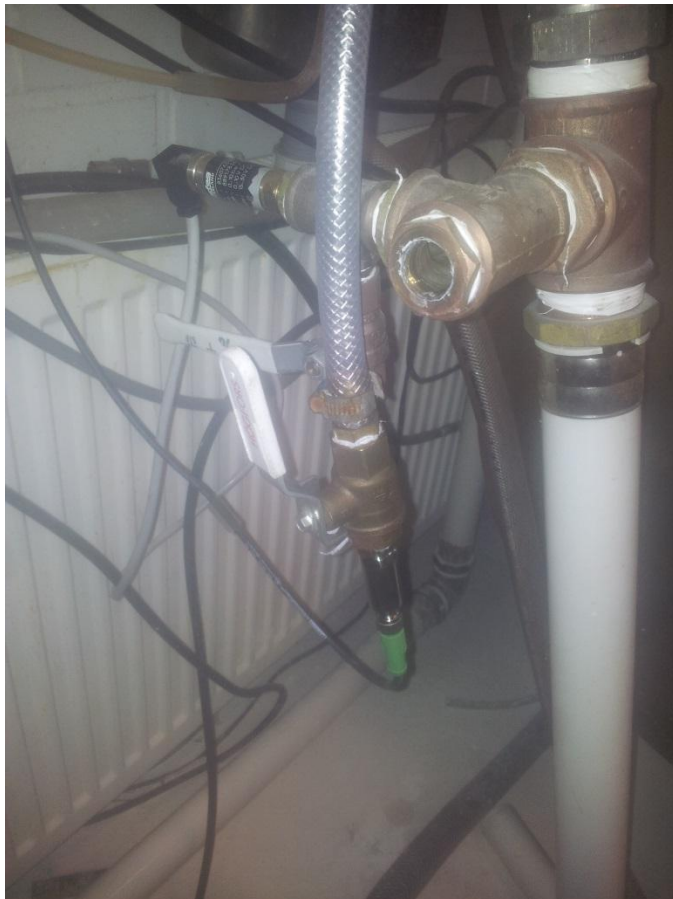
Ennen koevesijohtoverkoston ottamista tutkimuskäyttöön täytyi paine- ja virtausantureille suorittaa kalibrointi. Kalibrointi aloitettiin paineantureista. Paineantureiden kalibrointi noudatti seuraavaa menettelyä:

1. Tyhjennetään koevesijohtoverkosto vedestä ja irroitetaan yksi paineantureista vesipatsaskoetta varten.

4.4 Mittaritestaukset ja validointi

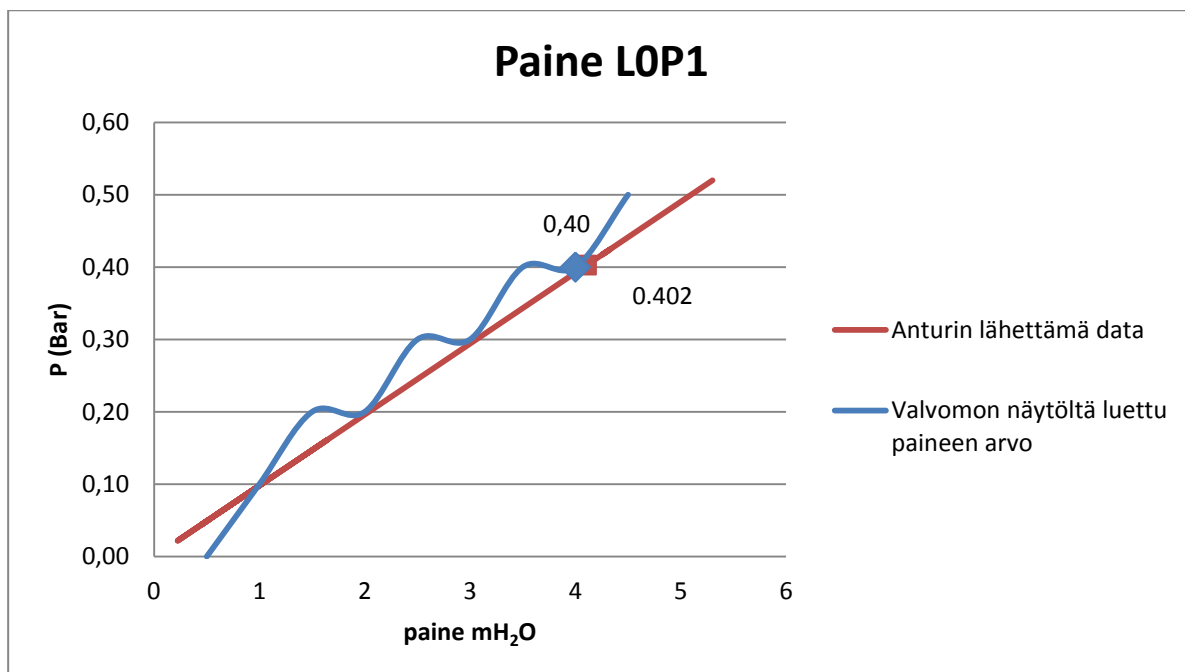
4.4.1 Paineanturit

Testiä varten Ifm:n paineanturi kiinnitettiin letkun päähän ja letkuun lisättiin vesipatsasta puoli metriä kerrallaan (Kuva 8).



Kuva 8. Paineanturi liitettynä letkun päähän painekoetta varten (Puurunen 2015)

Paineen lukema tarkistettiin jokaisen puolen metrin vesipatsaan lisäyksen jälkeen valvomon tietokoneelta. Testauksen päätyttyä saatuja tuloksia verrattiin anturin lähettämään tarkkaan dataan. Kuvasta 10 näkee, että valvomon tietokoneen näytöltä luettu lukema seurasi tarkasti letkutestillä määritettyjä paineen arvoja, joten mittareiden kalibrointi on onnistunut ja anturit tuottavat luotettavaa dataa.



Kuvio 9. Paine-anturin LOP1 koetulokset vesipatsasmittauksessa

4.4.2 Paineanturien tarkkuus

Siemens Sitrans P 7MF1564-3CA00-1AA1 Serie Z-anturin valmistajan uudelle anturille ilmoittama mittavirhe on $\pm 0,25$ prosenttiyksikköä ja Ifm Electronic pt5404:n $0,5$ prosenttiyksikköä. Kaikki verkoston Ifm anturit ovat uusia, mutta osa Siemens antureista on yli 10 vuotta vanhoja. Siemens ilmoittaa virheen kasvavan $0,25$ prosenttiyksikköä vuodessa, joten tämänhetkiset tulokset kaikkein vanhimmilla antureilla voivat olla jopa $\pm 2,25$ prosenttiyksikköä todellisesta paineesta. Taulukossa 1 on esitetty paineprofilitestin tulokset. Tuloksista nähdään, että mittavirheet ovat samaa luokkaa valmistajan antamien arvojen kanssa. Vanhoilla Siemensin antureilla virheet ovat 2 prosenttiyksikköä luokkaa ja uusilla Ifm:n antureilla luokkaa $0,25$ prosenttiyksikköä.

Taulukko 1. Verkoston paineprofilikokeen tulokset $4,01$ bar paineella. Kokeessa käytettiin referenssianturina aiemmin testattua anturia LOP1

Anturi	Mitattu paine bar	Mitattu paine m H ₂ O	Sensorin korko m	Kokeellinen paine m H ₂ O	Mitatun ja kokeellisen paineen erotus %	Mittarityyppi
LOP1	4.01	40.89	0.750			Ifm
L1P1	3.642	37.14	3.630	38.01	2.35	Siemens
L1P3	3.713	37.86	3.685	37.96	0.25	Ifm
L1P4	3.72	37.93	3.755	37.89	0.13	Ifm
L1P2	3.622	36.94	3.755	37.89	2.58	Siemens
L2P1	3.633	37.05	3.875	37.77	1.94	Siemens
L2P2	3.633	37.05	3.945	37.70	1.75	Siemens
L2P3	3.692	37.65	3.990	37.65	0.01	Ifm
L3P1	3.621	36.92	4.015	37.63	1.90	Siemens
L3P2	3.615	36.86	4.065	37.58	1.93	Siemens
L3P3	3.605	36.76	4.153	37.49	1.98	Siemens

L3P4	0	0	4.210	0.00	0	Siemens
------	---	---	-------	------	---	---------

4.4.3 Virtausmittareiden tarkkuus ja kalibroiminen

Koeveijohtoverkostossa on 5 virtausmittaria. Tämän työn yhtenä tavoitteena oli luoda käytäntö kyseisten virtausmittareiden tarkkuuden selvittämiseksi. Menettely muistuttaa painemittauksille luotua menettelyä eli ensin valitaan yksi virtausmittari referenssimittariksi ja mitataan kyseisen mittarin virtaaman mittauksen tarkkuus. Tämän jälkeen kyseisen tarkistetun virtausmittarin avulla selvitetään muiden virtausmittareiden tarkkuus. Tällöin mahdolliset poikkeamat mittareiden välillä saadaan näkyviin riittävällä tarkkuudella. Referenssimittarin näyttämän tarkkuus todettiin astiakokeella seuraamalla 350 litran astian täyttymistä ajan funktiona. Vesiverkosta otettiin ulos tasainen 11,2 l/minuutti virtaama ja samalla seurattiin säiliön täyttymisaikaa 50 litran välein. Kokeen tulokset ovat nähtävillä taulukossa 2. Virtausmittareiden kalibrointi noudatti seuraavaa menettelyä:

1. Paineistetaan putkisto ja varmistetaan, että verkostossa ei ole lainkaan ulosvirtaamaa tarkistamalla kaikki venttiilit.
2. Kalibroidaan yksi virtausmittari virtaamakokeella referenssimittariksi.
3. Verrataan referenssimittarin näyttämää virtaamaa virtaamakokeen tuloksiin ja todetaan mittauksen tarkkuus.
4. Katsotaan valvomotietokoneelta referenssimittarin lähettämä signaalin arvo virtaamalla 0.
5. Muutetaan tarvittaessa muiden samanlaisten virtausmittareiden signaalin 0 arvo vastaamaan referenssimittarin 0 arvoa.
6. Testausta voidaan jatkaa ajamalla sama vesimäärä kaikkien mittareiden läpi, jolloin niiden tuloksia voidaan vertailla keskenään ja tarvittaessa yhtenäistää lukemia tarkentavalla kalibroinnilla.

Virtausmittarin tarkkuus todennetaan laskemalla vesijohtoverkostosta tasaisella virtausnopeudella vettä tilavuudeltaan tunnettuun säiliöön. Seuraamalla säiliön täyttymisnopeutta veden pinnankorkeuden mukaan saadaan laskettua todellinen virtaama, jota verrataan mittarin tuottaman mittatiedon keskiarvoon.

4.4.4 Virtausmittarien tarkkuus

Koevesiverkostossa on käytössä kahdenlaisia virtausmittareita, Endress Hauser Promag 30f ja Ifm Electronic Efector 300 SM8000. Heti pumpun jälkeen verkoston alkupäässä on Endress Hauserin mittari, jonka valmistajan ilmoittama mittavirhe on $\pm 0,5 \%$ mittaalueella 0,1 m/s – 10 m/s. Kokeen aikainen laskennallinen virhe oli siis 11,2 l/minuutissa virtaamalla $\pm 0,05$ l/minuutissa (Promag 30 manual).

Loput verkoston mittareista ovat Ifm Electronin valmistamia. Valmistajan ilmoittama virtausmittauksen tarkkuus mittarille Efector 300 SM8000 on $\pm 2 \%$ mitatusta arvosta, johon lisätään 0,5 % mittarin maksimivirtaamasta (120 l/minuutti) eli 0,6 l/minuutti. Tämän kokeen

tapauksessa laskennallinen virhe oli siis 11,2 l/minuutti virtaamalla $\pm 0,82$ l/minuutti (Ifm Electronic SM8000 manual). Kokeen aikana virheen määrä kasvaa, johtuen astian täyttymisajan mittauksen tarkkuudesta. Täyttymisaikaa manuaalisesti mittaamalla tulee helposti tehneeksi sekunnin virheen joko alle tai yli todellisen ajan.

Verrattaessa Ifm Electronic:n SM8000 mittarille tehdyn virtauskokeen tuloksia (taulukko 2) valmistajan ilmoittamiin mittavirheisiin havaitaan, että tulokset pysyvät ilmoitetun virhemarginaalin sisällä.

Taulukko 2. Ifm Electronic SM8000 – mittarille tehdyn virtauskokeen tulokset virtaamalla 11,2 LPM

Veden pinnan korkeus cm	Veden tilavuus V m3	Täyttymisaika	Täyttymisen väliaika	Kokeellinen virtaama LPM	Virtaaman erotus LPM	Virtaaman erotus %
20	0.12	0:10:58	0:10:58	10.6	0.6	5.0
30	0.18	0:16:32	0:05:34	10.6	0.6	5.0
40	0.23	0:22:30	0:05:57	10.4	0.8	7.1
50	0.29	0:28:27	0:05:57	10.3	0.9	8.4

Koevesiverkoston muiden virtausmittareiden lukemia verrattiin keskenään toisella virtauskokeella virtausalueella 1 – 70 l/minuutissa niin, että virtaus ohjattiin kulkemaan kolmen eri mittarin läpi samanaikaisesti. Tällöin saatiin selville mittareiden keskinäiset erot. Taulukossa 3, 4 ja 5 on esitetty virtausmittareille tehtyjen kokeiden tulokset. Tuloksista puuttuu Endress Hauser–mittarin tulokset virtaamalla 60 ja 6 l/minuutissa, koska mittaustieto ei tuntemattomasta syystä tallentunut näiden virtaamien aikana.

Tuloksissa Ifm sm8000 – mittareiden keskimääräinen virhe on noin 2,5 % koko virtausmittausalueella. Muista tuloksista selkeästi poikkeavat mittaukset johtuvat todennäköisesti manuaalisen säiliön täyttymisajan mittaamisen epätarkkuudesta. Endress Hauser promag 30f – mittari alkaa toimia tarkasti vasta kun virtaama on 15 l/minuutissa ja sitä enemmän. Virtaamaa 15 l/minuutissa alhaisemmilla virtaamilla Endress Hauser promag 30f - mittarin tulokset eivät ole luotettavia.

Taulukko 3. Koevesijohtoverkoston virtausmittarin L0F1 näyttämät virtaamat 70 – 1 LPM virtaamilla

Virtaamatilanne	Laskennallinen virtaama	L0F1 Endress Hauser promag 30f	Kokeellisen ja mitatun virtaaman erotus %
70	71.18	71.74	0.8
60	57.14	57.06	-0.1
50	51.66	x	x
40	39.87	40.57	1.7
30	30.80	28.78	-7.0
27	28.23	28.88	2.2
20	20.43	21.82	6.4
15	15.25	14.98	-1.8
10	10.48	9.13	-14.9

6	6.28	x	x
2.5	2.35	3.63	35.1
1	1.00	1.71	41.5

Taulukko 4. Koevesijohtoverkoston virtausmittarin L1F1 näyttämät virtaamat 70 – 1 LPM virtaamilla

Virtaamatilanne	Laskennallinen vir- taama	L1F1 Ifm sm8000	Kokeellisen ja mitatun virtaaman erotus %
70	71.18	70.54	-0.9
60	57.14	58.39	2.1
50	51.66	49.20	-5.0
40	39.87	39.53	-0.8
30	30.80	30.51	-1.0
27	28.23	27.41	-3.0
20	20.43	19.99	-2.2
15	15.25	15.14	-0.8
10	10.48	10.31	-1.7
6	6.28	6.19	-1.6
2.5	2.35	2.26	-3.9
1	1.00	0.97	-2.9

Taulukko 5. Koevesijohtoverkoston virtausmittarin L2F1 näyttämät virtaamat 70 – 1 LPM virtaamilla

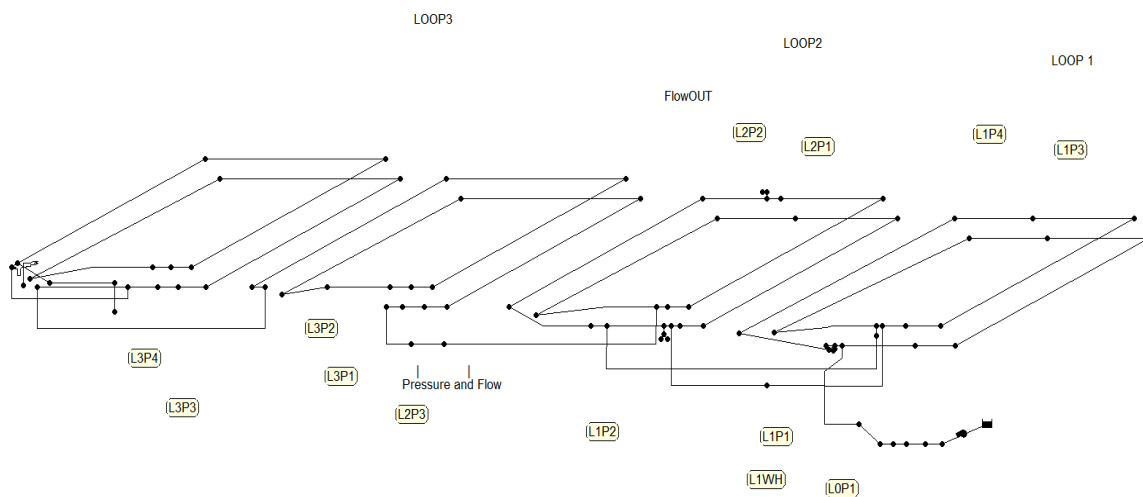
Virtaamatilanne	Laskennallinen vir- taama	L2F1 Ifm sm8000	Kokeellisen ja mitatun virtaaman erotus %
70	71.18	70.32	-1.2
60	57.14	58.21	1.8
50	51.66	49.09	-5.2
40	39.87	39.46	-1.0
30	30.80	30.38	-1.4
27	28.23	27.29	-3.5
20	20.43	19.86	-2.8
15	15.25	15.06	-1.3
10	10.48	10.25	-2.3
6	6.28	6.24	-0.8
2.5	2.35	2.34	-0.4
1	1.00	1.02	1.8

5 KOEVESIJOHTOVERKOSTON HYDRAULINEN MALLI

5.1 Hydraulisen mallin luonti

Koevesijohtoverkoston rakenne mitattiin Savonian vesilaboratoriossa ja tulokset dokumentoitiin AutoCAD-ohjelmistossa. Verkoston rakenteen esitystapaa AutoCAD-kuvassa muutettiin todelliseen tilanteeseen verrattuna piirtämällä putkikierrat neljään eri kokonaisuuteen mallin luettavuuden ja käytön helpottamiseksi. Putkipituuksia ei kuitenkaan muutettu todellisuudesta eikä myöskään komponenttien korkeusasemia. Paineantureiden korkeusasema määritettiin vaaitsemalla. Vaaitustulosten tarkkuudessa on noin $\pm 0,5$ senttimerin eroja, koska vaaituskojeen korko määritettiin käsin mittanauhan avulla. Mittanauhan tarkkuudessa on myös arviolta ± 1 millimetriä virhettä mittausta kohden. Koevesijohtoverkoston AutoCAD-malli siirrettiin Epanetiin käyttäen EpaCAD-ohjelmistoa. Kuvassa 10 esitetään Epanet-ohjelmistoon luotu verkostorakenne.

Verkosto jaettiin kolmeen silmukkaan, joista jokainen edustaa omaa alumittauspiiriänsä. Silmukat 1 ja 2 ovat pituudeltaan 97 metriä ja niiden putkien sisähalkaisija on 41 millimetriä. Silmukan 3 pituus on 194 metriä ja se on rakennettu sisähalkaisijaltaan 12 millimetrin Uponor komposiitti -putkesta. Tämän työn koeajoissa silmukkaa 1 ajetaan silmukkaverkostona ja silmukoita 2 ja 3 haarajärjestelmänä.



Kuva 10. Epanet malli koeverkostosta

5.2 Paikallishäviöt

Laboratoriomittakaavan koevesijohtoverkoston on mahdollista mallintaa koevesijohtoverkosto hyvin yksityiskohtaisesti ja myös kalibroida malli perusteellisesti. Kalibroitavaiheessa verkoston virtausnopeudet kannattaa kasvattaa varsin suuriksi, jotta mallin herkkyys kalibroituille suureille kasvaa. Tämän seurauksena painehäviöiden vaikutus on hyvin merkittävä ja putkivirtauksen

kitkahäviön malinnuksen ohella on paneuduttava erityisen huolellisesti myös paikallishäviöiden mallintamiseen. Paikallishäviöitä muodostavat esimerkiksi:

1. virtaaman sisään- tai ulostulo putkessa
2. äkillinen laajenema tai putken supistuminen
3. mutkat ja liittimet
4. venttiilit, avoimet tai osaksi suljetut
5. asteitteiset laajenemat tai putken supistumat

Mallinnettaessa todellisia vesijohtoverkostoja paikallishäviöt jätetään usein mallintamatta tai ne sisällytetään yleiseen kitkahäviöön. Tällainen mallintaminen on kuitenkin epätarkempaa ja koevesijohtoverkoston mallille asetetut vaatimukset edellyttivät paikallishäviöiden mallintamista. Paikallishäviöt h_L lasketaan kaavalla 14, joka on muotoa:

$$h_L = K_L \frac{v^2}{2g} \quad (14)$$

missä: v on nesteen virtausnopeus ja g on putouskiihtyvyys. Kerroin K_L määritetään paikallishäviön aiheuttaman komponentin ominaisuuksien perusteella esimerkiksi valmistajan antaman tiedon perusteella. K_L :n arvo ei ole täysin riippumaton keskimääräisen virtausnopeuden arvosta, vaikka näin yleensä käytännön laskennoissa oletetaankin. Paikallishäviöiden suuruus kasvaa keskimääräisen virtausnopeuden toiseen potenssiin (EpaNet manual, 2000).

5.3 Koevesiverkoston paikallishäviöt

Tässä opinnäytetyössä käytettiin paikallishäviöiden määrittämisessä seuraavassa taulukossa 6 esitettäviä arvoja.

Taulukko 6. Koevesiverkoston paikallishäviöitä aiheuttavat tekijät ja niiden K – arvot (EpaNet manual, 2000), (RIL 124-1 Vesihuolto).

Liitos		K-arvo
T		0.35
Kulma 90°		0.8
Kartiomainen laajeneminen	$D_2/D_1=0.8$	0.03
	$D_2/D_1=0.5$	0.08
	$D_2/D_1=0.2$	0.13
Äkillinen laajeneminen	$D_2/D_1=0.8$	0.16
	$D_2/D_1=0.5$	0.57
	$D_2/D_1=0.2$	0.92
Kartiomainen supistuminen	$D_2/D_1=0.8$	0.05
	$D_2/D_1=0.5$	0.07
	$D_2/D_1=0.2$	0.08
		0.18

Äkillinen supistuminen	$D_2/D_1=0.8$	0.37
	$D_2/D_1=0.5$	
	$D_2/D_1=0.2$	0.49
Palloventtiili -auki		0.05
	$r/D = 4$	0.17
	$r/D = 2$	0.22
Loivasti taattuva kulma 90°	$r/D = 1$	0.37
	180° kulma	0.2

K-arvot ovat yksittäisen paikallishäviötä aiheuttavan komponentin kertoimia. Laaditussa mallissa paikallishäviötä aiheuttavien komponenttien K-arvot laskettiin putkikohtaisesti yhteen. Taulukossa 7 esitetään käytetty menettely koevesijohtoverkoston ensimmäisen kierroksen putkikokonaisuudelle laskettujen paikallishäviöiden summan laskemiseksi. Taulukon 7 luvut ovat lukumääriä siitä kuinka monta kutakin paikallishäviötyyppiä on putkien 1, 2, 3 ja 4 välillä. Tämä lukumäärä kerrotaan taulukosta 3 löytyvällä k-arvolla ja näin saadaan tulokseksi kyseisen putken tietyn tyyppisten liitosten paikallishäviötä kuvaava summatermi. Jokaiselle liitostyypille lasketaan omat summatermit putkikohtaisesti ja lopuksi kyseisen putken kaikki paikallishäviöiden summatermit lasketaan yhteen ja syötetään edelleen Epanetiin. Kaikki paikallishäviön laskennat ovat esillä liitteessä 1. Epanetiin syötetyt summatermit ovat esillä Epanetin input-filessa, joka on liitteessä 2.

Taulukko 7. Koevesiverkoston putkikierroksen 1 paikallishäviötä aiheuttavien liitosten kappalemäärät

		Putki			
Liitos		1	2	3	4
T		2		1	4
Kulma 90°		1	1	1	1
Kartiomainen laajeneminen	$D_2/D_1=0.8$		3		2
	$D_2/D_1=0.5$				
	$D_2/D_1=0.2$				
Äkillinen laajeneminen	$D_2/D_1=0.8$				
	$D_2/D_1=0.5$				
	$D_2/D_1=0.2$				
Kartiomainen supistuminen	$D_2/D_1=0.8$		3		2
	$D_2/D_1=0.5$				
	$D_2/D_1=0.2$				
Äkillinen supistuminen	$D_2/D_1=0.8$				
	$D_2/D_1=0.5$				
	$D_2/D_1=0.2$				
Palloventtiili -auki		2			
Paikallishäviöt. yht.		1.6	0.8	1.15	2.3

6 KOEVESIJOHTOVERKOSTON HYDRAULISEN MALLIN KALIBROINTI JA VALIDOINTI

6.1 Koeajot ja tietokonemallin kalibrointi

Hydraulisen mallin kalibroinnilla pyritään parantamaan mallin laskemia arvoja niin, että sen laskemat vesijohtoverkoston mitattavien suureiden arvot vastaisivat paremmin todellisuudessa mitattua tietoa. Hydraulista mallia kalibroidaan yleensä muuttamalla putkien karkeuskertoimia, paikallishäviökertoimia tai putkien halkaisijoita. Mitattuja ja mallinnettua arvoja verrattiin tässä opinnäytetyössä paineen suhteen tekemällä mitatuista paineen arvoista kalibroitiedosto Epanet-ohjelmalle. Kalibrointilanteena käytettiin koevesijohtoverkoston maksimivirtaamaa 75 l/minuutissa, jotta saatiin aikaan suurimmat mahdolliset paineen kitkahäviöt, jolloin mallin herkkyys virheille on suurimmillaan. Kokeen aikana vettä otettiin koevesijohtoverkon loppupäästä 5 l/minuutissa ja verkoston keskeltä solmupisteestä L1FOUT1 70 l/minuutissa. Kokeen aikaiset paineet ovat nähtävillä taulukossa 8.

Taulukko 8. Maksimivirtaamakoeajon 75 LPM aikaiset koevesijohtoverkoston paineet metreinä vesipatsasta

Anturi	L0P1	L1P1	L1P3	L1P4	L1P2	L2P1	L2P2	L2P3	L3P1	L3P2	L3P3	L3P4
m H ₂ O	38.6	34.6	35	35.1	22	22	21.9	22.1	20.3	16.2	9.3	4.6

Ennen varsinaista kalibrointia ensimmäinen verkostomalli tuotti jo melko kelvollista aineistoa. Kalibrointiaineisto on nähtävillä taulukossa 9. Kalibrointiaineistosta oli selkeästi nähtävillä ongelmakohta L1P2 – anturin kohdalla. Kyseisen anturin kohdalla todellinen paine tippuu 4,7 metriä vesipatsasta pienemmäksi kuin mitä malli sen laskee. Tämä johtui silmukoiden väliin asennetun virtausmittarin muutoksesta verkostoon eikä sitä ollut vielä tässä vaiheessa otettu mallissa huomioon.

Taulukko 9. Vertailu mallin laskemien paineiden sekä koevesijohtoverkostosta mitattujen paineiden välillä maksimivirtaaman 75 LPM tilanteessa

Anturi	Mitattu paine m H ₂ O	Mallin laskema paine m H ₂ O	Paineiden erotus m H ₂ O	Mittarityyppi
L0P1	38.6	38.60	0.003	lfm
L1P1	34.6	35.52	0.920	Siemens
L1P3	35	35.23	0.230	lfm
L1P4	35.1	35.17	0.070	lfm
L1P2	22	26.78	4.780	Siemens
L2P1	22	25.84	3.840	Siemens
L2P2	21.9	24.23	2.330	Siemens
L2P3	22.1	24.80	2.700	lfm
L3P1	20.3	24.64	4.340	Siemens
L3P2	16.2	19.20	3.000	Siemens

L3P3	9.3	12.07	2.770	Siemens
L3P4	4.6	6.58	1.980	Siemens

Edellisessä taulukossa mainitun silmukoiden yksi ja kaksi välisen muutoksen malliin korjauksen jälkeen malli näytti hyvää tulosta kolmентаан silmukkaan asti, jonka jälkeen mallia alettiin vasta varsinaisesti kalibroida. Mallia kalibroitiin muuttamalla kolmannen silmukan karkeuskerrointa vanhan muoviputken kaltaisesta 0,05:n kertoimesta sileän valurautaputken 0,25:een. Sen jälkeen paikallishäviöiden arvoja lähdettiin muuttamaan verkoston alkupäästä lähtien korottamalla tai pienentämällä paikallishäviöitä niissä solmupisteissä missä ongelmia havaittiin.

Jokainen verkoston alkupäässä tehty muutos vaikuttaa loppupään tuloksiin, joten kalibrointia joutuu käytännössä aina tekemään vaiheittain virtaussuunnassa laskevan paineen suuntaan samalla seuraten miten muutoksen vaikutukset näkyvät koko verkostossa. Tässä vaiheessa kalibrointia ei ollut vielä tarvetta tehdä muita muutoksia kuin aiemmin mainittu karkeuskertoimien muutos. Mallin rakenteen korjaamisen ja kalibroinnin jälkeen verkostomalli saatiin vastaamaan todellisia mitattuja arvoja maksimivirtaamalla noin puolen metrin vesipatsaan tarkkuudella. Kalibroinnin tulokset ovat esillä taulukossa 10.

Taulukko 10. Epanet mallin laskemat arvot paineille kalibroinnin jälkeen verrattuna mitattuun tietoon verkoston maksimivirtaus tilanteessa 75 LPM

Anturi	Mitattu paine m H ₂ O	Mallin laskema paine m H ₂ O	Paineiden erotus m H ₂ O	Mittarityyppi
L0P1	38.6	38.60	0.003	Ifm
L1P1	34.6	35.15	0.550	Siemens
L1P3	35	35.23	0.230	Ifm
L1P4	35.1	35.17	0.070	Ifm
L1P2	22	22.36	0.360	Siemens
L2P1	22	22.53	0.530	Siemens
L2P2	21.9	21.79	0.110	Siemens
L2P3	22.1	21.91	0.190	Ifm
L3P1	20.3	21.26	0.960	Siemens
L3P2	16.2	16.00	0.200	Siemens
L3P3	9.3	9.95	0.650	Siemens
L3P4	4.6	4.93	0.330	Siemens

Toisena mallin kalibrointitilanteena oli ainoastaan verkoston viimeisestä solmupisteestä 30 otettu maksimivirtaama 6,4 l/minuutissa pumpun tuottamalla lähtöpään paineella 4,6 bar painemittarista L0P1 luettuna. Maksimivirtaustilanteen kalibroinnilla verkosto laskee paineet oikein anturiin L3P1 asti, joka on verkoston kolmannen silmukan ensimmäinen paineanturi. Paineen ero lasketun ja

mitatun paineen välillä pysyy n. 3 metrin vesipatsaan välillä läpi koko kolmannen silmukan, joten silmukoiden 2 ja 3 välillä pitäisi olla suurempi paikallishäviö kuin mitä sille kohtaa on laskettu olevan. Käytännössä tämä tarkoittaa paikallishäviötekijöiden tarkastamista uudelleen, joten mallilla on vielä lisäkalibroinnin tarve. Tulokset käytettäessä verkoston maksimivirtaamalle kalibroituja mallia verkoston loppupäästä saadulle maksimivirtaamalle 6,4 l/minuutissa ovat nähtävillä taulukossa 11.

Taulukko 6. Verkoston maksimivirtaamalle kalibroidun mallin tulokset loppupäästä otetulle maksimivirtaamalle 6.4 LPM

Anturi	Mitattu paine m H ₂ O	Mallin laskema paine m H ₂ O	Paineiden erotus m H ₂ O	Mittarityyppi
L0P1	47.3	47.31	0.003	Ifm
L1P1	43.46	44.05	0.590	Siemens
L1P3	44.26	44.37	0.110	Ifm
L1P4	44.35	44.30	0.050	Ifm
L1P2	42.9	42.96	0.060	Siemens
L2P1	43.12	43.96	0.840	Siemens
L2P2	42.26	44.65	2.390	Siemens
L2P3	43.86	44.15	0.290	Ifm
L3P1	39.98	43.36	3.380	Siemens
L3P2	31.4	34.24	2.840	Siemens
L3P3	18.24	22.08	3.840	Siemens
L3P4	9.42	12.69	3.270	Siemens

Koeajotilanteen 6,4 l/minuutissa mallia kalibroitiin muuttamalla L3P1 -anturia edeltävän putken paikallishäviökerrointa. Paikallishäviökerroin täytyi nostaa kahdesta 65:een, jotta päästiin samantasoihin tuloksiin kuin maksimivirtaamatilanteen kalibroinnin kanssa. Kalibroinnin tulokset ovat nähtävillä taulukossa 12.

Taulukko 7. Koeajotilanteen 6.4 LPM kalibroinnin jälkeiset tulokset

Anturi	Mitattu paine m H ₂ O	Mallin laskema paine m H ₂ O	Paineiden erotus m H ₂ O	Mittarityyppi
L0P1	47.3	47.31	0.003	Ifm
L1P1	43.46	44.05	0.590	Siemens
L1P3	44.26	44.37	0.110	Ifm
L1P4	44.35	44.30	0.050	Ifm
L1P2	42.9	42.96	0.060	Siemens
L2P1	43.12	43.96	0.840	Siemens
L2P2	42.26	44.65	2.390	Siemens
L2P3	43.86	44.15	0.290	Ifm
L3P1	39.98	40.51	0.530	Siemens
L3P2	31.4	31.39	0.010	Siemens
L3P3	18.24	19.23	0.990	Siemens
L3P4	9.42	9.84	0.420	Siemens

Mallin toisen kalibroinnin jälkeen tarkastettiin toimiiko malli yhä edellisellä kalibroitilanteen virtauksilla ja kävi ilmi, että kalibrointi ei ole pätevä molempien tilanteiden laskemiseen, joten kalibroitua jatkettiin vielä, jotta päästiin lähemmäksi optimaalista kalibroitua. Ongelmia mallin laskennassa syntyi vain kolmannen silmukan aikana, jossa halkaisijaltaan 50 millimetrin putki muuttuu 16 millimetrin putkeksi, joten kalibroinnissa keskityttiin pelkästään verkoston loppupäähän. Suurin ongelma oli, että virtausnopeuden kasvaessa ja paineen noustessa mallin tulokset alkoivat erota mitatusta paineesta verkoston loppua kohti mentäessä, tekipä kalibroinnin miten hyvänsä.

Verkostossa tehtiin vielä kaksi lisäkoetta virtaamalla 74,6 l/minuutissa ja 22,2 l/minuutissa. 74,6 l/minuutissa tilanteessa verkoston keskellä olevasta solmupisteestä L1FOUT1 otettiin vettä ulos 70,3 l/minuutissa ja verkoston viimeisestä solmupisteestä 4,3 l/minuutissa. Virtaustilanteessa 22,2 l/minuutissa vettä otettiin verkoston loppupään solmupisteestä 6,3 l/minuutissa sekä verkoston keskeltä 15,9 l/minuutissa solmupisteestä L1FOUT1. Kalibroinnin paras yleistulos saatiin muuttamalla kahden viimeisen putkikierron muutamien putkien karkeuskertoimet arvoon 0.001, sekä nostamalla paikallishäviöiden kertoimia putkissa p7 ja p41, jotka sijaitsevat virtaussuunnassa juuri ennen antureita L3P1 ja L3P3. Kaikki viimeisen kalibroinnin aikana tehdyt muutokset ovat nähtävissä taulukossa 13.

Taulukko 8. Verkostomallin kalibroinnissa ennen validointia tehdyt muutokset

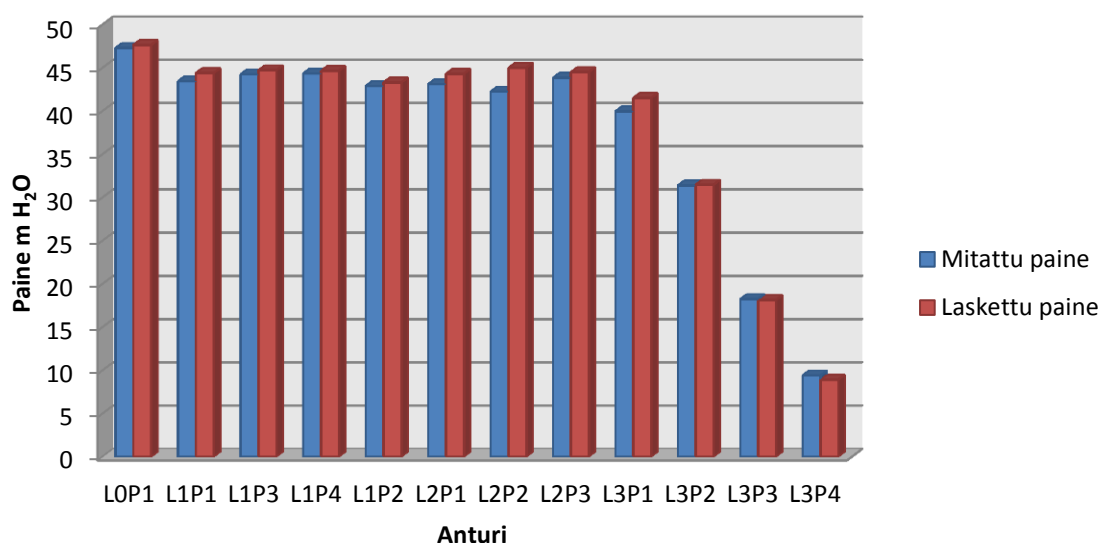
Epanet putken tunnus	Muutos
p7	Paikallishäviökertoimen nosto arvoon 50
p59	Putken karkeuskerroin 0.25 --> 0.1
p9	Putken karkeuskerroin 0.25 --> 0.5
p54	Putken karkeuskerroin 0.2 --> 0.1
p37	Putken karkeuskerroin 0.2 --> 0.001
p38	Putken karkeuskerroin 0.2 --> 0.001
p53	Putken karkeuskerroin 0.2 --> 0.001
p52	Putken karkeuskerroin 0.2 --> 0.001
p51	Putken karkeuskerroin 0.2 --> 0.1
p41	Paikallishäviökertoimen nosto arvoon 50

Kun kalibrointi suoritettiin korkeimman virtausnopeuden suhteen, heittivät mallin laskemat tulokset viimeisen anturin kohdalla alhaisemmilla virtausnopeuksilla noin 2 metriä vesipatsasta, mikä oli paineesta riippuen 20 - 40 % virheellinen tulos. Tätä eroa ei ollut käytännössä mahdollista hävittää kokonaan vaan malli kalibroitiin niin, että eroa mitattuun tietoon syntyi mahdollisimman vähän jokaisessa tilanteessa.

6.2 Vesijohtoverkoston hydraulisen mallin validointi

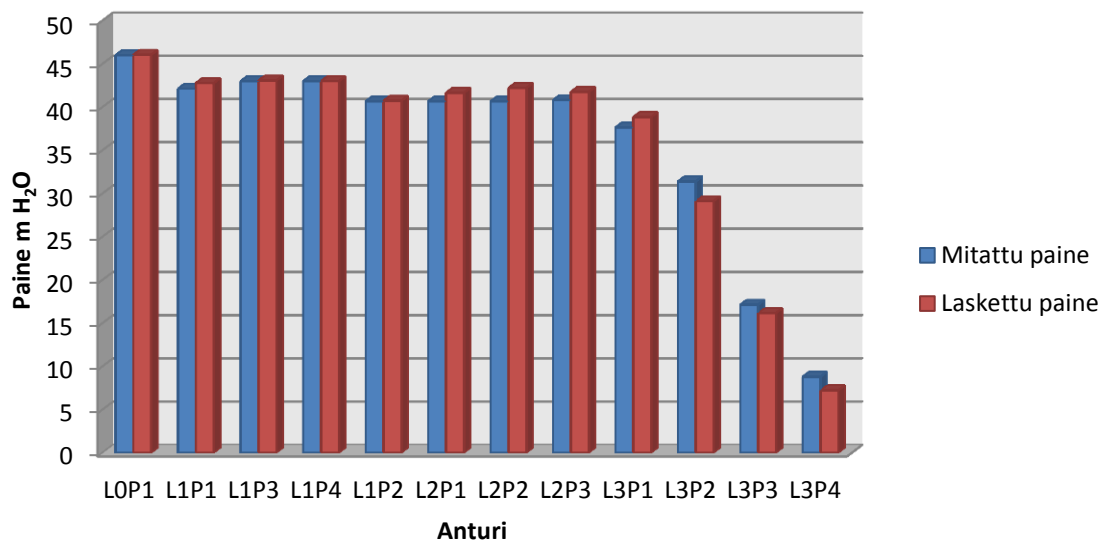
Koevesijohtoverkoston mallin validoinnissa käytettiin neljää eri virtaustilannetta, jotka olivat käytössä myös kalibrointitilanteissa. Mitatun paineen ja mallin laskemien paineiden tulosten vertailut eri validointitilanteissa ovat nähtävillä kuvioissa 11, 12, 13 ja 14. Malli laskee paineet toistuvasti oikein läpi ensimmäisen ja toisen silmukan, mutta viimeisen silmukan kohdalla tapahtuu epäloogisuuksia kun virtausnopeutta tai painetta muutetaan.

6.4 LPM



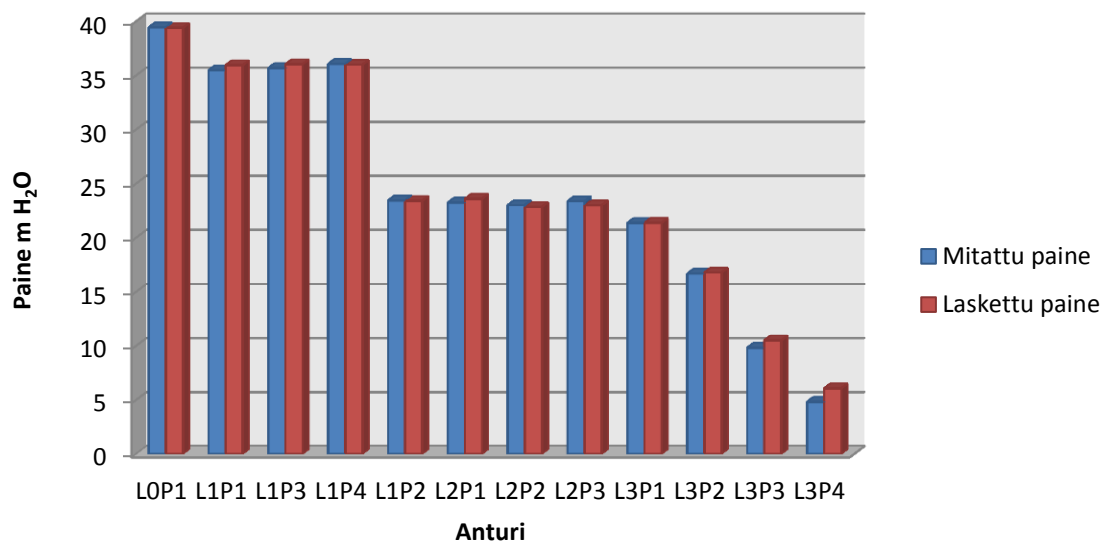
Kuvio 11. Mitatun ja lasketun paineen vertailu verkoston loppupään solmupisteestä 30 otetulla virtaamalla 6,4 LPM

22.2 LPM



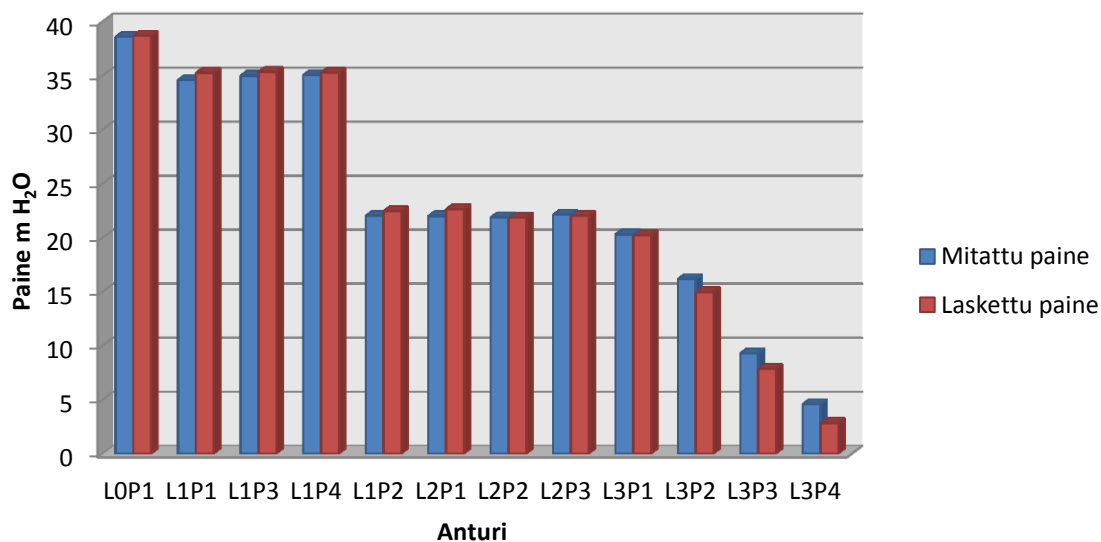
Kuvio 12. Mitatun ja lasketun paineen vertailu virtaamalla 22,2 LPM. Virtaustilanteessa verkoston loppupään solmupisteestä 30 otettiin 6,3 LPM sekä verkoston keskeltä 15,9 LPM solmupisteestä L1FOUT1

74.6 LPM



Kuvio 13. Mitatun ja lasketun paineen vertailu virtaamalla 74,6 LPM. Virtaustilanteessa verkoston loppupään solmupisteestä 30 otettiin 4,3 LPM sekä verkoston keskeltä 70,3 LPM solmupisteestä L1FOUT1

75.4 LPM



Kuvio 14. Mitatun ja lasketun paineen vertailu virtaamalla 75,4 LPM. Virtaustilanteessa verkoston loppupään solmupisteestä otettiin 4,6 LPM sekä verkoston keskeltä 70,8 LPM solmupisteestä L1FOUT1

Validoitua mallia testattiin myös pitkän ajan koeajossa. Pitkäaikainen koeajo osoitti, että virtaustilanteiden muuttuessa malli laskee paineet oikein ensimmäisen ja toisen silmukan osalta, mutta kolmannen silmukan kanssa oli edelleen ongelmia. Malli laski joissakin tilanteissa paineiden olevan jopa kaksi kertaa suurempia kuin mitä mitatut paineet olivat. Tästä heräsi keskustelu mahdollisten virheiden syistä ja yhdeksi mahdolliseksi syyksi epäiltiin ilmakuplien vaikutusta paineen mittaukseen. Verkoston paineenmittaukset sijaitsivat useasti ns. umpiperissä joihin ilmaa voisi todennäköisesti jäädä.

Paineen mittauksen sensorilinjoihin jäänyt ilma tai kaasu voi ilmentyä virheellisinä paineen mittauksen lukemina ja mittauksen hitaana vasteaikana. Lisäksi linjaan jäänyt kaasu synnyttää verkostoon ylimääräisiä ääniä akustisena resonointina. Paineenmittauksen anturilinjaan jäänyt ilmatasku voi aiheuttaa paineen näyttämän olevan pienempi kuin normaalisti (Lin & Holbert, 2010). Työn lopuksi jäljiteltiin vielä yksi samanlainen virtaustilanne mikä oli aiemmissa testeissä jo ollut. Paineet ja virtaamat pystyttiin toistamaan samoiksi kuin ne olivat aiemmissa testeissä olleet. Tämän jälkeen kaksi paineanturia (L3P1 ja L3P2) ilmattiin ruuvaamalla niitä irti verkostosta niin, että anturin juuresta alkoi vuotaa vettä. Lopuksi anturi ruuvattiin takaisin paikalleen ja tarkistettiin anturin näyttämä paine. Lopputuloksena anturit näyttivät edelleen samaa painetta kuin ennen ilmaamista.

7 JOHTOPÄÄTÖKSET

Opinnäytetyön tavoitteena oli toteuttaa aluemittausjärjestelmä Savonian koevesiverkostoon sekä dokumentoida tehdyt muutokset. Valmis mittausjärjestelmä piti saada toimimaan yhdessä Epanetilla luodun mallin kanssa niin, että mallilla pystyttiin luomaan erilaisia vedenkulutustilanteita, jotka vastasivat myös todellista tilannetta koevesiverkostossa.

Opinnäytetyön kirjallisuustutkimusosiossa perehdyttiin vesijohtoverkoston aluemittausjärjestelmään ja vesijohtoverkoston hydrauliseen mallintamiseen. Kirjallisuustutkimus antoi kattavan tietopohjan siitä mitä aluemittausjärjestelmän perustaminen vaatii ja mitkä ovat sen vahvuudet ja heikkoudet. Vahvuuksina aluemittausjärjestelmällä on sen suhteellisen pienen investointisumman hyvä suhde vedenkulutuksen vähenemisen tuomiin säästöihin. Tämän työn aikana käytännön suunnittelu- ja rakentamistyö rajoittui kuitenkin vain laboratorio-olosuhteisiin, mutta samalla se antoi vahvan pohjan lähteä tulevaisuudessa suunnittelemaan ja toteuttamaan vastaavanlaisia järjestelmiä. Suurimmat haasteet työssä olivat verkoston antureiden kalibroimiseen tarvittavien toimintamallien kehittäminen ja tulosten todellisuuden varmentaminen.

Työn aikana sai oppia, että selkeä työn vaiheiden suunnittelu sekä luotettava tehtyjen testejä ja muutosten dokumentointi takaa hyvän faktojen jäljitettävyyden. Kärsivällisyys ja maltillinen asteittainen etenemismalli toimi parhaiten ongelmanratkonnassa. Tutkimustulosten jäljitettävyys varmisti, että tulokset ovat todistettavissa aina, olipa työ missä vaiheessa tahansa. Samalla se palveli myös omaa tekemistä erinäisiä ongelmia ratkoessa kun pystyi joko palauttamaan mieliin mitä oli tehnyt tai tarvittaessa toistamaan samat kokeet uudelleen.

Kirjallisuusosiossa perehdyttiin myös vesijohtoverkoston hydraulisen mallinnuksen teoreettisiin perusteisiin. Perusteisiin tutustumisesta oli selkeästi hyötyä hydraulista mallia luotaessa, kun taustalla oli selkeä ajatusmalli siitä miten tietokone määrittelee vesijohtoverkoston hydraulisen tilan. Hydraulisen mallinnuksen teoreettisia perusteita läpi käydessä tuli myös huomanneeksi, etteivät tietokoneen tavat määrittää vesijohtoverkoston hydraulista tilaa olekaan niin kovin monimutkaisia, vaan laskentatapa on hyvin samankaltainen kuin silmukkkaverkoston hydraulisen tilan ratkaisutapa.

Koevesijohtoverkoston mallintamisen haasteet olivat sen monimutkaisuudessa. Putkistossa on paljon erilaisia liitäntöjä ja vanhoja jo käytöstä poistettuja mittalaitteita, joiden vaikutusta veden paineen muutokseen oli haastellista arvioida. Mallin työstämisen menettelytavat kehittyivät selvästi ajan mittaan kun oppi ymmärtämään miten erilaiset muutokset vaikuttivat kokonaistulokseen. Työ osoitti, että termi paineen pienhäviöt ei ole hyvä kuvaamaan verkoston komponenttien vaikutusta paineen muutokseen vaan paikallishäviöiden selvittämisellä voi olla suuri työllistävä vaikutus koko projektissa.

Malli toimi lopulta hyvin koevesijohtoverkoston paksuimpien putkien osalta, mutta ohuet putket tuottivat jatkuvasti ongelmia mallintamisessa, eikä siihen tämän opinnäytetyön aikana ehditty

vastausta saamaan. Mallintamisen virheiden ja epäloogisuuksien syitä mietittäessä tuli esille hypoteesi verkostoon mahdollisesti jääneistä ilmataskuista, jotka voivat vaikuttaa paineenmittausten tuloksiin. Ajanpuutteen vuoksi kaikkia antureita ei voitu ilmata erikseen vaan verkostosta valittiin kaksi anturia, jotka ilmattiin. Ilmaamisella ei kuitenkaan ollut vaikutusta paineen mittauksen tulokseen.

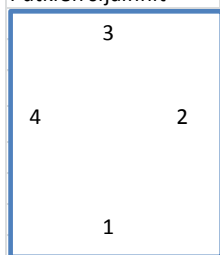
Aluemittaus yhdessä verkostomallin kanssa on hyvä järjestelmä vuotovesien hallintaan. Se tulee varmasti laajenemaan Suomessakin heti kun vuotovesien pienentämiseen ryhdytään oikeasti panostamaan. Tällä hetkellä näyttääkin siltä, että suurin este aluemittausjärjestelmän tai sitä vastaavien vuotovesienhallintajärjestelmien leviämislle ja kehittämislle ovat asenteet niiden tarpeellisuudesta sekä yleisesti tekniikoiden luotettavuudesta.

LÄHTEET

- ALVISI, S. & FRANCHINI, M. 2013. A procedure for the design of district metered areas in water distribution systems. Department of Engineering, University of Ferrara [verkkoaineisto].[viitattu 2015-03-22] Saatavissa:
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705814000083>
- Bentley [verkkoaineisto].[Viitattu 2015-04-10] Saatavissa:
<http://www.bentley.com/fi-FI/Products/WaterGEMS/>
- FARLEY, M. & TROW, S. 2003. Losses in water distribution networks: a practitioners' guide to assessment, monitoring and control. London, UK: IWA Publishing, 253-260 [viitattu 2015-04-04]. Saatavissa:
<http://www.iwapublishing.com/books/9781900222112/losses-water-distribution-networks>
- FARLEY, M. 2010 Are there alternatives to the DMA? [verkkoaineisto].[viitattu 2015-04-15] Saatavissa:
http://www.shpmedia.com/images/AW_Dec_SpecialFeature-DMA_V3.pdf
- HERMANN, L. 2013. An Integrated Approach to Modeling Pipeline Hydraulics in a Gathering and Production System [verkkoaineisto].[viitattu 2015-04-28] Saatavissa:
http://www.aspentech.com/pipeline_hydraulics_white_paper.pdf
- Innovyze [verkkoaineisto].[viitattu 2015-04-10] Saatavissa:
<http://www.innovyze.com/products/infowater/>
- Kang Lin and Keith Holbert 2010. Pressure Sensing Line Diagnostics in Nuclear Power Plants, Nuclear Power, Pavel Tsvetkov (Ed.), ISBN: 978-953-307-110-7, InTech [verkkoaineisto].[viitattu 2015-05-18] Saatavissa:
<http://www.intechopen.com/books/nuclear-power/pressure-sensing-line-diagnostics-in-nuclear-power-plants>
- KUDELA, H. 2009. Hydraulic losses in pipes [verkkoaineisto].[viitattu 2015-03-28]. Saatavissa:
http://fluid.itcmp.pwr.wroc.pl/~znmp/dydaktyka/fundam_FM/Lecture11_12.pdf
- M. FANTOZZI, F. CALZA, A. LAMBERT. 2009 Experience and results achieved in introducing District Metered Areas (DMA) and Pressure Management Areas (PMA) at Enia utility (Italy) [verkkoaineisto].[viitattu 2015-03-28]. Saatavissa:
<http://goo.gl/rZ0Jov>
- Vesihuolto II RIL 2003. RIL 124 -1 Helsinki: Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry. ISBN: 951-758-431-8
- Thewodros G. Mamo, Ilan Juran 2014. The Potential Future Innovative Application of Municipal Water Supply Database [verkkoaineisto].[viitattu 2015-05-20] Saatavissa:
<http://www.ijser.in/archives/v2i3/SjIwMTMxNDQ=.pdf>
- UKWIR. 1999. A Manual of DMA Practice. Report Ref. No. 99/WM/08/23. Lontoo: U.K. Water Industry Research. ISBN: 1 84057 160 8. Saatavilla:
<http://ukwir.forefront-library.com/reports/99-wm-08-23/336/90140/90141/90141>
- WRIGHT, R. & STOIANOV, I. 2013 Dynamic Topology in Water Distribution Networks [verkkoaineisto].[viitattu 2015-04-2] Saatavissa:
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705814001933>

LIITE 1. PAIKALLISHÄVIÖIDEN LASKENNAT

Putkien sijainnit



pumppu

Liitos		K-arvo
T		0.35
Kulma 90°		0.8
Kartiomainen laajeneminen	$D_2/D_1=0.8$	0.03
	$D_2/D_1=0.5$	0.08
	$D_2/D_1=0.2$	0.13
Äkillinen laajeneminen	$D_2/D_1=0.8$	0.16
	$D_2/D_1=0.5$	0.57
	$D_2/D_1=0.2$	0.92
Kartiomainen supistuminen	$D_2/D_1=0.8$	0.05
	$D_2/D_1=0.5$	0.07
	$D_2/D_1=0.2$	0.08
Äkillinen supistuminen	$D_2/D_1=0.8$	0.18
	$D_2/D_1=0.5$	0.37
	$D_2/D_1=0.2$	0.49
Palloventtiili - auki		0.05
Loivasti taivuttava kulma 90°	$r/D = 4$	0.17
	$r/D = 2$	0.22
	$r/D = 1$	0.37
180° kulma		0.2

Liitos	Linkkiputket			Pumppulinja	
	2-3	4-5	6-7	1.1	1.2
T	2	1	1	2	1 kpl
Kulma 90°	1		1	2	2 kpl
Palloventtiili -auki				1	1 kpl
180° kulma	1				
Paikallishäviö ξ	1.7	0.35	1.15	2.3	1.95
epanet putki	35,45	p32,p31,8	p9	p43	p1

Paikallishäviö koonnit ja sijainti epanetissä

Kierros 1				
Paikallishäviö ξ	1.6	0.8	1.15	2.3
Epanet putki	3,p22,p71	p70	p10,p11	p69
Kierros 2				
Paikallishäviö ξ	1.95	1.04	1.15	1.56
Epanet putki	p19,p23,p20	p68	p12,p13	2
Kierros 3				
Paikallishäviö ξ	2.2	1.04	1.15	2.01
Epanet putki	52,p67	p66	p14,p15	p65
Kierros 4				
Paikallishäviö ξ	1.5	1.04	1.15	1.56
Epanet putki	p27,p28,p26	p64	p16,p29,p17	p63
Kierros 5				
Paikallishäviö ξ	4.27	1.79	0.92	4.24

Pienhäviö H _m		Kierros 1			Kierros 1							
putki	1	2	3	4			Putki	1	2	3	4	
					Liitos			1	2	3	4	
	0.044769621	0	0.022385	0.089539	T			2		1	4	kpl
	0.051165281	0.05117	0.051165	0.051165	Kulma 90°			1	1	1	1	kpl
	0	0	0	0								kpl
	0	0.00576	0	0.003837	Kartiomainen	D ₂ /D ₁ =0.8			3		2	kpl
	0	0	0	0	laajeneminen	D ₂ /D ₁ =0.5						kpl
	0	0	0	0		D ₂ /D ₁ =0.2						kpl
	0	0	0	0								kpl
	0	0	0	0	Äkillinen	D ₂ /D ₁ =0.8						kpl
	0	0	0	0	laajeneminen	D ₂ /D ₁ =0.5						kpl
	0	0	0	0		D ₂ /D ₁ =0.2						kpl
	0	0	0	0								kpl
	0	0.00959	0	0.006396	Kartiomainen	D ₂ /D ₁ =0.8			3		2	kpl
	0	0	0	0	supistuminen	D ₂ /D ₁ =0.5						kpl
	0	0	0	0		D ₂ /D ₁ =0.2						kpl
	0	0	0	0								kpl
	0	0	0	0	Äkillinen	D ₂ /D ₁ =0.8						kpl
	0	0	0	0	supistuminen	D ₂ /D ₁ =0.5						kpl
	0	0	0	0		D ₂ /D ₁ =0.2						kpl
	0.00639566	0	0	0	Palloventtiili -			2				kpl
yht.	0.102330561	0.06651	0.07355	0.150938	auki							
	1.6	0.8	1.15	2.3								
Kierros 2												
		kierros 2			Liitos		Putki	1	2	3	4	
					T			3		1	4	kpl
	0.034262465	0	0.011421	0.045683	Kulma 90°			1	1	1		kpl
m/s	0.026104735	0.0261	0.026105	0								kpl
	0	0	0	0								kpl
	0	0.00294	0	0.001958	Kartiomainen	D ₂ /D ₁ =0.8			3		2	kpl
	0	0	0	0	laajeneminen	D ₂ /D ₁ =0.5						kpl
	0	0	0	0		D ₂ /D ₁ =0.2						kpl
	0	0	0	0								kpl
	0	0	0	0	Äkillinen	D ₂ /D ₁ =0.8						kpl
	0	0	0	0	laajeneminen	D ₂ /D ₁ =0.5						kpl
	0	0	0	0		D ₂ /D ₁ =0.2						kpl
	0	0	0	0								kpl
	0	0.00489	0	0.003263	Kartiomainen	D ₂ /D ₁ =0.8			3		2	kpl
	0	0	0	0	supistuminen	D ₂ /D ₁ =0.5						kpl
	0	0	0	0		D ₂ /D ₁ =0.2						kpl
	0	0	0	0								kpl
	0	0	0	0	Äkillinen	D ₂ /D ₁ =0.8						kpl
	0	0	0	0	supistuminen	D ₂ /D ₁ =0.5						kpl
	0	0	0	0		D ₂ /D ₁ =0.2						kpl
	0.003263092	0	0	0	Palloventtiili -			2				kpl
yht.	0.063630292	0.03394	0.037526	0.050904	auki							
	1.95	1.04	1.15	1.56								
Kierros 3												
		kierros 3			Liitos		Putki	1	2	3	4	
					T			4		1	3	kpl
	0.257682287	0	0.064421	0.193262	Kulma 90°			1	1	1	1	kpl
	0.147247021	0.14725	0.147247	0.147247								kpl
	0	0	0	0								kpl
	0	0.01657	0	0.011044	Kartiomainen	D ₂ /D ₁ =0.8			3		2	kpl
	0	0	0	0	laajeneminen	D ₂ /D ₁ =0.5						kpl
	0	0	0	0		D ₂ /D ₁ =0.2						kpl
	0	0	0	0								kpl
	0	0	0	0	Äkillinen	D ₂ /D ₁ =0.8						kpl
	0	0	0	0	laajeneminen	D ₂ /D ₁ =0.5						kpl
	0	0	0	0		D ₂ /D ₁ =0.2						kpl
	0	0	0	0								kpl
	0	0.02761	0	0.018406	Kartiomainen	D ₂ /D ₁ =0.8			3		2	kpl
	0	0	0	0	supistuminen	D ₂ /D ₁ =0.5						kpl
	0	0	0	0		D ₂ /D ₁ =0.2						kpl
	0	0	0	0								kpl
	0	0	0	0	Äkillinen	D ₂ /D ₁ =0.8						kpl
	0	0	0	0	supistuminen	D ₂ /D ₁ =0.5						kpl
	0	0	0	0		D ₂ /D ₁ =0.2						kpl
	0	0	0	0								kpl
yht.	0.404929308	0.19142	0.211668	0.369958	Palloventtiili -							kpl
	2.2	1.04	1.15	2.01	auki							

Kierros 5											
Liitos		Putki									
		1	2	3	4		1	2	3	4	putki
T		5				kpl	0.165031	0	0	0	
Kulma 90°		2			3	kpl	0.150885	0	0	0.226328	
Kartiomainen laajeneminen	$D_2/D_1=0.8$					kpl	0	0	0	0	
	$D_2/D_1=0.5$	1	2	1	2	kpl	0.002829	0.005658	0.002829	0.005658	
	$D_2/D_1=0.2$					kpl	0	0	0	0	
Äkillinen laajeneminen	$D_2/D_1=0.8$					kpl	0	0	0	0	
	$D_2/D_1=0.5$					kpl	0	0	0	0	
	$D_2/D_1=0.2$					kpl	0	0	0	0	
Kartiomainen supistuminen	$D_2/D_1=0.8$					kpl	0	0	0	0	
	$D_2/D_1=0.5$	1	2	1	2	kpl	0.006601	0.013202	0.006601	0.013202	
	$D_2/D_1=0.2$					kpl	0	0	0	0	
Äkillinen supistuminen	$D_2/D_1=0.8$					kpl	0	0	0	0	
	$D_2/D_1=0.5$					kpl	0	0	0	0	
	$D_2/D_1=0.2$					kpl	0	0	0	0	
Palloventtiili - auki						kpl	0	0	0	0	
							0	0	0	0	
Loivasti taattu kulma 90°	$r/D = 4$	1	1	1	2		0.016032	0.016032	0.016032	0.032063	
	$r/D = 2$						0	0	0	0	
	$r/D = 1$						0	0	0	0	
							0.341378	0.034892	0.025462	0.277252	yht.
							4.27	1.79	0.92	4.24	
Kierros 6											
Liitos		Putki									
		1	2	3	4						
T		3			3	kpl	0.099019	0	0	0.099019	
Kulma 90°		2			3	kpl	0.150885	0	0	0.226328	
Kartiomainen laajeneminen	$D_2/D_1=0.8$					kpl	0	0	0	0	
	$D_2/D_1=0.5$	1	2	1	2	kpl	0.002829	0.005658	0.002829	0.005658	
	$D_2/D_1=0.2$					kpl	0	0	0	0	
Äkillinen laajeneminen	$D_2/D_1=0.8$					kpl	0	0	0	0	
	$D_2/D_1=0.5$					kpl	0	0	0	0	
	$D_2/D_1=0.2$					kpl	0	0	0	0	
Kartiomainen supistuminen	$D_2/D_1=0.8$					kpl	0	0	0	0	
	$D_2/D_1=0.5$	1	2	1	2	kpl	0.006601	0.013202	0.006601	0.013202	
	$D_2/D_1=0.2$					kpl	0	0	0	0	
Äkillinen supistuminen	$D_2/D_1=0.8$					kpl	0	0	0	0	
	$D_2/D_1=0.5$					kpl	0	0	0	0	
	$D_2/D_1=0.2$					kpl	0	0	0	0	
Palloventtiili - auki						kpl	0	0	0	0	
							0	0	0	0	
Loivasti taattu kulma 90°	$r/D = 4$	1	1	1	2		0.016032	0.016032	0.016032	0.032063	
	$r/D = 2$						0	0	0	0	
	$r/D = 1$						0	0	0	0	
							0.275366	0.034892	0.025462	0.37627	yht.
							3.57	1.79	0.92	5.29	
Kierros 7											
Liitos		Putki									
		1	2	3	4						
T		5				kpl	0.165031	0	0	0	
Kulma 90°		2			3	kpl	0.150885	0	0	0.226328	
Kartiomainen laajeneminen	$D_2/D_1=0.8$					kpl	0	0	0	0	
	$D_2/D_1=0.5$	1	2	1	2	kpl	0.002829	0.005658	0.002829	0.005658	
	$D_2/D_1=0.2$					kpl	0	0	0	0	
Äkillinen laajeneminen	$D_2/D_1=0.8$					kpl	0	0	0	0	
	$D_2/D_1=0.5$					kpl	0	0	0	0	
	$D_2/D_1=0.2$					kpl	0	0	0	0	
Kartiomainen supistuminen	$D_2/D_1=0.8$					kpl	0	0	0	0	
	$D_2/D_1=0.5$	1	2	1	2	kpl	0.006601	0.013202	0.006601	0.013202	
	$D_2/D_1=0.2$					kpl	0	0	0	0	
Äkillinen supistuminen	$D_2/D_1=0.8$					kpl	0	0	0	0	
	$D_2/D_1=0.5$					kpl	0	0	0	0	
	$D_2/D_1=0.2$					kpl	0	0	0	0	
Palloventtiili - auki						kpl	0	0	0	0	
							0	0	0	0	

Kierros 8										
Liitos		Putki	1	2	3	4				
T		3				3 kpl	0.099019	0	0	0.099019
Kulma 90°		2				3 kpl	0.150885	0	0	0.226328
Kartiomainen laajeneminen	$D_2/D_1=0.8$					kpl	0	0	0	0
	$D_2/D_1=0.5$	1	2	1	2	kpl	0.002829	0.005658	0.002829	0.005658
	$D_2/D_1=0.2$					kpl	0	0	0	0
Äkillinen laajeneminen	$D_2/D_1=0.8$					kpl	0	0	0	0
	$D_2/D_1=0.5$					kpl	0	0	0	0
	$D_2/D_1=0.2$					kpl	0	0	0	0
Kartiomainen supistuminen	$D_2/D_1=0.8$					kpl	0	0	0	0
	$D_2/D_1=0.5$	1	2	1	2	kpl	0.006601	0.013202	0.006601	0.013202
	$D_2/D_1=0.2$					kpl	0	0	0	0
Äkillinen supistuminen	$D_2/D_1=0.8$					kpl	0	0	0	0
	$D_2/D_1=0.5$					kpl	0	0	0	0
	$D_2/D_1=0.2$					kpl	0	0	0	0
Palloventtiili - auki						kpl	0	0	0	0
						kpl	0	0	0	0
Loivasti taittuva kulma 90°	$r/D = 4$	1	1	1	2	kpl	0.016032	0.016032	0.016032	0.032063
	$r/D = 2$					kpl	0	0	0	0
	$r/D = 1$					kpl	0	0	0	0
							0.275366	0.034892	0.025462	0.37627 yht.
							3.57	1.79	0.92	5.29

LIITE 2. EPANET INPUTFILE

Putket, joissa paikallishäviön arvo on 0 eivät ole oikeita putkia vaan ne ovat olemassa vain mallipiiirroksessa.

[TITLE]

prueba

[JUNCTIONS]

;ID	Elev	Demand	Pattern
n1	3.63	0	;
L0P1	0.75	0	;
n3	3.63	0	;
n4	3.63	0	;1-3 linkki, suljettu
n5	3.7	0	;
n6	3.82	0	;
n7	3.82	0	;3-4 linkki, suljettu
n10	3.65	0	;
n11	3.89	0	;
n12	4.015	0	;
L3P1	4.2	0	;
n14	4.08	0	;
n15	4.08	0	;
n16	4.153	0	;

n17	3.685	0	;
L1P3	3.685	0	;
n19	3.685	0	;
n20	3.755	0	;
L1P4	3.755	0	;
n22	3.755	0	;
n23	3.875	0	;
L2P1	4	0	;
n25	3.875	0	;
n26	3.945	0	;
L2P2	3.3	0	;
n28	3.945	0	;
n29	3.945	0	;
n30	3.63	0	;
L1T2	3.7	0	;
n32	3.7	0	;
L1T1	3.63	0	;
333	3.82	0	;
n35	3.89	0	;
L1T4	3.89	0	;
n37	3.82	0	;
n38	3.89	0	;
L2P3	3.7	0	;
n41	3.89	0	;
L3T1	4.015	0	;
n43	4.015	0	;
L3P2	4.065	0	;
L3T2	4.065	0	;
n46	4.065	0	;
L3P3	4.153	0	;
L3T3	4.153	0	;
n49	4.153	0	;
L3P4	4.21	0	;
L3T4	4.21	0	;
n52	4.21	0	;
n53	4.18	0	;
n54	4.153	0	;
n55	4.21	0	;
n56	0.1	0	;
n60	4.305	0	;
n61	4.305	0	;
n62	4.235	0	;

;ID	Node1 Status	Node2	Length	Diameter	Roughness	MinorLoss
p1	L0P1 Open	n1 ;	3.68	41	0.05	1.95
p2	n3 Closed	n4 ;	0.1	41	0.05	0
p7	n12 Open	L3P1 ;	0.7728	12	0.25	50
p8	n14 Open	n15 ;	0.6473	12	0.25	0
p9	n15 Open	n16 ;	14.86	12	0.5	2
p10	n17 Open	L1P3 ;	5.039	41	0.05	0.575
p11	L1P3 Open	n19 ;	3.861	41	0.05	0.575
p12	n20 Open	L1P4 ;	5.039	41	0.05	0.55
p13	L1P4 Open	n22 ;	3.861	41	0.05	0.55
p14	n23 Open	L2P1 ;	5.039	41	0.05	0.55
p15	L2P1 Open	n25 ;	3.861	41	0.05	0.55
p16	n26 Open	L2P2 ;	5.039	41	0.05	0.00135
p17	n28 Open	n29 ;	3.159	41	0.05	0.55
p19	n30 Open	5 ;	5.047	41	0.05	0.6333
p20	L1T2 Open	n32 ;	1.712	41	0.05	0.633
p21	5 Open	n5 ;	0.3335	41	0.05	0
p22	n1 Open	L1T1 ;	3.083	41	0.05	0.533
p23	n5 Open	L1T2 ;	1.152	41	0.05	0.6333
p24	n6 Closed	32 ;	3.201	41	0.05	0.633
p25	n6 Closed	n7 ;	0.7663	41	0.05	0

p26	n35	L1T4	1.167	41	0.05	0.5
	Open	;				
p27	n37	n38	5.963	41	0.05	0.5
	Open	;				
p28	n38	L1T4	0.4574	41	0.05	0.5
	Open	;				
p29	L2P2	n29	0.7024	41	0.05	0
	Open	;				
p31	n41	L2P3	0.01	12	0.2	0.11666
	Open	;				
p32	n38	n41	0.6	12	0.05	0.11666
	Open	;				
p33	L3P1	L3T1	1.068	12	0.25	1.422
	Open	;				
p34	L3T1	n43	1.119	12	0.25	1.422
	Open	;				
p35	L3P2	L3T2	0.6725	12	0.25	0.8925
	Open	;				
p36	L3T2	n46	1.029	12	0.25	0.8925
	Open	;				
p37	L3P3	L3T3	1.032	12	0.001	1.4233
	Open	;				
p38	L3T3	n49	1.379	12	0.001	1.4233
	Open	;				
p39	L3P4	L3T4	0.9218	12	0.001	1.19
	Open	;				
p40	L3T4	n52	1.014	12	0.001	1.19
	Open	;				
p41	n53	L3P4	6.113	12	0.1	50
	Open	;				
p42	n54	n55	7.654	12	0.001	0
	Closed	;				
p43	n56	L0P1	1.4	41	0.05	2.3
	Open	;				
p48	n60	29	15.4	12	0.2	5.29
	Open	;				
p49	n61	n60	8.9	12	0.2	0.92
	Open	;				
p50	n52	n61	15.4	12	0.2	1.79
	Open	;				
p51	n62	n53	15.4	12	0.1	4.24
	Open	;				

p52	n63 Open	n62 ;	8.9	12	0.001	0.92
p53	n49 Open	n63 ;	15.4	12	0.001	1.79
p54	n16 Open	L3P3 ;	5.93	12	0.1	1.4233
p55	n64 Open	n14 ;	15.4	12	0.1	5.29
p56	n65 Open	n64 ;	8.9	12	0.25	0.92
p57	n46 Open	n65 ;	15.4	12	0.25	1.79
p58	n66 Open	L3P2 ;	3.484	12	0.25	0.8925
p59	n67 Open	n68 ;	15.4	12	0.25	4.24
p60	n69 Open	n67 ;	8.9	12	0.25	0.92
p61	n43 Open	n69 ;	15.4	12	0.25	1.79
p62	n68 Open	n66 ;	2.284	12	0.25	0.8925
p63	n28 Open	n11 ;	15.4	41	0.05	1.56
p64	n35 Open	n26 ;	15.4	41	0.05	0
p65	n25 Open	n37 ;	15.4	41	0.05	2.01
p66	n70 Open	n23 ;	15.4	41	0.05	1.04
p67	L1T3 Open	n70 ;	1.605	41	0.05	1.1
p68	n32 Open	n20 ;	15.4	41	0.05	1.04
p69	n19 Open	n30 ;	15.4	41	0.05	1.15
p70	n71 Open	n17 ;	15.4	41	0.05	0.8
p71	L1T1 Open	n71 ;	2.511	41	0.05	0.533
2	n22 Open	2 ;	15.4	41	0.05	1.56

3	2	3	2.30	41	0.05	0.533
	Open	;				
4	3	n3	0.1	41	0.05	0
	Open	;				
7	n3	n1	0.2	41	0.05	0
	Open	;				
8	L2P3	n12	0.2	12	0.25	0.5
	Open	;				
1	3	L1P1	0.05	41	0.05	0
	Open	;				
9	n29	6	0.15	41	0.05	0
	Open	;				
10	6	FlowOUT		0.05	41	0.05
	0	Open	;			
31	29	n55	0.1	12	0.001	0
	Open	;				
32	29	28	1.1	12	0.001	0
	Open	;				
33	28	27	1.5	12	0.001	0
	Open	;				
34	27	30	0.4	12	0.001	0
	Open	;				
35	n5	4	0.2	16	0.05	2.5
	Open	;				
41	L1P1	L1WH	0.01	12	0.05	0
	Open	;				
42	5	n10	0.05	41	0.05	0
	Open	;				
45	4	333	0.2	16	0.05	2.5
	Open	;				
46	333	32	0.1	41	0.05	0
	Open	;				
47	32	33	0.05	41	0.05	0
	Open	;				
48	33	L2WH	0.01	41	0.05	0
	Open	;				
49	33	L1P2	0.01	41	0.05	0
	Open	;				
50	n6	n10	0.2	16	0.05	0.00261
	Closed	;				
51	n11	n7	3.2	41	0.05	0
	Open	;				

52	333	L1T3	0.3	41	0.05	1.1
	Open	;				
53	n55	26	1.9	12	0.001	0
	Open	;				
6	7	n56	0.13	22.6	0.05	0
	Open	;				
11	10	9	0.3	22.6	0.05	0
	Open	;				
12	9	8	0.08	22.6	0.05	0
	Open	;				
13	8	7	0.6737	22.6	0.05	0
	Open	;				

[PUMPS]

;ID	Node1	Node2	Parameters			
5	1	10	HEAD HC	SPEED 0.705	;	

[VALVES]

;ID	Node1	Node2	Diameter	Type	Setting	MinorLoss
-----	-------	-------	----------	------	---------	-----------

[TAGS]

NODE	n5	3.88
NODE	n10	3.88
NODE	n20	3.88
NODE	n22	3.88
NODE	L1T2	L1T2
NODE	n32	3.88
NODE	L1T1	L1T1
NODE	333	L1T3
NODE	L1T4	L1T4
NODE	L2P3	Painemittari
NODE	n41	Flowmeter
NODE	4	Flow

[DEMANDS]

;Junction	Demand	Pattern	Category
-----------	--------	---------	----------

[STATUS]

;ID	Status/Setting
5	0.705

[PATTERNS]

;ID Multipliers

[CURVES]

;ID X-Value Y-Value

;EFFICIENCY: Efficiencycurve

EC	0.533	0.9
EC	3.35	5.7
EC	8.333	13
EC	13.25	19.1
EC	16.65	22.8
EC	24.833	30
EC	30	33.2
EC	33.333	35
EC	36.833	36.5
EC	41.666	37.9
EC	44.833	38.6
EC	49.833	39
EC	54.166	38.8
EC	58.333	38.1
EC	61.833	37.1
EC	65	35.8
EC	66.6	43
EC	70	42
EC	73.33	38
EC	74.17	37

;PUMP: Grundfos CR 3-15

HC	0.533	96.5
HC	3.35	95.2
HC	8.333	93.2
HC	13.250	91.5
HC	16.65	90.4
HC	24.833	87
HC	30	84.3
HC	33.333	82
HC	36.833	79.5
HC	41.666	75.4
HC	44.833	72.4
HC	49.833	67.2
HC	54.166	62.4
HC	58.333	57.2
HC	61.833	52.6
HC	65	48.2

HC	66.6	48
HC	70	44
HC	73.33	38
HC	74.17	36

[CONTROLS]

[RULES]

[ENERGY]

Global Efficiency		75	
Global Price		0.075	
Demand Charge		0	
Pump	5	Efficiency	EC

[EMITTERS]

;Junction Coefficient

[QUALITY]

;Node InitQual

[SOURCES]

;Node Type Quality Pattern

[REACTIONS]

;Type Pipe/Tank Coefficient

[REACTIONS]

Order Bulk	1
Order Tank	1
Order Wall	1
Global Bulk	0
Global Wall	0
Limiting Potential	0
Roughness Correlation	0

[MIXING]

;Tank Model

[TIMES]

Duration	0
----------	---

Hydraulic Timestep	1:00
Quality Timestep	0:05
Pattern Timestep	1:00
Pattern Start	0:00
Report Timestep	1:00
Report Start	0:00
Start ClockTime	12 am
Statistic	None

[REPORT]

Status	No
Summary	No
Page	0

[OPTIONS]

Units	LPM
Headloss	D-W
Specific Gravity	1
Viscosity	1
Trials	40
Accuracy	0.001
CHECKFREQ	2
MAXCHECK	10
DAMPLIMIT	0
Unbalanced	Continue 10
Pattern	1
Demand Multiplier	1.0
Emitter Exponent	0.5
Quality	None mg/L
Diffusivity	1
Tolerance	0.01

[COORDINATES]

;Node	X-Coord	Y-Coord
n1	2251.70	957.54
L0P1	2252.52	954.11
n3	2251.33	957.54
n4	2250.93	957.54
n5	2253.69	958.40
n6	2240.07	958.40
n7	2239.29	958.40
n10	2253.39	957.99

n11	2235.24	959.26
n12	2229.16	959.25
L3P1	2229.98	959.26
n14	2222.55	960.12
n15	2223.19	960.12
n16	2211.94	960.12
n17	2266.88	962.25
L1P3	2261.84	962.25
n19	2257.98	962.25
n20	2266.15	963.11
L1P4	2261.11	963.11
n22	2257.25	963.11
n23	2254.45	963.11
L2P1	2249.41	963.11
n25	2245.55	963.11
n26	2253.73	963.98
L2P2	2248.69	963.98
n28	2244.83	963.98
n29	2247.98	963.98
n30	2248.34	958.11
L1T2	2254.86	958.40
n32	2256.57	958.40
L1T1	2255.33	957.53
333	2243.26	958.40
n35	2244.14	959.26
L1T4	2243.07	959.25
n37	2236.57	958.89
n38	2242.52	959.25
L2P3	2230.42	957.63
n41	2232.03	957.63
L3T1	2231.05	959.26
n43	2232.17	959.26
L3P2	2229.37	960.11
L3T2	2230.42	960.12
n46	2231.45	960.12
L3P3	2217.87	960.12
L3T3	2218.90	960.12
n49	2220.28	960.12
L3P4	2217.62	960.98
L3T4	2218.54	960.98
n52	2219.56	960.98
n53	2211.55	960.47

n54	2216.41	960.12	
n55	2210.66	960.98	
n56	2253.57	953.26	
n60	2220.24	965.70	
n61	2229.14	965.70	
n62	2220.96	964.84	
n63	2229.86	964.84	
n64	2232.13	964.84	
n65	2241.03	964.84	
n66	2226.26	960.12	
n67	2232.85	963.98	
n68	2224.00	959.79	
n69	2241.75	963.98	
n70	2244.86	958.40	
n71	2257.29	957.54	
2	2246.62	958.08	
3	2251.05	957.35	
L1P1	2251.26	957.35	
6	2247.98	964.27	
FlowOUT		2247.76	964.27
26	2211.23	960.17	
27	2215.75	960.30	
28	2212.54	960.30	
29	2210.96	961.15	
30	2215.75	959.02	
4	2248.01	955.81	
L1WH		2251.35	957.41
5	2253.39	958.40	
32	2242.91	958.40	
33	2242.91	958.05	
L1P2	2242.76	957.85	
L2WH		2243.07	957.85
L1T3	2243.69	958.40	
7	2254.22	953.26	
8	2254.88	953.26	
9	2255.81	953.26	
10	2256.65	953.26	
1	2258.87	954.13	

[VERTICES]

;Link	X-Coord	Y-Coord
p1	2250.83	954.11

p1	2250.83	956.44
p1	2251.70	957.02
p9	2223.19	958.32
p9	2211.94	958.32
p19	2250.94	958.34
p19	2251.25	958.40
p27	2240.05	959.26
p32	2242.52	957.63
p41	2214.67	960.98
p42	2216.41	959.60
p42	2210.66	959.60
8	2229.17	957.62
35	2253.69	955.80
45	2243.26	955.82
50	2240.06	956.52
50	2253.39	956.52
51	2236.92	958.40
53	2210.87	960.98
53	2210.77	960.90
53	2210.96	960.90
53	2210.96	960.63
53	2211.10	960.63
53	2211.10	960.90
53	2211.18	960.96
53	2211.39	960.96
53	2211.39	961.02
53	2211.61	961.02
53	2211.61	961.07
53	2211.86	961.07
53	2211.97	961.14
53	2211.77	961.14
53	2211.94	961.25
53	2211.75	961.25
53	2211.59	961.14
53	2211.23	961.14

[LABELS]

;X-Coord	Y-Coord	Label & Anchor Node
2229.97	956.16	"Pressure and Flow"
2229.74	956.77	" "
2262.21	966.51	"L1P3" L1P3
2258.21	967.19	"L1P4" L1P4

2249.71	966.66	"L2P1" L2P1
2246.32	967.24	"L2P2" L2P2
2242.95	968.77	"FlowOUT"
2229.67	954.96	"L2P3" L2P3
2226.13	956.60	"L3P1" L3P1
2225.17	958.71	"L3P2" L3P2
2216.42	957.41	"L3P4" L3P4
2218.30	955.25	"L3P3" L3P3
2247.68	953.97	"L1P1" L1P1
2250.91	951.71	"L0P1" L0P1
2247.03	952.09	"L1WH" L1WH
2239.07	954.20	"L1P2" L1P2
2260.97	970.37	"LOOP 1"
2248.27	970.97	"LOOP2"
2230.68	971.73	"LOOP3"

[BACKDROP]

DIMENSIONS	2207.84	952.64	2269.69	966.32
------------	---------	--------	---------	--------

UNITS	None
-------	------

FILE

OFFSET	0.00	0.00
--------	------	------

[END]