

Matti Niemi-Nikkola

PAINE-EROSÄÄTIMEN MITOITUS JA PAINE-ERON HUOJUNTA

PAIN-EROSÄÄTIMEN MITOITUS JA PAIN-ERON HUOJUNTA

Matti Niemi-Nikkola
Opinnäytetyö
Kevät 2015
Talotekniikan koulutusohjelma
Oulun ammattikorkeakoulu

TIIVISTELMÄ

Oulun ammattikorkeakoulu
Talotekniikan koulutusohjelma

Tekijä: Matti Niemi-Nikkola

Opinnäytetyön nimi: Paine-erosäätimen mitoitus ja paine-eron huojunta

Työn ohjaajat: Mikko Niskala, Veli-Matti Mäkelä

Työn valmistumislukukausi ja -vuosi: Kevät 2015 Sivumäärä: 68 + 3 liitettä

Opinnäytetyön teettäjä Oulun Energia on Oulun alueen kaukolämpöverkon omistaja ja kaukolämmön tuottaja. Aihe sai alkunsa kaukolämpöpiirustusten ja -keskusten tarkastusten yhteydessä, kun paine-erosäätimen mitoitusavoissa ilmeni suunnittelijoiden ja valmistajien välisiä ristiriitaisuuksia. Työn alkuperäisenä tavoitteena oli luoda mitoitusohje, jota seuraamalla pystyttäisiin valitsemaan kaukolämpöjärjestelmään varmatoiminen ja säädöltään huojumaton paine-erosäädin valmistajasta riippumatta. Aiheen laajuuden ja monimuotoisuuden vuoksi työssä keskityttiin tutkimaan paine-erosäätimen mitoitusta, toimintaa ja huojumista ja sen syitä.

Tutkinta toteutettiin haastattelemalla Danfossia, IMI-Hydronicia ja Siemensiä mitoituksesta ja huojunnasta, sillä heidän paine-erosäätimensä ovat yleisimmin käytettyjä Oulun alueella. Huojuntaa ja säätimen toimintaa tutkittiin myös mitaamalla viisi kohdetta eri puolilta Oulua. Lisäksi kohteista tarkasteltiin säätöventtiilien auktoriteetit ja paine-erosäätimen mitoitus Oulun Energian ja paine-erosäätimen valmistajan tavoilla. Mittaukset toteutettiin kaukolämpöinsinööri Heikki Niemen avustamana syksyllä 2014 ja mitoittaminen sekä tulosten analysointi suoritettiin keväällä 2015.

Aiheen monimuotoisuuden vuoksi työssä ei saatu selkeitä ja yksiselitteisiä tuloksia mitoituksesta eikä huojunnasta. Mitoituksesta ilmeni mitoitusvirtaaman monta eri laskutapaa ja se, että virtaama on ehdottomasti tärkein asia paine-erosäädintä valittaessa. Huojuntaa oli nähtävissä kahdessa mitatussa kohteessa, joista toinen on valmistajalla jatkotutkimuksissa. Huojunnan syyksi kaikki painottivat väärin mitoittettua tai viallista kapillaariputkea, ja kahden mukaan sen voi aiheuttaa väärä k_{vs} -arvo.

Asiasanat: Kaukolämpö, Paine-erosäädin, Paine-ero, Auktoriteetti, Mitoittaminen, Huojunta, Kestävä kehitys

ABSTRACT

Oulu University of Applied Sciences
Building services, HVAC-Engineering

Author: Matti Niemi-Nikkola

Title of thesis: Sizing of Independent Pressure Differential Regulator and Constant Changing of Pressure Difference

Supervisors: Mikko Niskala, Veli-Matti Mäkelä

Term and year when the thesis was submitted: Spring 2015 Pages: 68 + 3 appendices

The commissioner of the thesis is Oulun Energia, the owner of Oulu's district heating network and producer of district heating energy. The idea for the thesis was born from contradictions between Oulun Energia, manufacturers, and designing engineers about how to size pressure differential regulator correctly. The original goal was to create general guidelines how to do it right but the broadness and diversity of the subject forced to focus only on research on how manufacturers size it, how the regulator really works, and what causes this "swinging".

Researching was done by interviewing three different manufacturers, Danfoss, IMI-Hydronic and Siemens. Their pressure regulators are the most commonly used in Oulu. District heating units in five buildings were also measured to see how their pressure regulators behave and if there is any notable swinging to be seen. In addition to measuring, their regulator valves' authorities were inspected according of Oulun Energia and the manufacturers, to see their sizing effectivity to the system and to the pressure regulator's behavior. District heating engineer Heikki Niemi helped in measuring the chosen buildings.

Results were not clear since the subject turned out to be so diverse and unclear. In terms of sizing, the most certain result was the many methods to calculate the sizing flow and that the flow is the most crucial criteria in sizing. It was possible to see swinging in two of the measurements. One of those is in deeper research on behalf of the manufacturer. All three manufacturers emphasized the role of the signal tubes in causing swinging. Two of them also mentioned too big size of the valve to be possible cause of swinging.

Keywords: District heating, pressure differential controller, pressure difference, valve sizing, swinging, valve authority, Sustainable development

ALKULAUSE

Haluan kiittää Oulun Energiaa mielenkiintoisesta ja haastavasta aiheesta. Eri-tyisesti haluan kiittää kaukolämpöinsinööri Heikki Niemeä, joka oli auttamassa mittauslaitteiden asentamisessa ja joka etsi ja lähetti kaikki pyytämäni tiedot kohteista.

Valtaisa kiitos kuuluu myös Danfossin Jere Saarelalle, IMI-Hydronicin Mikko Lättilälle sekä Siemensin Dennis Lindholmille, jotka jaksoivat vastata kaikkiin kysymyksiini. Ilman heitä työ ei olisi onnistunut.

Oulussa 3.6.2015

Matti Niemi-Nikkola

SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ	3
ABSTRACT	4
ALKULAUSE	5
SISÄLLYS	6
SANASTO	8
1 JOHDANTO	10
2 KAUKOLÄMPÖ	11
2.1 Verkko ja vesi	12
2.2 Lämmönsiirto asiakkaalle	14
2.3 Kytkenät	15
2.4 Paine-ero	17
3 MITOITUS	19
3.1 Kaukolämmön määräskokoelma	19
3.2 Säätoventtiili ja auktoriteetti	19
3.3 Paine-erosäädin	21
4 ESIMERKKIMITOITUS	26
4.1 Oulun Energia	27
4.2 Danfoss	28
4.3 IMI-Hydronic	30
4.4 Siemens	31
4.5 Yhteenveto	34
5 HUOJUNTA	35
5.1 IMI-Hydronic	35
5.2 Siemens	36
5.3 Danfoss	36
6 MITTAUKSET	37
6.1 Mittaaminen	37
6.2 Mittausten tulkinta ja Lyötynkatu 3A:n analyysi	38
6.3 Revonkuja 7A	43

6.4 Ritakierros 5	49
6.5 Teuvo Pakkalan katu 10	54
6.6 Ylioppilaantie 4	59
7 HAVAINNOT JA YHTEENVETO	65
LÄHTEET	67
LIITTEET	69

Liite 1. Siemensin mitoittaman paine-erosäätimen laskelmat

Liite 2. Ritakierros 5 paine-erosäätimen asetusarvon ja kuristaman paineen kuvaajat

Liite 3. Teuvo Pakkalan katu 10 paine-erosäätimen asetusarvon ja kuristaman paineen kuvaajat

SANASTO

Auktoriteetti	Säätöventtiileille laskettava arvo, joka kuvaa valitun venttiilin toimivuutta venttiilin aiheuttaman painehäviön ja käytettävissä olevan paineen suhteenä.
Ensiöpuoli	Ensiöpuolella tarkoitetaan lämmönjakokeskuksen putkistoa ja laitteistoa, jossa kaukolämpövesi virtaa tai joihin sen paine vaikuttaa
Huojunta	Paine-erosäätimen vikatila, joka aiheuttaa lämmönjakokeskuksen käytettävissä olevan paine-eron nopean, jatkuvan ja suuren vaihtelun.
K_v -arvo	Venttiilin läpi menevää virtaamaa kuvaava laskettava arvo. Riippuu virtaamasta ja käytettävissä olevasta paineesta.
K_{vs} -arvo	Säätöventtiilien kokoluokkaa kuvaava arvo. Esim. K_{vs} -arvon ollessa 4,0, venttiilin läpi menevä virtaama on yhden barin paine-erolla 4,0 m ³ /h.
Lämmönjakokeskus	Laitekokonaisuus joka käsittää lämmönsiirtimet, ensiöpuolen ja mahdollisesti toisiopuolen säätölaitteet, pumppauslaitteet, venttiilit ja varusteet (esim. painemittarit) sekä tarvittavan putkiston. Myöhemmin lyhenteenä LJK.
Lämmönsiirrin	Lämmönjakokeskuksen osa, jossa lämpö siirtyy kaukolämpövedestä asiakkaan käyttöveden tai lämmitettävän piirin nesteeseen.
Paine-ero	Kaukolämpöverkon tulo- ja paluuputken paineiden erotus. Käytetään asiakkaan kaukolämpölaitteiston mitoitukseen.

Paine-erosäädin	Ensiöpuolen paluuputkessa oleva komponentti. Järjestelmän paine-eron vaihdellessa suuresti kesä- ja talvitilanteen välillä, paine-ero pystytään pitämään tasaisena meno- ja paluuputkien välisestä paine-erosta huolimatta.
Ripa	Lämmönsiirtimessä oleva muotoilu, joka lisää pinta-alaa parantaen lämmönsiirtymistä.
Säätöventtiili	Kaukolämmössä: Ensiöpuolella lämmönsiirtimen edessä tai sen jälkeen tuleva komponentti, joka säätää kaukolämpöveden virtaamaa lämmönsiirtimen läpi. Normaalisti se on varustettu säätölaitteella ja automatisoitu
Toisiopuoli	Toisiopuolella tarkoitetaan lämmönjakokeskuksen putkistoa, jossa virtaa asiakkaan käyttöveden tai lämmitettävän piirin neste. Tämä käsittää lämpimän käyttöveden, patteri- ja lattialämmityksen, ilmastoinnin jne.

1 JOHDANTO

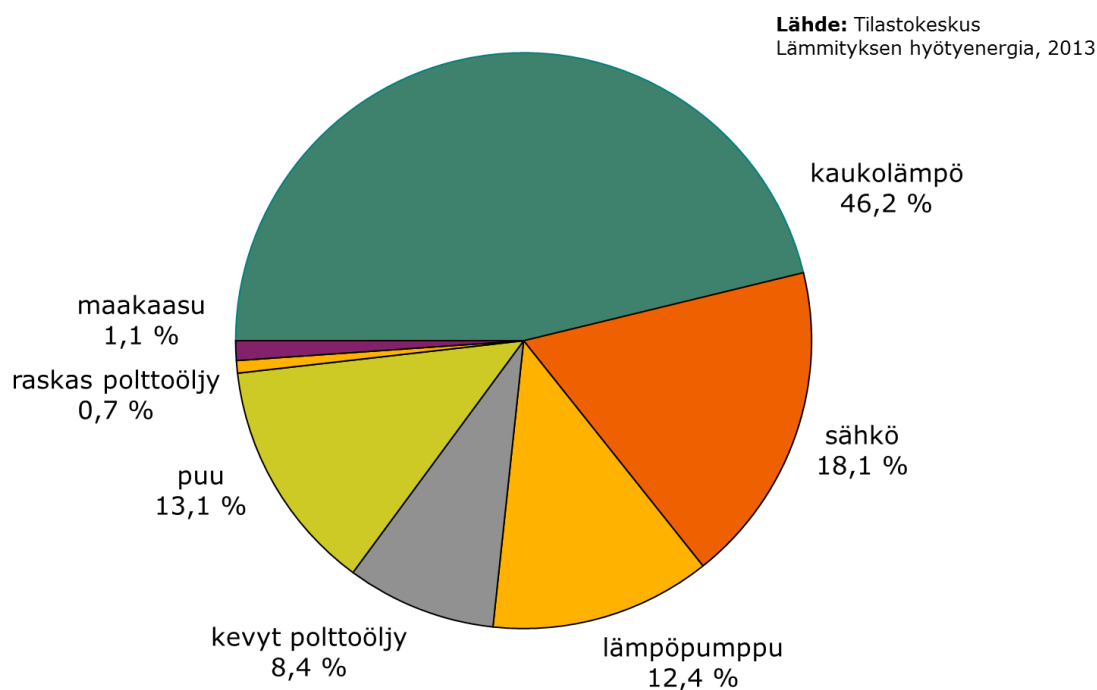
Oulun alueen kaukolämpöverkko kattaa laajan alueen, ja välipumppaamoista huolimatta sen paine-ero vaihtelee suurella välillä. Paine-eron vaihtelun tuomiin säätöventtiilien mitoitusongelmiin yleisimpänä ratkaisuna on paine-erosäädin, joka on Oulussa yleisesti käytössä. Paine-erosäätimen mitoittaminen on kuitenkin epäselvää, minkä myötä riski valita esimerkiksi väärän kokoinen venttiili on huomattava. Väärin mitoitettussa paine-erosäätimessä säätötulos voi värähdellä eli ilmetä niin sanottua huojuntaa. Huojunnan aiheuttamat paineiskut ovat haitallisia niin lämmönsiirrolle kuin lämmönjakokeskuksen laitteistolle.

Oulun Energian kaukolämpöosasto joutui kyseenalaistamaan paine-erosäätimen mitoittamisen siihen liittyvien ongelmien takia, minkä seurauksena he antoivat toimeksiannon selvittää asiaa opinnäytetyönä. Työn tavoitteena on kartoittaa alalla toimivien osapuolien tapoja mitoittaa paine-erosäädin sekä saada näkökulmaa huojuntaan ja siihen, miten se tulisi estää. Työhön mitataan viisi kohdetta Oulun eri alueilta, ja toiveena on löytää paine-erosäätimiä, joissa on havaittavissa huojuntaa. Oulun Energia tarjoaa tarvittavat mittalaitteet suurimmaksi osaksi sekä taustatiedot mitattavista kohteista. Mitoittamiseen ja huojuntaan liittyviä teoreettisia asioita selvitetään tiiviissä yhteistyössä IMI-Hydronicin, Danfossin ja Siemensin kanssa.

2 KAUKOLÄMPÖ

Kaukolämpö on Suomen yleisin lämmitysmuoto ja sen asiakasmäärä kasvaa koko ajan. Kaukolämmöllä tarkoitetaan lämmön keskitettyä tuotantoa, joka kattaa asiakkaan rakennuksen ja käyttöveden tarvitseman lämmityksen. Lämpö siirretään asiakkaalle joko vetenä tai höyrynä. Suomessa käytetään vettä. Kaukolämpöä voidaan käyttää pienistä omakotitaloista suuriin teollisuuskohteisiin eli se soveltuu lähes kaikenlaisille rakennuksille. Kaukolämmön taloudellisuus paranee lämpöverkon tiheyden ja rakennusten tehon tarpeen kasvaessa. (1, s. 6.)

Kaukolämmön osuus lämmitysmuodoista vuonna 2013 oli 46,2 %. Luku käsittää noin 1,4 miljoonaa asuntoa ja yli 2,7 miljoonaa asukasta. Kaukolämmön myynti tapahtuu yleensä sitä varten erikseen perustettuna liiketoimintana. (2.)



KUVA 1. Lämmitysmuotojen jakautuminen vuonna 2013 (2)

Kaukolämpö tuotetaan CHP- eli yhteistuotantovoimalaitoksissa tai lämpökeskuksissa. Vuonna 2014 peräti 72,7 % kaukolämpöenergiasta tuotettiin CHP-laitoksissa. Yhteistuotantovoimalaitoksissa polttoaineena käytetty maakaasu,

kivihiili, turve tai puu hyödynnetään ensisijaisesti sähkön tuotantoon. Prosessista jäävä lämpöenergia käytetään kaukolämpöveden lämmittämiseen. Lämpökeskuksissa kaikki energia käytetään kaukolämpöveden lämmitykseen. Lisäksi verkoissa on yleensä myös huippu- ja varalaitoksia. Nämä käyttävät polttoaineenaan paikkakunnasta riippuen öljyä, haketta, pellettiä tai maakaasua. Kaukolämmön huippulaitokset voidaan ottaa käyttöön, kun peruskuormalaitos ei riitä kattamaan tarvittua tehoa. Normaalisti huippulaitokset ovat käyttämättöminä. Varalaitoksen tehtävänä on turvata lämmön toimitus, jos perustuotantoon tulee ongelmia. (3, s. 3; 1, s. 7.)

2.1 Verkko ja vesi

Kaukolämpöverkossa on siirto-, kortteli- sekä tonttijohtoja. Siirtojohto on kaukolämmön päärunko eli voimalaitokselta tuleva suurin putki. Siirtojohto haarautuu korttelijohdoiksi, jotka kulkevat noin 1,0 metrin syvyydessä katujen, jalkakäytävien ja kevyen liikenteen väylien alla tai puistomaalla. Korttelijohdosta lähtee tonttijohto, joka liitetään asiakkaan laitteisiin. (4.)

Kaukolämpöverkon johdot rakentuvat meno- ja paluuputkielementeistä. Yleisimmät käytetyt putkielementit ovat Mpuk (kuva 2) ja 2Mpuk (kuva 3). 2Mpuk tarkoittaa kahden erillisen putken rakennetta, eli meno- ja paluuputket ovat täysin ominaan. Mpuk sen sijaan tarkoittaa yhden putken rakennetta, jolloin meno- ja paluuputket ovat samassa elementissä. Elementtien perusrakenteessa keskellä on teräksestä valmistettu kaukolämpöputki/-putket, ympärillä eriste ja päälimmäisenä PE (polyeteeni) muovikuori. Eristeenä on polyuretaanivahto, joka on kahden aineen, isosyanaatin ja polyolin välisen reaktion tulos. Ponneaineena reaktiossa käytetään syklopentaania tai hiilidioksidia. Samalla kun polyuretaanivahto toimii lämmöneristeenä, se myös kiinnittää kaikki osat toisiinsa, mikä helpottaa putkien asentamista. (5, s.137–152; 6.)



KUVA 2. Mpukin rakenne (7)

Siirtojohdot ja suuret korttelijohdot tehdään lähes poikkeuksetta 2Mpukilla. Mpukin rakenne soveltuu parhaiten tonttijohtoihin, sillä asiakkaalle menevän putken halkaisija on yleensä pieni. Tällöin Mpuk on helpompi, nopeampi ja kaivuukustannuksiltaan halvempi asennettava kuin 2Mpuk.



KUVA 3. 2Mpukin rakenne (7)

Vesi pitää käsitellä ennen kuin se voidaan lisätä kaukolämpöverkkoon. Fyysiset epäpuhtaudet poistetaan ja putkien sisäisen korroosion estämiseksi vedestä poistetaan happi esimerkiksi lisäämällä siihen hydratsiinia (N_2H_4). Vesi värjätään vihreällä pyraniinilla, jotta mahdolliset vuodot esimerkiksi käyttövesiverkon puolelle tulevat helposti ilmi. (8, s. 16,18.)

2.2 Lämmönsiirto asiakkaalle

Vesi lämmitetään voimalaitoksessa ja asiakkaalle asennetaan oma lämmönjakokeskus, johon kaukolämpöverkon kiertopiiri johdetaan. Voimalaitokselta tuleva vesi luovuttaa asiakkaan lämmönjakokeskuksessa lämpöenergiansa asiakkaan lämmityksen ja lämpimän käyttöveden piireihin. Lämmön luovutus tapahtuu lähes poikkeuksetta levylämmönsiirtimillä. Vedet eivät sekoitu keskenään vaan pysyvät omina piireinään. (9.)

Lämmönjakokeskuksen tärkeimmät komponentit ensiöpuolella ovat säätö- ja sulkuventtiilit sekä lämmönsiirtimet. Kaukolämmön tuloputken suunnasta tarkasteltaessa osat tulevat seuraavassa järjestyksessä: sulkuventtiili, lämmönsiirrin, säätöventtiili(t) ja sulkuventtiili. Lisäksi keskukseen kuuluu ohjauskeskus, joka hallitsee järjestelmän automaatiota.

Ohjauskeskus toimii järjestelmän aivoina. Siihen on ohjelmoitu järjestelmän lämpötilojen raja-arvot sekä säätökäyrät lämmitettävien piirien lämpötiloille. Säätäminen tapahtuu toisiopuolelta mitattujen lämpötilojen perusteella. Näillä tiedoilla ohjauskeskus voi muuttaa säätöventtiilien asentoa. Tällöin siirtimen läpi virtaavan kaukolämpöveden virtaama muuttuu, mikä vaikuttaa suoraan luovutettavissa olevan tehon määrään ja venttiilin hävittämään paineeseen.

Yleisimmät lämmönsiirrintyypit ovat putki- ja levylämmönsiirrin. Suomessa käytetään lähes poikkeuksetta levylämmönsiirtimiä (kuva 4). Sen merkittävimmät edut ovat pieni koko ja suuri lämpöpinta. Normaalisissa levylämmönsiirtimissä on neljä ja välisyöttökytkentään soveltuvassa kuusi liitäntää. Sen sisällä on levyjä joiden sisällä virtaa kaukolämpövesi ja levyjen välissä lämmitettävän piirin vesi. Levyjen pinnat ovat rivoitettu pinta-alan kasvattamiseksi, jonka seurauksena lämmönsiirto tehostuu. Putket kytketään siirtimeen siten, että piirien nesteet kulkevat vastavirtaan toisiinsa nähden.

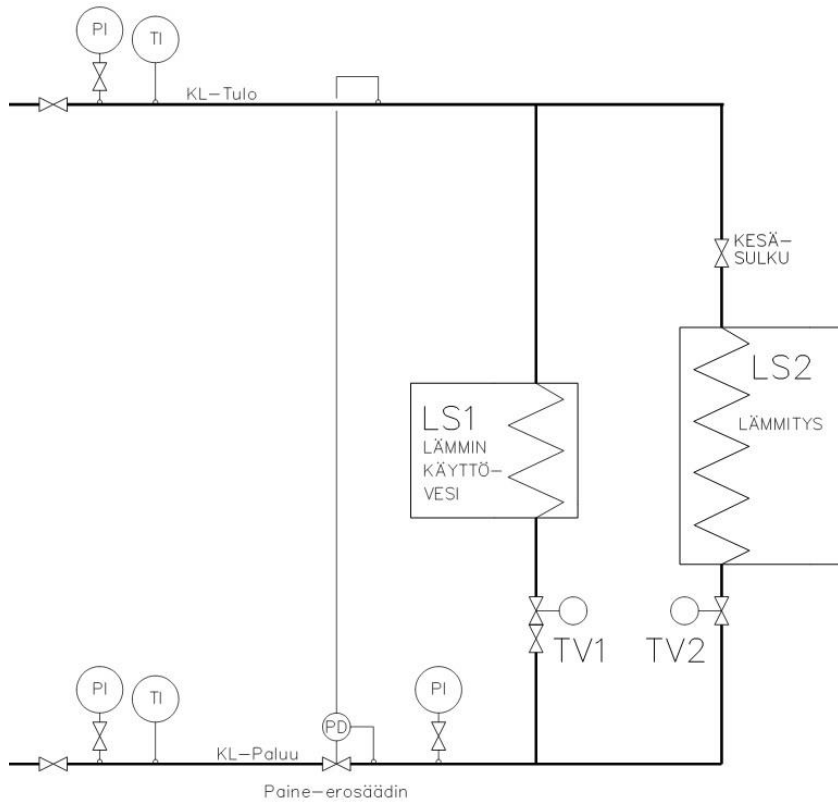


KUVA 4. Danfossin D22 -levylämmönsiirrin (10)

Kaukolämpöveden lämpötila riippuu ulkolämpötilasta. Kesäisin, kun lämmön tarve on minimaalinen, verkoston kaukolämpövesi lämmitetään noin 70 °C:seen lämpimän käyttöveden takia. Alhaisemmalla lämpötilalla lämpöhäviöt jäävät myös pienemmiksi. Kaukolämpöverkko on suljettu ja paineistettu piiri, joten yli 100 °C:n veden käyttö on mahdollista. Talven kovilla pakkasilla veden lämpötila nostetaan korkeimmillaan 115 °C:seen. Korkea lämpötila mahdollistaa kytkennöissä pienemmän putkikoon käytön. (9.)

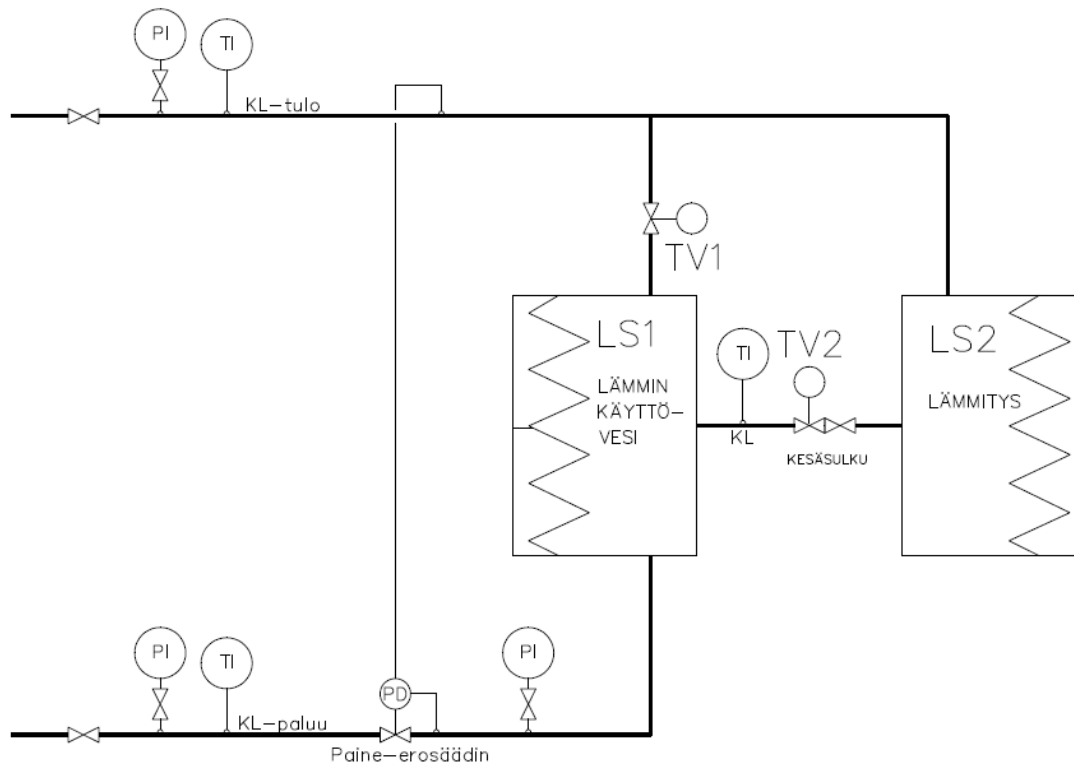
2.3 Kytkenät

Kaukolämpökytkentöjä on kahdenlaisia. K1:n mukaisessa niin sanotussa peruskytkennässä siirtimillä on omat tulo- ja paluuputket ja siirtimien säätöventtiilit ovat paluupuolella (kuva 5). Välisyöttökytkennässä lämmityspuolen paluuvesi johdetaan käyttövesisiirtimen läpi (kuva 6). Välisyöttökytkennässä käyttövesisiirtimen säätöventtiili on yleensä ennen siirintä mahdollistaen tarkemman säädön.



KUVA 5. Kaukolämmön peruskyltettä

Välisyöttökyltettä tehokkuus korostuu parhaiten, jos lämmityspiirin lämpötilat ovat korkeat. Hyvänä esimerkkinä toimivat vanhat patterilämmitteiset rakennukset jotka on suunniteltu lämpötiloille 80 °C / 60 °C. Kylmä käyttövesi tulee rakennukseen noin 5 - 15 °C:n lämpötilassa, joten lämmityspiiristä lähtevä noin 63 °C:n kaukolämpövesi pystyy lämmittämään sitä vielä tehokkaasti.



KUVA 6. Kaukolämmön välisyöttökytkentä

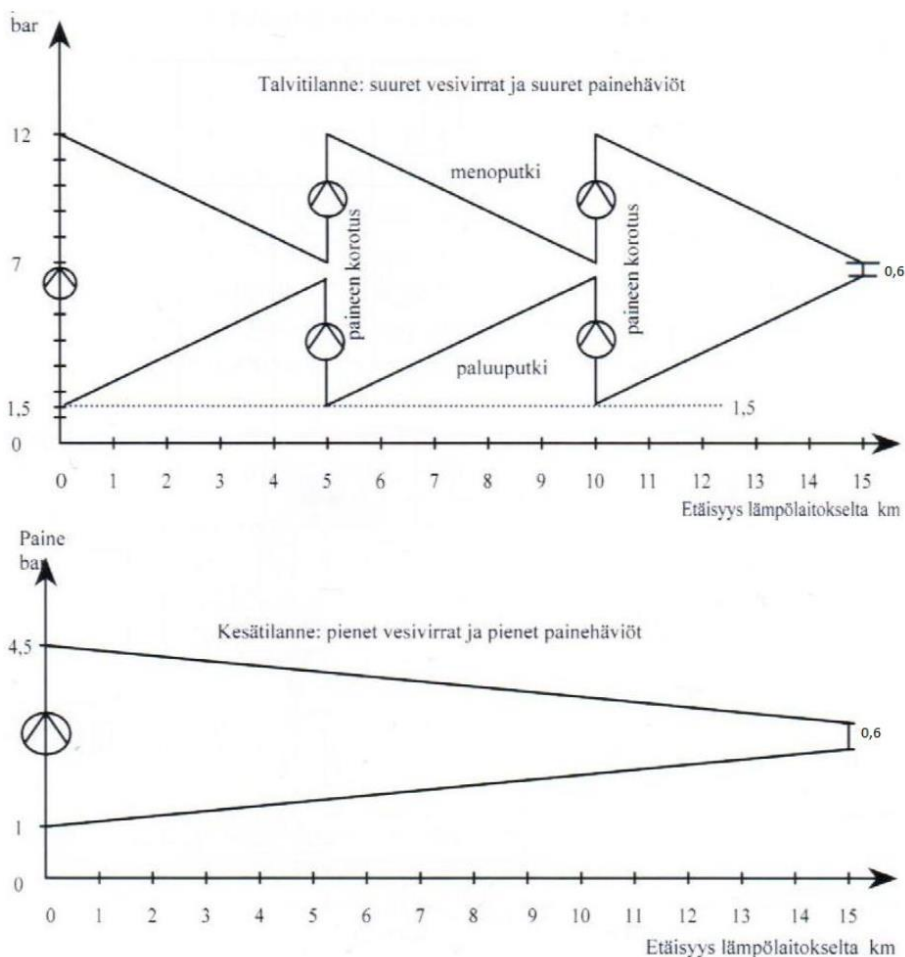
Toinen tilanne, jossa välisyöttökytkentä on kannattava vaihtoehto, on jos lämmintä käyttövedettä kuluu runsaasti tai sille on usein hetkellinen suuri tarve. Parhaan hyödyn välisyöttökytkennästä saa, jos rakennuksessa on molemmat tapaukset eli korkeat lämpötilat lämmityspiirillä ja lämmintä käyttövedettä kuluu paljon. Ihannetilanteista huolimatta lämmityspiiristä palaavan kaukolämpöveden lämpötila on poikkeuksetta korkeampi kuin tulevan kylmän käyttöveden, joten sitä pystyisi hyödyntämään välisyöttökytkennässä. (11, s. 29–30.)

2.4 Paine-ero

Kaukolämpöverkossa oleva paine vaihtelee ulkolämpötilan ja sijainnin mukaan. Ulkolämpötila vaikuttaa asiakkaiden lämmöntarpeeseen, joka korreloi kaukolämpöveden lämpötilan ja pumppaustarpeen kanssa. Sijainti sen sijaan vaikuttaa enemmän, sillä laajoissa kaukolämpöverkoissa on välipumppaamoja. Näiden tehtävänä on pitää verkon virtaama ja paine riittävänä verkoston kaikkiin haaroihin. Ilman näitä verkoston paine-ero, tulo- ja paluuputken paineiden ero,

olisi kohtuuttoman korkea voimalaitoksen lähellä ja käytännössä olematon verkoston latvaosissa (kuva 7). Paine-ero on yksi lämmönjakokeskuksen mitoitusperusteista. K1-määräyskokoelman mukaan lämmöntoimittajan tulee tarjota vähintään 60 kPa:n paine-ero kaikille asiakkailleen. (7, s. 15–16; 11, s. 3.)

Jos paine-eron vaihtelevuus on suuri, minkä seurauksena säätöventtiilien mitoittamiseen ei ole hyväksyttävää ratkaisua, asiakkaalle voidaan asentaa ensiöpuolen paluuputken paine-erosäädin. Paine-erosäätimen tehtävänä on pitää laitteiston käytettävissä oleva paine-ero vakiona. Tällöin säätöventtiilien auktoriteetti pystytään laskemaan paine-erosäätimen asetusarvon perusteella, oli verkoston paine-ero mikä tahansa.



KUVA 7. Kaukolämpöverkoston pumppauspaineet talvi- ja kesätilanteissa (7, s. 16)

3 MITOITUS

3.1 Kaukolämmön määräyskokoelma

Kaukolämmön käyttöä ja mitoitususta Suomessa ohjaa sitä varten erikseen laadittu Suomen energiateollisuuden tekemä 106-sivuinen julkaisu ”Rakennusten kaukolämmitys – Määräykset ja ohjeet”. Viimeisin K1-julkaisu on vuodelta 2013, ja sitä on päivitetty 9.5.2014. Sen pääasiallinen tarkoitus on määrittellä rakennuksen kaukolämmityslaitteiden suunnittelulle, asennukselle ja laitteille perusvaatimukset, joiden toteuttamisella taataan asiakkaiden laitteiden ja lämmönmyyjän kaukolämpöjärjestelmän tehokas toiminta.

Kaukolämpölaitteiden ensiöpuolen mitoitusvirtaamat ilmoitetaan yleensä käyttövedelle lämpötiloilla 70 °C / 20 °C ja lämmitys- sekä ilmastointipiireille 115 °C / 33 °C. Lämpötilat ovat K1:n mukaan korkeimmat sallitut. Paluulämpötilat voisivat olla mitoituksessa matalammatkin, mutta monet suunnittelijat käyttävät näitä koska kyseiset luvut on ilmoitettu K1:ssä. (11, s. 8, 12.)

3.2 Säästöventtiili ja auktoriteetti

Säästöventtiilin mitoituksen voi tehdä kun tietää virtaaman, muiden osien painehäviön ja käytettävissä olevan paine-eron. Näillä tiedoilla voidaan laskea mitoitustilanteen k_v -arvo, jonka perusteella valitaan sitä lähellä oleva k_{vs} -arvo. Venttiilin k_v -arvo lasketaan kaavalla 1. (11, s. 15.)

$$k_v = \frac{q_v}{\sqrt{\Delta p}}$$

KAAVA 1

q_v = lämmönsiirtimen ensiöpuolen mitoitusvirtaama [m^3/h]

Δp = mitoituspaine-ero [bar]

Venttiilin hävittämä paine voidaan laskea kaavalla 2, kun tiedetään mitoitusvirtaama ja venttiilin k_{vs} -arvo. (11, s. 15.)

$$\Delta p_{sv} = \left(\frac{q_v}{K_{vs}} \right)^2 * 100$$

KAAVA 2

q_v = lämmönsiirtimen ensiöpuolen mitoitusvirtaama [m^3/h]

Δp_{sv} =valitun säätöventtiilin aiheuttama painehäviö mitoitusvirtaamalla [kPa]

Auktoriteetti on säätöventtiileille laskettava arvo, joka kuvaa venttiilin toimivuutta. Sen arvo lasketaan seuraavalla kaavalla 3. (11, s. 15.)

$$\beta = \frac{\Delta p_{sv}}{\Delta p_{mit}}$$

KAAVA 3

β = Venttiilin auktoriteetti

Δp_{mit} =käytettävissä oleva paine-ero [kPa]

Auktoriteetti kuvaa siis venttiilin oman painehäviön ja käytettävissä olevan paineen suhdetta. Jotta venttiili toimisi riittävän hyvin, tulisi auktoriteetin arvon olla vähintään 0,5. Auktoriteetin ollessa alle 0,5 voidaan olettaa valitun venttiilin k_{vs} -arvon olevan liian suuri mitoitusvirtaamaan nähden. Sen sijaan auktoriteetin ollessa yli 1,0 on valittu liian pieni k_{vs} -arvo, sillä venttiili olisi hävittämässä mitoitusvirtaamalla enemmän painetta kuin sillä on käytettävissä. Käyttövesiventtiilit on mahdollista käsitellä poikkeuksena, sillä varsinkin kohteissa joissa käyttöveden käytön tiedetään olevan vähäistä, venttiili on suurimman osan vuodesta kiinni tai hyvin vähän auki. Tällöin venttiili voidaan tietoisesti alimitoittaa. (11, s. 15.)

Esimerkki:

- mitoitusvirtaama: 1,20 l/s \rightarrow 4,32 m^3/h
- käytettävissä oleva paine 150 kPa.

Tarkastellaan venttiilit, joiden k_{vs} -arvot ovat 2,5, 4,0 ja 6,3.

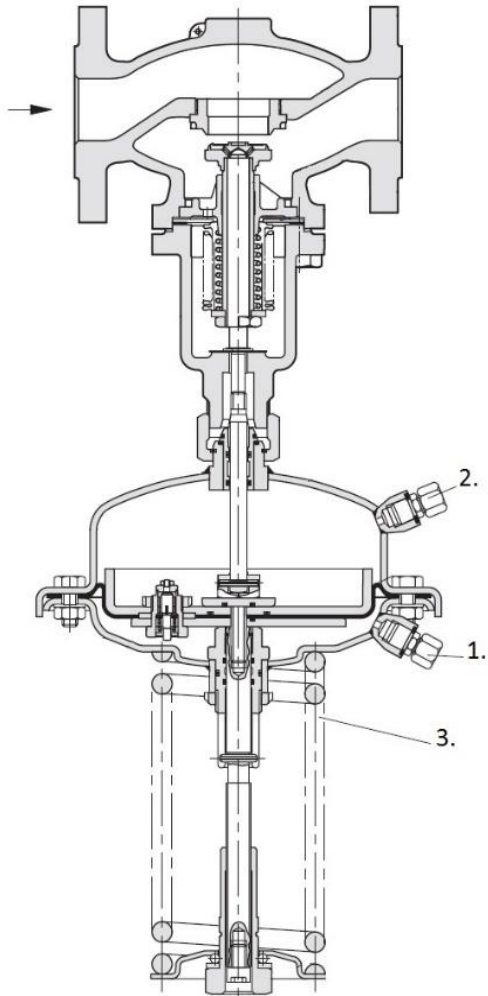
K_{vs} 2,5 -venttiilin $\Delta p=299$ kPa, auktoriteetti $\beta = \frac{299}{150} = 1,99; > 1,0$. Venttiili on liian pieni

K_{vs} 4,0 -venttiilin $\Delta p=117$ kPa, auktoriteetti $\beta=\frac{117}{150} = 0,78$; $0,5 < 0,78 < 1,0$. Venttiili on sopiva

K_{vs} 6,3 -venttiilin $\Delta p=47$ kPa, auktoriteetti $\beta=\frac{47}{150} = 0,31$; $< 0,5$. Venttiili on liian suuri.

3.3 Paine-erosäädin

Paine-erosäädin eroaa perinteisestä säätöventtiilistä siten, että sen aukinaisuutta säädetään järjestelmän tulo- ja paluuputkien paineiden ja ulkoisen jousivoiman perusteella. Kuvassa 8 on Danfossin AFP paine-erosäätimen poikkileikkaus, jossa virtaussuunta on nuolen suuntaisesti vasemmalta oikealle. Kaukolämmön tuloputken paine johdetaan kapillaariputkella paine-erosäätimen tilaan, jossa se pyrkii sulkemaan venttiiliä (1). Laitteiston jälkeinen mutta ennen paine-erosäädintä oleva paluuputken paine johdetaan vastaavaan tilaan, jossa se pyrkii avaamaan venttiiliä (2). Tämä voi olla myös ilman erillistä kapillaariputkea, jolloin paine kulkeutuu kammioon venttiilin rungon kautta. Lisäksi venttiiliä avaavana voimana toimii erillinen jousi (3). Jousen jäykkyys määrittää paine-erosäätimen mahdolliset asetusarvot eli toiminta-alueen. Vaikka jokaisella valmistajalla on oma mallinsa ja tuoteperheensä, toimintaperiaate on teoriassa kaikilla lähes sama.



KUVA 8. Danfoss AFP paine-erosäädin (12)

Paine-erosäätimen mitoituksesta K1:ssä sanotaan seuraavasti:

”Paine-eroventtiili mitoitetaan siten, että lasketaan lämmönjakokeskuksen virtaamat paine-eron ollessa pienimmillään ja suurimmillaan (esim. kesä- ja talvitalanne). Venttiilin DN-koko ja jousi valitaan siten, että paine-ero saadaan rajoitettua suurimman paine-eron aikana noin 150 kPa:iin. Valitun paine-eroventtiiliin aiheuttama painehäviö ja säätöventtiiliin auktoriteetti tarkastetaan pienimmän paine-eron aikaisella virtaamalla, jolloin paine-eroventtiili on täysin auki.” (11, s. 16.)

K1:n lisäksi paikallisilla energialaitoksilla voi olla omia sääntöjä ja ohjeita, joita suunnittelijoiden tulee noudattaa, sillä kyseessä on lämmötoimittajan omistama verkko johon laitteet liitetään. Esimerkiksi Helsingissä paine-erosäätimien käyttö asiakkaan lämmönjakokeskuksessa on hyvin harvinaista, sillä energialaitos pitää vaihtelevat paine-erot riittävän pieninä omilla menetelmillään.

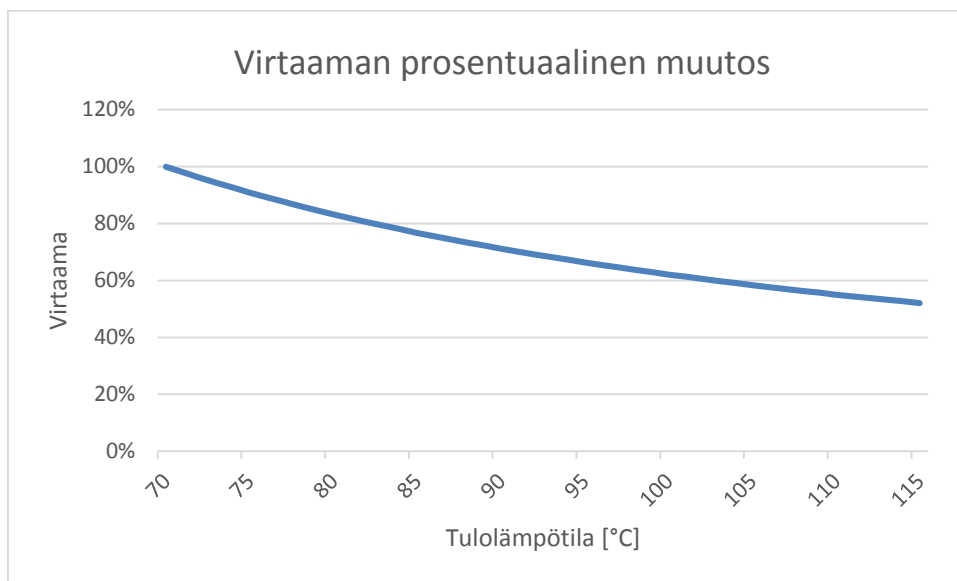
Paine-erosäätimen mitoitukseen tarvitaan seuraavat tiedot asiakkaan laitteista:

- siirtimien virtaama
- siirtimien painehäviö
- säätöventtiilien painehäviö
- käytettävissä oleva paine-ero.

Käytettävissä oleva paine-ero saadaan paikalliselta lämmötoimittajalta. Koska paine-ero ja lämmön tarve vaihtelee vuodenaikoina, paine-erosäätimen mitoitus tulisi tarkastella ääripäissä eli kesä- ja talvitilanteessa.

Todellisuudessa päädytään harvoin tilanteeseen jossa molempien siirtimien läpi olisi maksimivirtaama. Ensimmäinen ongelma onkin, että valmistajilla, suunnittelijoilla ja energialaitoksilla voi olla tilanteen harvinaisuuden takia oma tapansa laskea paine-erosäätimen mitoitusvirtaama.

K1-määräyskokoelman mukaan käyttövesisiirtimelle menevän veden lämpötila mitoitusilanteessa on 70 °C. Talvitilanteessa lämpötila on yli 70 °C, sillä kaukolämpöverkossa kiertävä vesi on korkeimmillaan 115 °C. Jotta saatu teho pysyy samana, pitää käyttövesisiirtimen läpi menevää virtaamaa pienentää. Kuvassa 9 on esitetty käyttöveden virtaaman prosentuaalinen muutos tulolämpötilan noustessa. (11, s. 8.)



KUVA 9. Käyttöveden virtaaman prosentuaalinen muutos tulolämpötilan funktiona

Koska tehon tulee pysyä samana, muutos on tehosta riippumaton. Lämpötilaerolla 70 °C / 20 °C saatu teho saavutetaan 52,0 %:n virtaamalla, kun lämpötilaero on talvitilanteen 115 °C / 20 °C. Käyttöveden mitoitusvirtaaman ollessa kesätilanteessa esimerkiksi 1,00 l/s talven korkeammilla lämpötiloilla samaan tehoon riittää 0,52 l/s virtaama.

Talvitilanteen mahdollinen maksimivirtaama on siis käyttövedelle mitoitustilanteessa 70 °C / 20 °C lämpötiloilla ilmoitettu mitoitusvirtaama kerrottuna 0,52:lla ja lisättyinä lämmitys- ja ilmastointipiirien mitoitusvirtaamat. Kesätilanteessa lämmityksen lämmöntarve oletetaan nolaksi, jolloin laskennallisena mitoitusvirtaamana voidaan käyttää pelkkää käyttöveden mitoitusvirtaamaa.

Vastään tulleita variaatioita yhtiöiden mitoitusvirtaaman tarkastelusta ("lämmityspiirit" sisältävät mahdolliset ilmastointipiirit ja muut erikoistapaukset):

- kesätilanteessa käyttövesi, Talvitilanteessa lämmitys sekä 50 %* käyttövesi + lämmityspiirit
- käyttövesisiirtimen mitoitusvirtaama / 50 % * käyttövesi + lämmityspiirit

- kesätilanteessa käyttövesi, talvitilanteessa 20 % - 40 %* käyttövesi + lämmityspiirit
- käyttövesi + lämmitys.

Yleisesti ottaen voidaan todeta, että paine-erosäädin mitoitetaan järjestelmän maksimivirtaaman mukaan, vaikka käyttövesisiirtimen maksimivirtaama on hetkellinen.

Kun lämmönjakokeskus on otettu käyttöön, paine-erosäätimen virittäminen asetusarvoonsa suoritetaan tuloputken ja ennen paine-erosäädintä olevan painemittarien arvojen perusteella. Arvojen erotus on paine-erosäätimen asetusarvo. Mittareita tarkkailemalla paine-erosäätimen säätöpyörää kierretään, kunnes mittareiden erotus vastaa laskettua asetusarvoa. Koska paine-eron tulee pysyä samana lämmöntarpeesta riippumatta, erillistä järjestelmän kuormitusta ei tarvitse tehdä virittämisen yhteydessä.

4 ESIMERKKIMITOITUS

Esimerkkimitoituksen kohteena toimii Oulun Raksilassa sijaitseva rakennus. Danfossia, IMI-Hydronica, Siemensiä sekä useita Oulussa toimivia suunnittelijoita pyydettiin mitoittamaan rakennukseen sopiva paine-erosäädin. Suunnittelijoista vain yksi vastasi pyyntöön todeten, että Oulun Energialta tulee voimakasta ohjausta paine-erosäätimen mitoittamiseen.

Kohteesta tuli kaksi eri tilannetta, sillä seinällä olleessa mitoittustaulukossa oli ilmoitettu käyttöveden ja lämmityksen säätöventtiilien k_{vs} -arvoiksi 4,0, mutta todellisuudessa käytössä olevien säätöventtiilien k_{vs} -arvo oli 6,3. Mitoitukseen annetut tiedot on esitetty taulukossa 1.

TAULUKKO 1. Esimerkkikohteen mitoittustiedot

Käyttövesi:		Lämmitys:	
Teho: [kW]	221	Teho: [kW]	230
lämpötilat: [°C]	70–20	lämpötilat: [°C]	115-65
Virtaus: [l/s]	1,19	Virtaus: [l/s]	1,1
Painehäviö: [kPa]	19	Painehäviö: [kPa]	4
Tilanne 1			
TV1: k_{vs}	4	TV2: k_{vs}	4
Painehäviö: [kPa]	115	Painehäviö: [kPa]	98
Tilanne 2			
TV1: k_{vs}	6,3	TV2: k_{vs}	6
Painehäviö: [kPa]	46	Painehäviö: [kPa]	40

Käytettävissä oleva paine-ero alueella on 300 kPa – 700 kPa. Lämmityksen korkea paluulämpötila johtuu rakennuksen vanhasta patterijärjestelmästä, joka on aikanaan luultavimmin mitoitettu lämpötiloille 80 °C / 60 °C. Tilanteen 2 säätöventtiilien painehäviöt on laskettu kaavalla 2. Järjestelmän maksimivirtaama tulee talvitilanteessa kun lämmitys on suurimmillaan ja käyttövedelle tulee kulu- tushuippu. Tällöin virtaama on:

$$\left(1,19 \text{ l/s} * 0,52 + 1,1 \text{ l/s}\right) * \frac{3600 \text{ s/h}}{1000 \text{ l/m}^3} = 6,19 \text{ m}^3/\text{h}$$

4.1 Oulun Energia

Kaukolämpösuunnitelmia tarkastaessaan Oulun Energia laskee säätöventtiileille ja paine-erosäätimelle auktoriteetit ja k_{vs} -arvot, mutta ei puutu niiden malliin eikä valmistajaan. Koska energiayhtiön tehtäviin ei kuulu laitteiden varsinainen mitoitus, laskennallinen tarkastelu on suhteellisen suppea. Taulukossa 2 on esimerkkikohteen säätöventtiilien ja paine-erosäätimen auktoriteetit Oulun Energian laskurilla laskettuna. (13.)

TAULUKKO 2. Oulun Energian auktoriteetilaskuri tilanteen 1 säätöventtiileillä

Säätöventtiilien tarkastelu esimerkkikatu 2

Kesän Δp	3 Bar	Talven -32 Δp	7 Bar	Talven -5 Δp	5 Bar	
						P-ES Asetusarvo
						PES 1,3 Bar
						KV-% 40,00 %

	Käyttövesi LS1 Kesä	Lämmitys LS2 Talvi -32°C	
Anna virtaama [dm ³ /s]	1,19	1,1	
Anna Kvs-arvo	4,00	4,00	
Käytettävissä oleva paine-ero [bar]	1,30	1,30	130,0 kPa
Venttiilin hävittämä paine [bar]	1,15	0,98	114,7 kPa
Venttiilin auktoriteetti	0,88	0,75	

	Käyttövesi LS1 talvi-32°C	Lämmitys LS2 Talvi -5°C	
Anna virtaama [dm ³ /s]	0,64	0,72	
Anna Kvs-arvo	4,00	4,00	
Käytettävissä oleva paine-ero [bar]	1,30	1,30	130,0 kPa
Venttiilin hävittämä paine [bar]	0,33	0,41	33,4 kPa
Venttiilin auktoriteetti	0,26	0,32	

	Ylimenevä paine-ero 570 kPa, talvi -32°C	Pelkkä käyttövesi kesällä Ylimenevä paine-ero 170 kPa, Kesä	
Anna virtaama [dm ³ /s]	1,58	1,19	
Anna Kvs-arvo	6,30	6,30	
Käytettävissä oleva paine-ero [bar]	5,70	1,70	570,0 kPa
Paine-eros.hävittämä paine [bar]	0,81	0,46	81,1 kPa
Paine-eros. auktoriteetti	0,14	0,27	

Paine-erosäädin DN 20/Kvs: 6,3
Asetusarvo 130 kPa

Paine-erosäätimen vertailu on toteutettu kesä- ja talvitilanteissa. Talvitilanteen maksimivirtaaman määrittämiseen Oulun Energia on käyttänyt käyttöveden laskemiseen 40 %:a. Laskelman mukaan sopiva paine-erosäätimen k_{vs} -arvo on 6,3 ja järjestelmän asetusarvo on 130 kPa. (13.)

Paine-erosäätimen k_{vs} -arvo ei muuttunut, mutta suurempien venttiilien myötä painehäviöt tippuivat, jolloin suositeltava asetusarvo laski 80 kPa:iin. Lämmönjakokeskus voisi toimia pienemmälläkin asetusarvolla, mutta varmemman toimivuuden kannalta Oulun Energia on pitänyt miniminä 80 kPa. Tilanteesta 2 on esitetty laskelmat taulukossa 3.

TAULUKKO 3. Oulun Energian auktoriteetilaskuri tilanteen 2 säätöventtiileillä

Säätöventtiilien tarkastelu esimerkkitatu 2

Kesän Δp **3 Bar** Talven -32 Δp **7 Bar** Talven -5 Δp **5 Bar**

P-ES Asetusarvo
PES **0,8 Bar**
KV-% **40,00 %**

	Käyttövesi LS1 Kesä		Lämmitys LS2 Talvi -32°C	
Anna virtaama [dm ³ /s]	1,19	4,28 m3/h	1,1	3,96 m3/h
Anna Kvs-arvo	6,30		6,30	
Käytettävissä oleva paine-ero [bar]	0,80	80,0 kPa	0,80	80,0 kPa
Venttiilin hävittämä paine [bar]	0,46	46,2 kPa	0,40	39,5 kPa
Venttiilin auktoriteetti	0,58		0,49	

	Käyttövesi LS1 talvi-32°C		Lämmitys LS2 Talvi -5°C	
Anna virtaama [dm ³ /s]	0,64	2,31 m3/h	0,72	2,57 m3/h
Anna Kvs-arvo	6,30		6,30	
Käytettävissä oleva paine-ero [bar]	0,80	80,0 kPa	0,80	80,0 kPa
Venttiilin hävittämä paine [bar]	0,13	13,5 kPa	0,17	16,7 kPa
Venttiilin auktoriteetti	0,17		0,21	

	Ylimenevä paine-ero 620 kPa, talvi i-32°C		Pelkkä käyttövesi kesällä Ylimenevä paine-ero 220 kPa, Kesä	
Anna virtaama [dm ³ /s]	1,58	5,67 m3/h	1,19	4,28 m3/h
Anna Kvs-arvo	6,30		6,30	
Käytettävissä oleva paine-ero [bar]	6,20	620,0 kPa	2,20	220,0 kPa
Paine-eros hävittämä paine [bar]	0,81	81,1 kPa	0,46	46,2 kPa
Paine-eros. auktoriteetti	0,13		0,21	

Paine-erosäädin DN 20/Kvs: 6,3
Asetusarvo 80 kPa

Erään haastateltavana olleen yhtiön mukaan paine-erosäätimelle ei lasketa auktoriteettia ainakaan samalla lailla kuin säätöventtiileille. Oulun Energialla kaava on tästä huolimatta käytössä, sillä se on kokemuseräisesti osoittautunut toimivaksi huojunnan riskin arvioimiseen. Paine-erosäädin voi ruveta huojumaan, jos auktoriteetti laskee alle 0,06:n. (13.)

4.2 Danfoss

Danfossilta kysymyksiin vastasi heidän Etelä-Suomen piiripäällikkönsä. Heillä mitoituksen ratkaisevina tekijöinä ovat virtaama, käytettävissä oleva paine-ero ja venttiilin avautumisaste. Paine-erosäätimen mitoitusarvo lasketaan hieman

pyöristettynä talvitilanteen maksimivirtaamaan eli käyttövesi * 50 % + lämmitys- ja ilmastointipiirit. Esimerkkikohteen mitoitusvirtaamaksi tuli 6,10 m³/h. (12.)

Mitoitettu paine-erosäädin molempiin tilanteisiin on virtausrajoittimella varustettu AVPB, jonka k_{vs} -arvo on 8,0 ja asetusalue 0,3–2,0 bar. Tilanteessa 1 asetusarvoksi on laskettu 162 kPa, joka on sama kuin lämmityspiirin säätöventtiilin, siirtimen, virtausrajoittimen ja oletetun välisyöttökylkennän aiheuttamien painehäviöiden summa. Mitoitukseen on käytetty lämmityspiirin säätöventtiiliä, sillä talvitilanteessa käyttövesiventtiilin virtaama on pienempi kuin kesätilanteessa joten se ei aiheuta sille merkittävä painehäviötä. Paine-erosäätimen omaksi painehäviöksi on ilmoitettu 58 kPa. Tämä lisätynä muiden komponenttien painehäviöihin, saadaan summaksi 220 kPa, joka on vähemmän kuin ilmoitettu pienin mahdollinen paine-ero 300 kPa. Järjestelmä on siis paineiden puolesta toimiva kaikissa tilanteissa. (12.)

Jotta venttiili on sopivalla säätöalueella, Danfoss tarkastelee sen avautumisasteen seuraavalla kaavalla 4. (12)

$$Avautumisaste [\%] = \frac{K_v}{K_{vs}} * 100\% \quad \text{KAAVA 4}$$

Varsinkin yli 4 barin paine-erolla avautumisasteen mitoitusvirtaamalla tulisi olla yli 30 %. Tällöin vältetään tilanteelta, jossa venttiilin säätö toimii pienellä virtaamalla auki/kiinni-periaatteella. Niin sanottua huojuntaa voi esiintyä, jos avautumisaste mitoitusvirtaamalla on vain 5–10 %. Tilanteessa 1 avautumisaste on 33 %. (12.)

Tilanteessa 2 paine-erosäätimen asetusarvoksi on laskettu 104 kPa. Kokonaispainehäviöksi järjestelmälle on laskettu 162 kPa ja avautumisasteeksi on saatu 31 % mitoitusvirtaamalla. (12.)

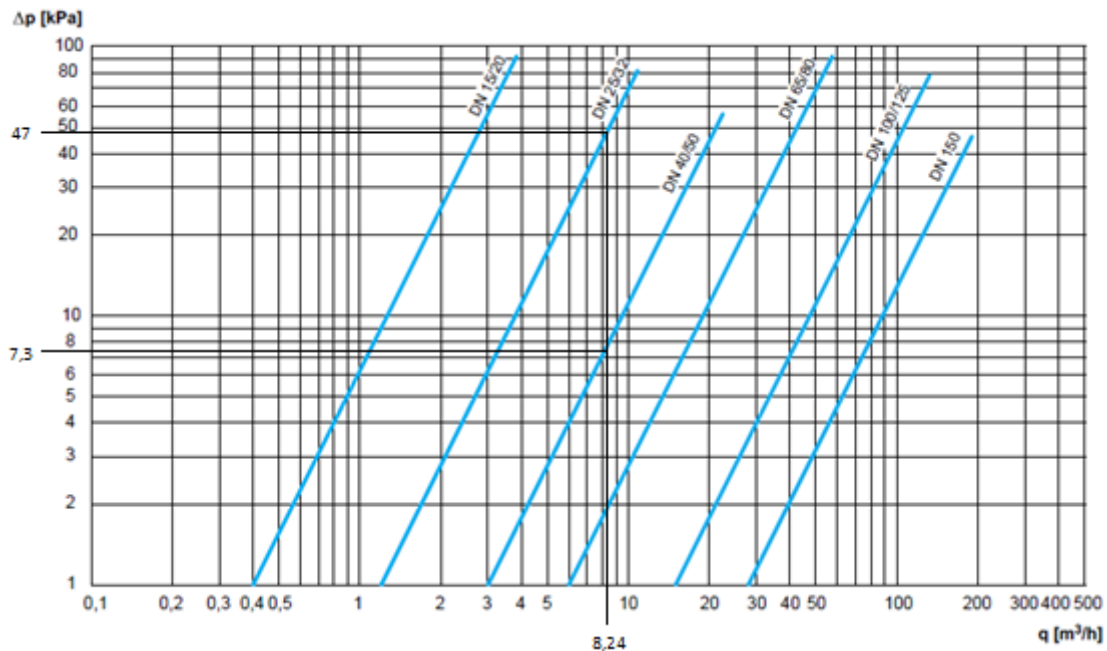
Danfossin mielestä tilanne 1 on toimivuuden kannalta suotavampi. Kokonaispainehäviö nousee vain 2,2 bariin, mutta venttiili on kuitenkin säätöalueella ja avautumisaste on parempi. Mitoitusvirtaaman kohdalla virtausnopeus nousee

suhteellisen korkeaksi (3,45 m/s), mutta tilanne on hetkellinen ja täten hyväksytävä. (12.)

4.3 IMI-Hydronic

IMI-hydronicilta mitoituspyyntöön vastasi heidän tekninen päällikkönsä. Heidän paine-erosäätimen mitoituksensa perustuu järjestelmän virtaamaan. Mitoitusvirtaama lasketaan suoraan summaamalla ilmoitetut arvot, jollei asiakas erikseen pyydä toista laskutapaa. Täten laskettuna kohteen mitoitusvirtaamaksi tulee 8,24 m³/h. (14.)

Valittu paine-erosäädin on DA516 40/50 k_{VS} 30, jonka painehäviö on 7,36 kPa. Astetta pienempi olisi myös mahdollinen eli DA516 25/32 jonka k_{VS}-arvo on 12. Pienemmän venttiilin painehäviöksi tulee 47,15 kPa. Molemmissa tilanteissa venttiilien säätöalueeksi on valittu 60–150 kPa. Ehdotetut paine-erosäätimet on esitetty kuvassa 10. (14.)



KUVA 10. IMI-Hydronicin paine-erosäätimen mitoituskäyrästä ja ehdotetut venttiilit (15, s. 4)

IMI-Hydronic ei näe ensimmäistä tilannetta kovin suotuisana, sillä säätöventtiilien korkeiden painehäviöiden takia säätöventtiilin asetusarvo pitää nostaa raja-arvoonsa eli 150 kPa:iin. Tästä voi tulla ongelmia myöhemmin, jos esimerkiksi siirrin tukkeutuu osittain ja järjestelmän ylimenevää paine-eroa tulisi nostaa. Tilanne 2 olisi parempi, sillä siinä venttiilin asetusarvo olisi vain 80 kPa, jolloin säätövaraa jäisi molempiin suuntiin. (14.)

4.4 Siemens

Siemensiltä kyselyyn vastasi heidän Suomen tuotepäällikkönsä. Hän antoi Excel-pohjaisen mitoitusohjelman paine-erosäätimen valintaan, joka heillä on ollut aikaisemmin käytössä. Paine-erosäätimet ovat Siemensillä niin sanottuja OEM-tuotteita, jolloin lämmönjakokeskusten valmistajat ottavat vastuun tuotteen toiminnasta. (16.)

Toisin kuin Danfossin ja IMI-hydronicin mitoittavat, jotka perustuvat ilmoitettuihin virtaamiin, Siemensin ohjelma haluaa tehon ja lämpötilaeron. Syötettyjen arvojen perusteella ohjelma laskee venttiilille virtaaman ja k_v -arvon. K_v -arvo kerrotaan 1,3:lla ja paine-erosäädin valitaan tästä arvosta seuraava suurempi koko. Esimerkiksi k_v -arvon ollessa 3,9 m^3/h se kerrotaan 1,3:lla ja saadaan mitoittavaksi arvoksi 5,07 m^3/h , jolloin ohjelma valitsee paine-erosäätimen k_{vs} -arvolla 8,0. (16.)

Uusissa rakennuksissa käyttövesivirtaama ilmoitetaan lämpötiloilla 70 / 20 °C ja lämmitys 115 / 33 °C. Koska mitoituksen paluulämpötilat poikkeavat 13 °C, tulee Siemensin mitoitusohjelman vaatimaa lämpötilaeroa varten laskea tehon suhteen painotettu keskiarvo. Painotettu keskiarvo lasketaan kaavalla 5.

$$\Delta T_{p\ ka} = \frac{\phi_1 * \Delta T_1 + \phi_2 * \Delta T_2 + \dots + \phi_n * \Delta T_n}{\phi_1 + \phi_2 + \dots + \phi_n} \quad \text{KAAVA 5}$$

$\Delta T_{p\ ka}$ = Lämpötilaeron painotettu keskiarvo [°C]

ϕ_1 = Ensimmäisen lämmönsiirtimen teho [kW]

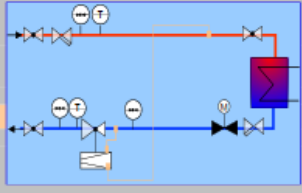
$\Delta T_1 =$ Ensimmäisen lämmönsiirtimen mitoituslämpötilojen ero [°C]

Siemensin mitoitusohjelmasta ei selviä, pitääkö talven korkeamman lämpötilan aiheuttama pienempi virtaama käyttövesisiirtimelle huomioida. Tästä syystä kohde tarkasteltiin mitoituksen ilmoitetuilla lämpötiloilla sekä talvitilanteen huomioiden eli lämpötilojen painotetulla keskiarvolla. Lämmityksen korkean paluu-lämpötilan myötä sen ja käyttövesisiirtimen lämpötilaero on molemmilla 50 °C. Kun käyttövesisiirtimen menolämpötilaksi annetaan talven 115 °C, kaavalla 5 laskettuna lämpötilaeroksi saatiin 72,95 °C.

Tilanteessa 1 ΔT :n ollessa 50 °C virtaamaksi tulee 7,76 m³/h, pienimmäksi paine-eroksi 300 kPa ja asetusarvoksi 130 kPa. Ohjelma ilmoittaa, ettei sopivaa venttiiliä ole tarjolla liian vähäisen paine-eron takia. Lämpötilaeron muuttuessa arvoon 72,95 °C ja muiden arvojen pysyessä samana saadaan virtaamaksi 5,32 m³/h. Tällöin ohjelma antaa paine-erosäätimeksi VHG519 L 20-8, jossa L tarkoittaa 30–210 kPa:n säätöaluetta, 20 liittimien DN-kokoa ja 8 säätöventtiilin K_{VS} -arvoa. Taulukossa 4 on esitetty Siemensin laskuri lämpötilojen painotetulla keskiarvolla laskettuna.

TAULUKKO 4. Siemensin paine-erosäätimen laskuri (16)

Valve Sizing with differential-pressure-regulation across the whole station		
Heating Power Consumption	451 kW	used formulas
Temperature Difference	72,95 K	
Nominal Flow	5,32 m ³ /h	$V = 0.86 * (P/\Delta T)$
Total differential pressure $\Delta p_{\text{req, min}}$	300 kPa	
Total pressure drop in installation $\Delta p_{\text{exchanger}} + \Delta p_{\text{pipe}} + \Delta p_{\text{devices}}$	130 kPa	
differential pressure for control valve Δp_v	130 kPa	$\Delta p_v = \Delta p_{\text{exchanger}} + \Delta p_{\text{pipe}} + \Delta p_{\text{devices}}$
calculated kv-value for control valve (authority 50%)	4,66 m ³ /h	$k_v = V / \text{SQRT}(\Delta p_{v100})$
selected kvs-value for control valve	6,3 m ³ /h	$k_{vs} > 0.9 * k_v$
Control valve Authority	35 %	$37 \% PV = \Delta p_{v100} / (\Delta p_{\text{exchanger}} + \Delta p_{\text{pipe}} + \Delta p_{\text{devices}} + \Delta p_{v100})$
effective pressure Δp_w	201 kPa	$\Delta p_w = \Delta p_{\text{exchanger}} + \Delta p_{\text{pipe}} + \Delta p_{\text{devices}} + \Delta p_{v100}$
differential pressure for regulator Δp_{RD}	99 kPa	$\Delta p_{RD} = \Delta p_{\text{req, min}} - \Delta p_w$
kv-value for differential pressure regulator k_{vRD}	5,3 m ³ /h	$k_{vRD} = V / \text{SQRT}(\Delta p_{RD})$
selected kvs-value for differential pressure regulator k_{vsRD}	8 m ³ /h	$k_{vsRD} > 1.3 * k_{vRD}$
Selected differential-pressure-regulator	VHG519 L 20-8	
Selected differential-pressure-regulator with flow limitation	VSG519 L 20-8	



Tilanteessa 2 lämpötilaeron ollessa 50 °C ja asetusarvon 80 kPa ohjelma ehdottaa paine-erosäätimeksi VHG 519 M25-10 eli venttiilin k_{VS} -arvo on 10,0 ja säätöalue (M) 60–400 kPa. Vastaavasti kun ΔT on talvitilanteen 72,95 °C, ohjelma antaa paine-erosäätimen malliksi VHG519 M20-8 eli muuten saman, mutta k_{VS} -arvo on 8,0.

Mitoitetuista paine-erosäätimistä kaksi siis on k_{VS} -arvolla 8,0 ja yksi 10,0:llä. Mielenkiintoista asiasta tekee asetusarvon valinta, sillä asetusarvojen ollessa 80 kPa ja 130 kPa näyttäisi, että 30–210 kPa:n säätöalue (L) olisi riittävä molempiin. Tästä huolimatta ohjelma mitoittaa säätöalueeksi 60–400 kPa, kun asetusarvo on 80 kPa.

Toinen mielenkiintoinen huomio on ohjelman laskema virtaama. Talvitilanteen lämpötilaerolla se on 0,83 m³/h pienempi kuin kuvan 9 avulla laskettu maksimivirtaama ja ilmoitettujen lämpötilojen erotuksella ($\Delta T=50$ °C) 1,57 m³/h suurempi.

Siemensin yhdysvaltalaisen tuotekatalogin mukaan mitoitukseen riittää asennusputken koon ja virtaaman tietäminen. Putken koko määrää venttiilin asennuskoon, ja virtaaman perusteella valitaan sopiva virtausväli, esimerkiksi 2,3–7,13 m³/h eli eräänlainen k_{VS} -arvo. (17.)

4.5 Yhteenveto

Saaduista vastauksista käy selkeästi ilmi, että virtaama on mitoituksen tärkein kriteeri. Mielenkiintoiseksi asian tekee yhtiöiden tapa laskea se. Verrattuna kuvan 9 avulla laskettuun talvitilanteen maksimivirtaamaan Siemensin painotetulla lämpötilaerolla virtaama on 14 % pienempi ja IMI-Hydronicin laskutavalla 33 % suurempi.

Toinen huomioitava havainto on k_{VS} -arvojen suuri variaatio. Oulun Energia suosittelee kohteeseen 6,3 k_{VS} -arvolla olevaa venttiiliä, kun taas IMI-Hydronicin mielestä k_{VS} 30 on myös sopiva. Toisin kuin virtaaman laskutyylejä, valittuja k_{VS} -arvoja ei voi verrata suoraan keskenään, sillä ne riippuvat yhtiöiden tuotteista ja tuoteperheessä tarjolla olevista k_{VS} -arvoista. Toisen yhtiön sama tuote voi soveltua useaan eri tilanteeseen, kun taas toisella yhtiöllä on jokaiselle tilanteelle omansa.

Painehäviöiden vaikutuksessa ilmeni myös eroavaisuutta. Vaikka mitoituksen tavoitteena on saada säätöventtiileille riittävän korkeat auktoriteetit, Danfoss katsoi tilanteen 1 säätöventtiilit paremmaksi vaihtoehdoksi niiden korkeampien painehäviöiden takia. Vastaavasti IMI-Hydronic suosi tilannetta 2 säätöventtiilien painehäviöiden ollessa pienemmät. Danfossin käyttämällä arvoilla auktoriteeteista tulee hieman suuremmat, mutta molempien auktoriteetit ovat hyvät.

5 HUOJUNTA

Huojunnalla tarkoitetaan paine-erosäätimen vikatilaa, jossa paine-erosäädin ei kykene pitämään käytettävissä olevaa paine-eroa tasaisena laitteiston yli, vaan paine-ero heittelee jatkuvasti ja nopeissa sykleissä. Voimakas huojunta rasittaa laitteistoa ja voi pahimmillaan aiheuttaa paineiskun, joka hajottaa komponentteja. Paine-ero vaikuttaa myös säätöventtiilien toimintaan, sillä venttiilit mitoitaan käytettävissä olevan paine-eron perusteella. Huojunta muuttaa venttiilin k_v -arvoa, jolloin virtaama vaihtelee myös muuttaen saatavaa tehoa. Huojunnan voi nähdä lämmönjakokeskuksen painemittareista, ja todella voimakkaan huojunnan voi kuulla.

Pääasiallisina hypoteeseina huojunnalle ovat liian suuri k_{vs} -arvo, väärin mitoitettu impulssiputki ja väärä asennustapa. k_{vs} -arvon ollessa liian suuri virtaamaan nähden venttiilin vaikutusaste eli auktoriteetti muuttuu vähäiseksi ja säätö toimii pienellä alueella. Venttiili ei kykene riittävään hienosäätöön vaan päätyy saamaan edestakaisin lähellä haluttua paine-eroa. Impulssiputkessa vaikuttaa pääasiassa sen halkaisija, mutta pituuskin tuo painehäviötä. Väärä asennustapa vaikuttaa lähes minkä tahansa tuotteen toimivuuteen, ja paine-erosäätimien kohdalla väärän asennuksen yksi mahdollinen vikatila voi olla huojunta. Valmistajien mielipiteet huojuntaa aiheuttavista tekijöistä vaihtelevat hieman keskenään, ja asiaan pyydettiin jälleen näkemystä ja mielipidettä IMI-Hydronicilta, Danfossilta ja Siemensiltä.

5.1 IMI-Hydronic

IMI-Hydronicin mukaan huojunnan pääsyy on painesignaalin liian pieni vaimenus. Heidän DA516-paine-erosäätimien mukana toimitettavat impulssiputket ovat halkaisijaltaan 6 mm, ja DN 15–50 -kokoisilla niiden pituus on 1200 mm ja siitä suuremmilla 1500 mm. Impulssiputkiin on mahdollista liittää erillisiä kuristusnippoja, jotka pienentävät putken halkaisijaa pienentäen painesignaalin muutoksen voimakkuutta. Lisäksi kyseisissä malleissa, DA516, kuristusnippa on jo valmiiksi asennettu venttiilin runkoon. (18.)

Väärin asennetussa paine-erosäätimessä impulssiputken liitântä voi tulla ala- tai yläpuolelle. Alapuolella putki voi tukkeutua esimerkiksi roskasta ja yläpuolella siihen voi kertyä ilmaa, joka häiritsee säätöä. Väärin asennettuna myöskään ilmausruuvit eivät ole oikein eli suunnattuna ylöspäin, jolloin ilmausta ei pystytä tekemään kunnolla. (18.)

5.2 Siemens

Siemensillä huojunnan pääsyyksi ilmoitetaan k_{vs} -arvoltaan liian isoksi mitoitettu paine-erosäädin, mikä yleisimmin johtuu väärästä mitoitusvirtaamasta tai mitoittamisen osaamattomuudesta. Muuten huojunta voi johtua roskasta tukkeutuneesta tai litistyneestä impulssiputkesta. Myös väärin asennettu paine-erosäädin voi huojua, esim. jos impulssiputket on kytketty ristiin. (19.)

5.3 Danfoss

Danfoss mainitsee suurimmaksi huojunnan aiheuttajaksi liian suuren k_{vs} -arvon (avautumisaste), mikä johtuu yleisimmin väärästä mitoituksesta. Heidän mukaansa myös halkaisijaltaan ja/tai pituudeltaan väärän kokoinen impulssiputki voi aiheuttaa paine-erosäätimen huojuntaa, sillä painesignaalin muutos säätökammioihin on liian vahva. Impulssiputki meneekin pienimmillään 0,8 mm:n halkaisijaan. Pituudeltaan sen tulee olla Danfossin mukaan 1500 mm. (20.)

Myös itse venttiilin DN-koko voi vaikuttaa. Venttiilin fyysisen koon ollessa pieni, jolloin mitä luultavimmin myös k_{vs} -arvo on liian pieni, virtausnopeus kasvaa paine-erosäätimessä suureksi. Tämä voi aiheuttaa viheltävää ääntä, mikä on merkki kavitaatiosta. Voimakas kavitointi voi aiheuttaa paineiskuja, jotka voivat tässä tapauksessa ilmentyä huojuntana. (20.)

6 MITTAUKSET

6.1 Mittaaminen

Lämmönjakokeskuksista mitattiin paine ensiöpuolelta tulo- ja paluuputkesta sekä ennen paine-erosäädintä. Toiveena oli löytää kohteita joissa esiintyy huojuntaa tai paine-erosäädin ei säädä suunnitelmien mukaisesti.

Mittaaminen tapahtui kolmella Tecsisin 4–20 mA:n painelähettimillä. Lähettimille virtalähteenä toimi erillinen 12 V 600 mA tasavirtamuuntaja. Lähettimet kytkettiin Grant Squirrel Data Logger 2040 4F16 -laitteeseen, joka tallensi painesignaalit halutulla intervallilla. Data logger yhdistettiin USB-kaapelilla tietokoneeseen ja Grantin omalla ohjelmalla, Squirrel viewillä, saadut tulokset muutettiin Excel-taulukoiiksi. Squirrel view ohjelman pystyi lataamaan ilmaiseksi osoitteesta <http://www.grantinstruments.com/squirrelview>.

Mittalaitteiden asentamista valvoi ja siinä auttoi Oulun Energian kaukolämpöinsinööri Heikki Niemi. Pinalähettimet liitettiin verkkoon painemittareiden tilalle tai jos oli mahdollista, tulpattujen ilmausventtiilien kohdalle. Tiivistykseen käytettiin hampua ja kittiä. Joissain kohteissa kaukolämmön tulo- ja paluuventtiilit piti sulkea asentamisen ajaksi mistä seurasi asiakkaille hetkellinen katkos lämmöntoimitukseen. Katkos oli kuitenkin lyhyt, joten tästä ei koitunut haittaa asiakkaille eikä järjestelmälle.

Sähkökytkennät painelähettimien liitäntäkantojen ja loggerin dataporttien välille tehtiin lähettimen pakkauksen mukana tulleiden ohjeiden mukaan. Ohjeessa oli esitelty kaksi eri kytkentämahdollisuutta lähettimelle, kaksi- ja kolmipisteinen kytkentä. Työssä jouduttiin käyttämään kaksipisteistä kytkentää, sillä loggeri ei tunnistanut kolmipisteistä tapaa.

Toinen ongelma oli loggerin yksiköiden kanssa. Lähettimen antama mA-signaali oli mahdollista muuttaa suoraan halutuiksi yksiköiksi, tässä tapauksessa bareik-

si. Ensimmäinen mittaus epäonnistui, sillä tuntemattomasta syystä yksikkömuunnos ei toiminut, vaan saadut tulokset olivat epämääräisiä ja epäluotettavia.

6.2 Mittausten tulkinta ja Lyötynkatu 3A:n analyysi

Kohde on 5-kerroksinen kerrostalo, ja siinä on 36 asuntoa. Se sijaitsee Oulun Etu-Lyötyssä, missä paine-eron vaihtelu on $5,0 \pm 2,0$ baria. Rakennuksen lämmitysjärjestelmään on asennettu Danfossin AVP k_{vs} 6,3 -paine-erosäädin 0,8–1,6 barin säätöalueella. Lämmönjakokeskuksen mitoitus tiedot on esitetty taulukossa 5.

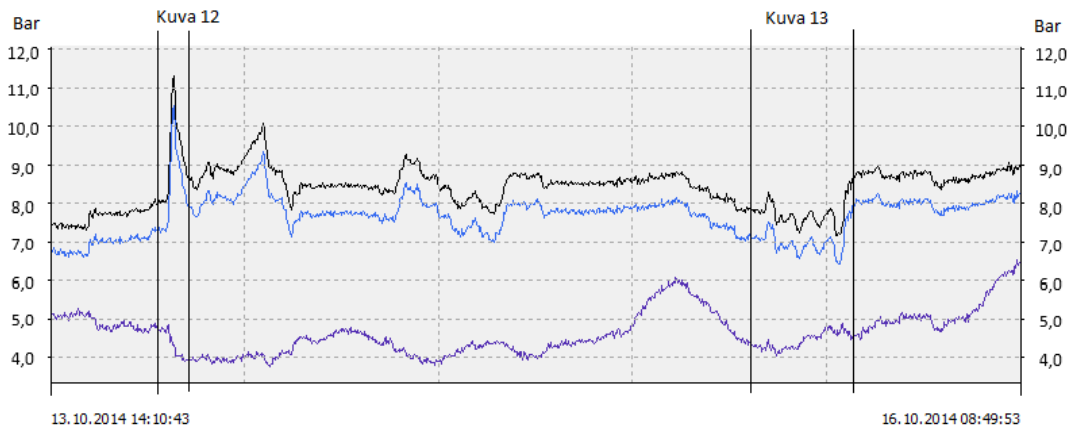
TAULUKKO 5. Lyötynkatu 3:n mitoitus tiedot

Lämmönjakokeskuksen laitteiden mitoitus					
	Yksikkö	Käyttövesi		Lämmitys	
Teho	kW	280		65	
		ensiö	toisio	ensiö	toisio
Virtaus	dm ³ /s	1,3	1,4	0,2	0,52
Lämpötilat	°C- °C	70 / 18	10 / 58	115 / 35	30 / 60
Painehäviö	kPa	18	19	2	7
		Käyttövesi TV1		Lämmitys TV 2	
Virtaus	dm ³ /s	1,3		0,2	
Painehäviö	kPa	55		51	
koko / kvs-arvo	DN / kvs	25 / 6,3		15 / 1	

Järjestelmän maksimipainehäviö on annettujen tietojen mukaan $(55+18+5)$ kPa=78 kPa (TV1+LS+putkisto), mikä on mahdollista käyttöveden maksimivirtaamatilanteessa kesälämpötiloilla. Painehäviöt koostuvat kaukolämpöputkiston painehäviöistä sekä siirtimen ja käyttövesiventtiilin painehäviöistä. K1 ilmoittaa putkiston maksimipainehäviöksi 5 kPa ja se on myös yleisimmin käytetty mitoitusarvo. Siirtimen painehäviö saadaan käytetystä mitoitusohjelmasta tai siirtimen valmistajalta ja se on merkittynä mitoitus tietoihin. Määräyskokoelma K1:n mukaan se on maksimissaan 20 kPa.

Mittaus

Mittaus alkoi 13.10.2014 kello 14.10 ja päättyi 16.10.2014 kello 8.49. Tänä aikana ulkolämpötila vaihteli $-6,7$ ja $+2,3$ °C:n välillä. Mittausväli asetettiin viiden sekunnin intervallille. Koko mittauksen tulokset on nähtävissä kuvassa 11.



KUVA 11. Lyötynkatu 3:n mittaustulokset

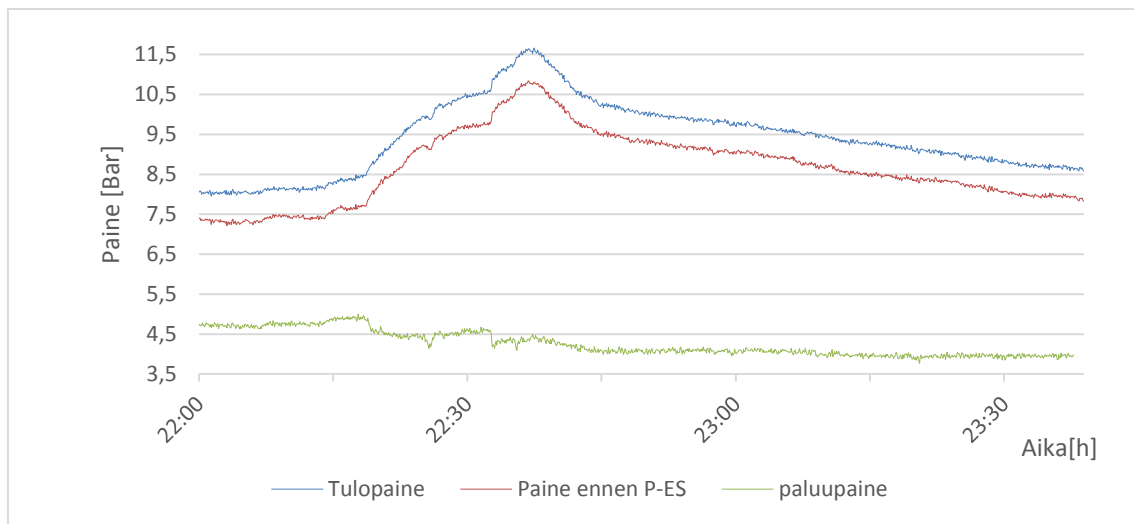
Saaduista tuloksista voidaan selvittää, mikä on paine-erosäätimen todellinen asetusarvo, paljonko paine-ero olisi ilman paine-erosäädintä ja paljonko paine-erosäädin vaikuttaa. Kuvaajan musta käyrä kuvaa tulopainetta, vaaleansininen ennen paine-erosäädintä olevaa painetta ja tummansininen paluupainetta.

Tulopaineen ja ennen paine-erosäädintä olevan paineen käyrät ovat lähes identtiset, mikä viittaa paine-erosäätimen tasaiseen toimintaan. Näiden käyrien välissä oleva alue kuvaa paine-erosäätimen asetusarvoa, eli se voidaan laskea käyrien erotuksena. Tässä tapauksessa asetusarvoksi saatiin 72,4 kPa, jolloin käyttövesiventtiilin auktoriteetiksi tulee 0,76 ja lämmityksen säätöventtiilille 0,70.

Aikaisemmin todettuun maksimipainehäviöön 78 kPa:han verrattuna, säätimen asetusarvo 72,4 kPa on lukujen mukaan liian tiukka. Todellisuudessa kuitenkin käyttöveden maksimivirtaama on harvinainen tilanne varsinkin kerrostalossa, joten venttiilien parempi auktoriteetti voidaan ajatella tärkeämmäksi kuin laskennallinen maksimitilanteen toimivuus. Asetusarvo on siis sopiva.

Ilman paine-erosäädintä käytettävissä oleva paine-ero olisi 376 kPa. Tällöin käyttövesiventtiin auktoriteetiksi tulisi vain 0,15 ja lämmityksen venttiilille 0,14, mitkä ovat huomattavasti alle suositellun 0,5:n. Voidaan todeta, että paine-erosäädin on kohteessa kriittinen komponentti toiminnan kannalta, varsinkin kun mittaushetkellä paine-ero on lähellä pienintä arvoa ilmoitetusta vaihtelusta.

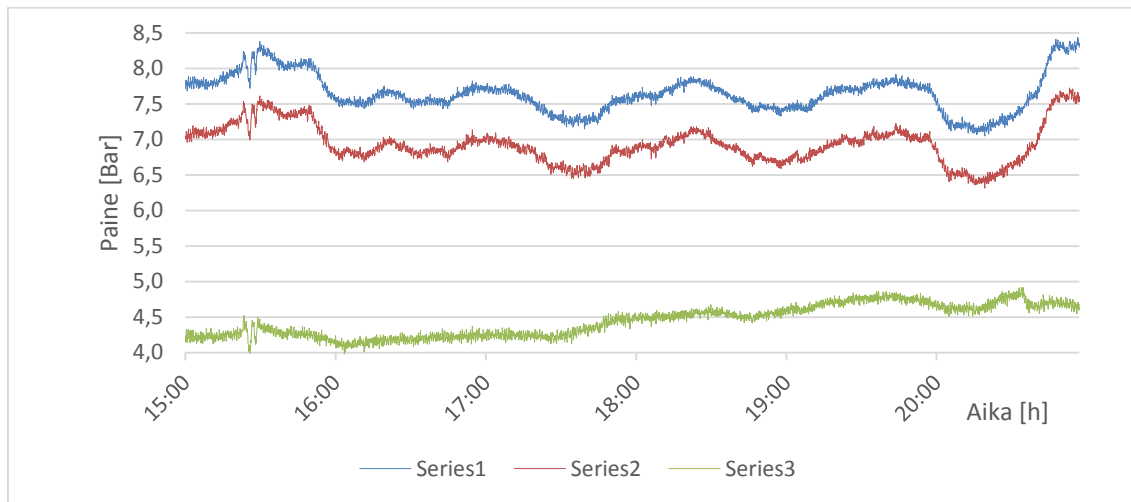
Kuva 12 selkeyttää koko mittauksen kuvaajassa näkyvän terävän piikin. Paineen nousu on huomattava, mutta muutos ei ole kovin radikaali, vaan se tapahtuu noin 30 min aikana. Samalla paluupaine laskee noin 0,5 baria. Koko tämän ajan paine-erosäädin pysyy hyvin mukana, vaikka paine-ero nousee suurimmillaan 7,2 bariin. Huojuntaa ei ole havaittavissa.



KUVA 12. Maanantai-illan painepiikki 13.10.2014

Koska asiakkaan laitteet eivät vaikuta verkoston tulopaineeseen vaan siihen vaikuttavat lämmöntoimittajan omistamat välipumppaamot, on erittäin vaikea sanoa mistä äkillinen paineen nousu johtuu. Piikin aikana ulkolämpötila laskee 1,5 °C:sta 0,4 °C:seen eli 1,1 astetta, mutta näin pieni lämpötilan muutos ei ole riittävä selitys 3,5 barin paineen nousuun. Syynä voi olla esimerkiksi samalla alueella olevan rakennuksen suuri äkillinen tehontarve. Tästä huolimatta paine-erosäädin tekee tehtävänsä ilman ongelmia.

Kuvan 13 jatkuva vaihtelu johtuu kellonajasta. Käyttöveden kulutus on korkeimmillaan kello 16–20 ruuanlaiton ja peseytymisen takia. Ruuanlaiton tuoma lämpö pienentää myös lämmöntarvetta. Lähes identtinen kuvio on nähtävissä koko mittauksen kuvaajassa, kuvien 12 ja 13 välissä.



KUVA 13. Keskiviikkoiltapäivän lämpimän käyttöveden kulutuksesta aiheutuvat paineiden vaihtelut 15.10.2014

Paine-erosäätimen mitoitus

Tarkasteltaessa asennettua paine-erosäädintä Oulun Energian tavalla talven maksimivirtaamaksi saadaan 2,59 m³/h ja säädintä koskeviksi auktoriteeteiksi taulukossa 6 esitetyt arvot.

TAULUKKO 6. Paine-erosäätimen auktoriteetit k_{VS} -arvolla 6,3

	Ylimenevä paine-ero 627 kPa, talvi i-32°C		Pelkkä käyttövesi kesällä Ylimenevä paine-ero 227 kPa, Kesä	
Anna virtaama [dm ³ /s]	0,72	2,59 m ³ /h	1,3	4,68 m ³ /h
Anna Kvs-arvo	6,30		6,30	
Käytettävissä oleva paine-ero [bar]	6,28	627,6 kPa	2,28	227,6 kPa
Paine-eros.hävittävä paine [bar]	0,17	16,9 kPa	0,55	55,2 kPa
Paine-eros. auktoriteetti	0,03		0,24	

Kyseinen paine-erosäädin ei olisi hyväksyttävä sillä talvitilanteen auktoriteetti jää alle 0,06:n. Auktoriteetin nostamiseksi voidaan joko tiukentaa säätöventtiile-

jä ja nostaa asetusarvoa tai pienentää paine-erosäätimen k_{VS} -arvoa. Pienemällä k_{VS} -arvolla olevan paine-erosäätimen auktoriteetit on esitetty taulukossa 7.

TAULUKKO 7. Paine-erosäätimen auktoriteetit k_{VS} -arvolla 4,0

	Ylimenevä paine-ero 627 kPa, talvi i-32°C		Pelkkä käyttövesi kesällä Ylimenevä paine-ero 227 kPa, Kesä	
Anna virtaama [dm ³ /s]	0,72	2,59	1,3	4,68
Anna k_{VS} -arvo	4,00		4,00	
Käytettävissä oleva paine-ero [bar]	6,28	627,6 kPa	2,28	227,6 kPa
Paine-eros.hävittämä paine [bar]	0,42	42,0 kPa	1,37	136,9 kPa
Paine-eros. auktoriteetti	0,07		0,60	

Pienentämällä paine-erosäätimen k_{VS} -arvo 4,0:aan talvitilanteen auktoriteetti nousee 0,07:ään muuttuen hyväksyttäväksi ratkaisuksi. Tässä tapauksessa voitaisiin tehdä myös venttiilien pienennys, mikä nostaisi auktoriteettia vielä paremmaksi korkeamman asetusarvon vuoksi.

Mittauksen aikana paine-eron keskiarvo oli 376 kPa ja virtaaman 0,44 m³/h, jolloin auktoriteetiksi saadaan vain 0,002. Tästä huolimatta paine-erosäädin ei huojunut missään vaiheessa mittausta. Oulun Energian raja-arvo 0,06 on kuitenkin laskettu maksimitilanteeseen, joten on oletettavaa, että auktoriteetti laskee myös sen alle.

Danfoss tarkastelee paine-erosäädintä mitoitettaessa lämmönjakokeskuksen paineen riittävyyden. Paine-ero on kesätilanteessa pienimmillään 300 kPa, mutta sen sijaan mitoitusvirtaama on kesällä suurimmillaan korkean käyttövesivirtaaman takia. Tällöin paine-erosäädin hävittää 55,2 kPa painetta. Asetusarvon ollessa 72,4 kPa ja venttiilin oman painehäviön 55,2 kPa eli yhteensä 137,6 kPa voidaan olettaa, että paine-ero riittää säätimelle kaikissa tilanteissa, koska suurin painehäviö on alle pienimmän paine-eron.

Danfossin tarkastelutavalla kesätilanteessa paine-ero venttiilin yli on 227,6 kPa eli asetusarvo 72,4 kPa vähennettynä kesän 300 kPa:sta, ja virtaamana on pelkkä käyttövesi eli 4,68 m³/h. Kaavalla 1 näillä arvoilla k_V -arvoksi tulee 3,11. Kaavalla 5 saadaan paine-erosäätimelle laskettua avautumisasteeksi 49,3 %,

joka on reilusti yli Danfossin suositteleman 30 %:n raja-arvon. Sen sijaan talvitalanteen 627,6 kPa:n paine-erolla ja pelkällä lämmityksen 0,72 m³/h virtaamalla saadaan avautumisasteeksi vain 4,6 % jolloin vaarana on auki/kiinni säätö. Kun lämmitykseen lisätään talven käyttövesi, virtaamaksi tulee 3,06 m³/h ja avautumisasteeksi 19,4 %. Mittauksen aikana venttiilin k_v-arvo on 0,25 m³/h ja avautumisaste vain 4,0 %.

Jos venttiili pienennettäisiin Oulun Energian tavoin k_{vs} 4,0:aan, avautumisaste kesällä olisi 77,8 %, talven lämmityksellä 7,1 % ja mitoitusvirtaamalla 30,5 %. Talven lämmityksen avautumisaste on edelleen huomattavasti alle 30 %, mutta silti parempi kuin k_{vs} 6,3:lla. Lisäksi lämmitys on säätöliikkeiltään rauhallisempi kuin käyttövesi, joten paine-erosäädin voi vähäisestä aukeamastaan huolimatta löytää sopivan kohdan, sillä lämmöntarve ei vaihtele niin nopeasti. Pienempi venttiili hävittää 137 kPa, mutta asetusarvon kanssa, yhteensä 209 kPa, se pysyy alle 300 kPa:n, joten venttiilille ei tule ongelmia paineen riittävyden suhteen.

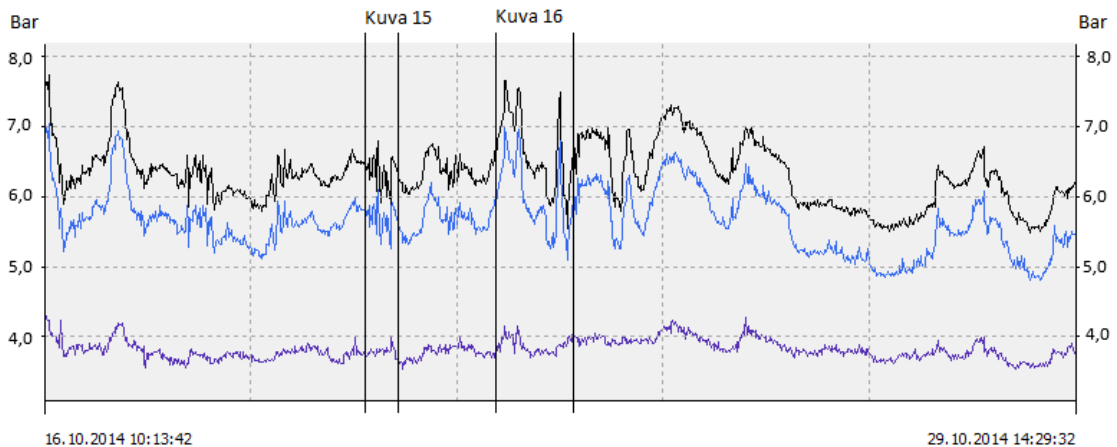
6.3 Revonkuja 7A

Kohde on 6-kerroksinen kerrostalo ja siinä on 70 asuntoa. Se sijaitsee Oulun Välvainiolla, missä paine-eron vaihtelu on 3,0±1,0 bar. Rakennuksen lämmitysjärjestelmään on asennettu Siemensin VHG519 paine-erosäädin, jonka säätöalue on 40–220 kPa ja k_{vs}-arvo 15,0. LJK:n mitoitus tiedot on esitetty taulukossa 8.

TAULUKKO 8. Revonkuja 7A mitoitus tiedot

Lämmönjakokeskuksen laitteiden mitoitus							
	Yksikkö	Käyttövesi		Lämmitys		Lattialämmitys	
Teho	kW	385		110		40	
Virtaus	dm ³ /s	ensiö	toisio	ensiö	toisio	ensiö	toisio
Lämpötilat	°C- °C	2,08	1,92	0,39	0,89	0,119	1,93
Painehäviö	kPa	70 / 25	10 / 58	115 / 45	40 / 70	115 / 30	30 / 35
		6	6	3	12	1	17
		Käyttövesi TV1		Lämmitys TV 2		Lattialämmitys TV 3	
Virtaus	dm ³ /s	2,08		0,39		0,119	
Painehäviö	kPa	22		32		46	
koko / kvs-arvo	DN / kvs	32 / 16		20 / 2,5		15 / 0,63	

Venttiilien painehäviöt ovat suhteellisen pienet, ja keskuksen korkein painehäviö tulee lattialämmityksen säätöventtiilistä, kun siihen lisätään siirtimen ja putkiston painehäviöt, yhteensä 52 kPa.



KUVA 14. Revonkuja 7A:n mittaustulokset

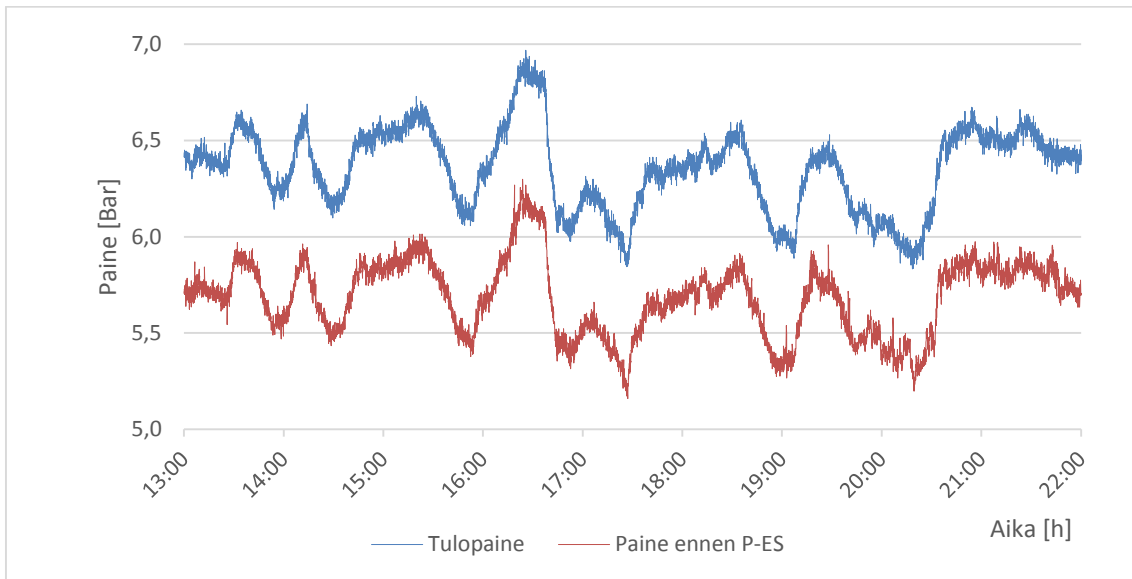
Työn pisin mittausmittaus alkoi 16.10.2014 kello 10.13 ja päättyi 29.10.2014 kello 14.29. Tänä aikana ulkolämpötila vaihteli $-8,6$ ja $+10,9$ °C:n välillä ja mitausväli asetettiin viiden sekunnin intervallille.

Koko mittauksen kuvaajasta (kuva 14) nähdään paine-erosäätimen toimivan suhteellisen hyvin, sillä ylimmät painekäyrät ovat lähes identtiset. Kuvaaja kuitenkin käsittää yli 13 päivän ajanjakson, joten tarkkuus ei ole riittävä johtopää-

tösten tekoon. Huomioitavia asioita kuitenkin kuvaajassa on, että paine-erosäädin on selkeästi tarpeellinen asennetuilla venttiileillä (kahden alimman käyrän välissä oleva alue) ja se, että toisin kuin tulopaine, paluupaine on lähes tulkoon vakio. Paluupaineen pysyessä lähes vakiona, se on jätetty tarkemmista kuvaajista pois.

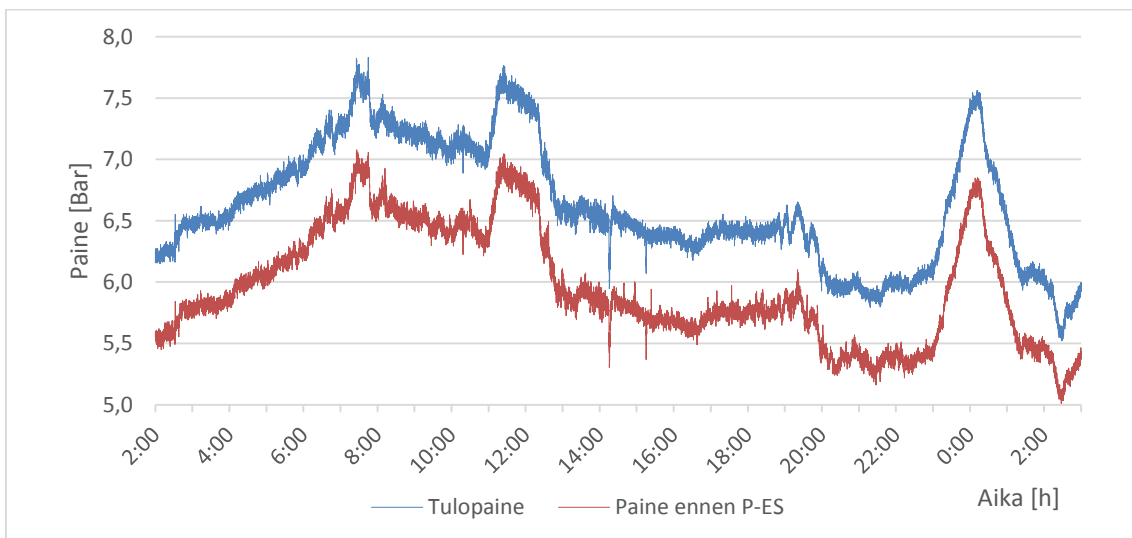
Säätimen asetusarvoksi saatiin 67,4 kPa ja paine-erosäädin kuristaa keskimäärin 183 kPa. Käyttöveden auktoriteetiksi kaavalla 3 laskettuna tulee 0,32, lämmitykselle 0,47 ja lattialämmitykselle 0,68. Auktoriteetit ovat lähellä suositeltua vähimmäisarvoa 0,5, joten ne ovat hyväksyttävät, mutta niitä olisi syytä parantaa. Erityisesti käyttöveden säätöventtiilin auktoriteettia tulisi saada paremmaksi, sillä käyttöveden tarve on vaihtelevaa ja sitä voidaan tarvita äkillisesti paljon, jolloin venttiilin tulee pystyä reagoimaan siihen. Jos käyttöveden k_{vs} -arvon pienentäisi 10:een, säätöventtiilin painehäviö nousisi 56 kPa:han ja auktoriteetiksi tulisi 0,84.

Kuva 15 näyttää koko mittauksessa voimakkaalta huojunnalta, mutta tarkempaa tarkasteluna se on normaali iltapäivä. Sahaavaa liikettä on nähtävissä, mutta muutokset ovat pitkällä aikavälillä, joten ne eivät johdu paine-erosäätimen toiminnasta. Syynä on luultavimmin verkoston pumppaus, joka johtuu vaihtelevasta lämmöntarpeesta kellonajan takia.



KUVA 15. Maanantai-iltapäivän lämpimän käyttöveden kulutuksesta aiheutuvat paineiden vaihtelut 20.10.2014

Myös kuva 16 on mielenkiintoinen, sillä siinä ei näy iltapäivän vaikutusta lähes ollenkaan. Sen sijaan aamulla ja seuraavana yönä on suhteellisen korkeita painepiikkejä.



KUVA 16. Keskiviikkoyöstä alkavan vuorokauden paineiden vaihtelut 22.10.2014

Molempina aikoina, 07.00–13.00 ja 0.00–01.00, lämpötila laskee alle –8 °C:n, joka voi olla esimerkiksi pumppausvoimakkuuden raja-arvo. Näiden aikana paine-ero käy noin 3 barissa, mutta paine-erosäätimessä ei ole havaittavissa voimakasta huojuntaa, vaikka lievää sahaavaa liikettä näkyykin.

Alueen pienen paine-erovaihtelun vuoksi paine-erosäädin ei ole tässä tapauksessa pakollinen, ja kohteen voisi toteuttaa myös ilman paine-erosäädintä. Taulukossa 9 on esitetty venttiilien tiedot ja auktoriteetit Oulun Energian laskurilla.

TAULUKKO 9. Mahdolliset säätöventtiilit ilman paine-erosäädintä

	Käyttövesi LS1 kesä TV1		Lämmitys LS2 talvi-32°C TV2		IV LS3 talvi-32°C TV3	
Anna virtaama [dm ³ /s]	2,08	7,49	0,39	1,40	0,119	0,43
Anna Kvs-arvo	6,30		1,00		0,40	
Käytettävissä oleva paine-ero [bar]	2,00	200,0 kPa	4,00	400,0 kPa	4,00	400,0 kPa
Venttiilin hävittävä paine [bar]	1,41	141,3 kPa	1,97	197,1 kPa	1,15	114,7 kPa
Venttiilin auktoriteetti	0,71		0,49		0,29	
	Käyttövesi LS1 talvi-32°C TV1		Lämmitys LS2 talvi-5°C TV2		IV LS3 talvi-5°C TV3	
Anna virtaama [dm ³ /s]	1,10	3,97	0,25	0,91	0,08	0,28
Anna Kvs-arvo	6,30		1,00		0,40	
Käytettävissä oleva paine-ero [bar]	4,00	400,0 kPa	3,00	300,0 kPa	3,00	300,0 kPa
Venttiilin hävittävä paine [bar]	0,40	39,7 kPa	0,83	83,3 kPa	0,48	48,5 kPa
Venttiilin auktoriteetti	0,10		0,28		0,16	

Säätöventtiilien auktoriteetit eivät ole erinomaiset, varsinkaan talvitilanteessa, joten on ymmärrettävää, että auktoriteetteja on parannettu paine-erosäätimen avulla.

Paine-erosäätimen mitoitus

Oulun Energian laskurilla mitoitusvirtaamaksi saadaan 4,83 m³/h ja auktoriteeteiksi taulukossa 10 esitetyt arvot.

TAULUKKO 10. Paine-erosäätimen auktoriteetit k_{VS} -arvolla 15,0

	Ylimenevä paine-ero 333 kPa, talvi i-32°C		Pelkkä käyttövesi kesällä Ylimenevä paine-ero 133 kPa, Kesä	
Anna virtaama [dm ³ /s]	1,341	4,83	2,08	7,49
Anna k_{VS} -arvo	15,00		15,00	
Käytettävissä oleva paine-ero [bar]	3,33	333,0 kPa	1,33	133,0 kPa
Paine-eros.hävittävä paine [bar]	0,10	10,4 kPa	0,25	24,9 kPa
Paine-eros. auktoriteetti	0,03		0,19	

Talvitilanteessa paine-erosäätimen auktoriteetti on selvästi alle Oulun Energian raja-arvon, mikä tarkoittaa liian suurta k_{VS} -arvoa. Venttiilin kokoa voisi pienentää lähes puolella, sillä k_{VS} -arvolla 8,0 auktoriteeteiksi tulisi taulukon 11 arvot.

TAULUKKO 11. Paine-erosäätimen auktoriteetit k_{VS} -arvolla 8,0

	Ylimenevä paine-ero 333 kPa, talvi i-32°C		Pelkkä käyttövesi kesällä Ylimenevä paine-ero 133 kPa, Kesä	
Anna virtaama [dm ³ /s]	1,341	4,83	2,08	7,49
Anna k_{VS} -arvo	8,00		8,00	
Käytettävissä oleva paine-ero [bar]	3,33	333,0 kPa	1,33	133,0 kPa
Paine-eros.hävittävä paine [bar]	0,36	36,4 kPa	0,88	87,6 kPa
Paine-eros. auktoriteetti	0,11		0,66	

Paine-erosäätimen hävittävä paine ei nouse liian korkeaksi, mutta auktoriteetit paranevat niin kesä- kuin talvitilanteessa ja ennen kaikkea talvitilanne tulee hyväksyttävälle tasolle.

Mittauksen aikana virtaaman keskiarvo oli 0,88 m³/h ja käytettävissä olevan paine-eron 250,4 kPa. Näillä arvoilla paine-erosäätimen auktoriteetiksi saadaan 0,002, mutta silti asetusarvo vaihtelee mittapisteiden välillä alle 10 kPa, mikä voidaan tulkita normaaliksi käytökseksi eli huojuntaa ei ole havaittavissa.

Siemensin mitoituslaskurin valitsema paine-erosäädin on VHG519 M 32–15, eli säätöalue on 60–400 kPa, asennuskoko on DN32 ja k_{VS} -arvo on 15. Tuote siis poikkeaa asennetusta vain säätöalueen kohdalla. Mitatun asetusarvon ollessa 67,4 kPa olisi tämäkin ollut mahdollinen vaihtoehto. Mielenkiintoinen huomio oli, että jos minipaineeksi merkittiin 210 kPa ilmoitetun 200 kPa:n sijaan, mitoitettu tuote oli DN-kooltaan 25 ja k_{VS} -arvoltaan 10 tuoden sen lähemmäs Oulun Energian auktoriteetilaskurin suosittamaa k_{VS} -arvoa.

Laskelmat on esitetty liitteessä 1. Lämpötilaerona on käytetty siirtimien tehoon nähden painotettua keskiarvoa, joka on laskettu kaavalla 5.

6.4 Ritakierros 5

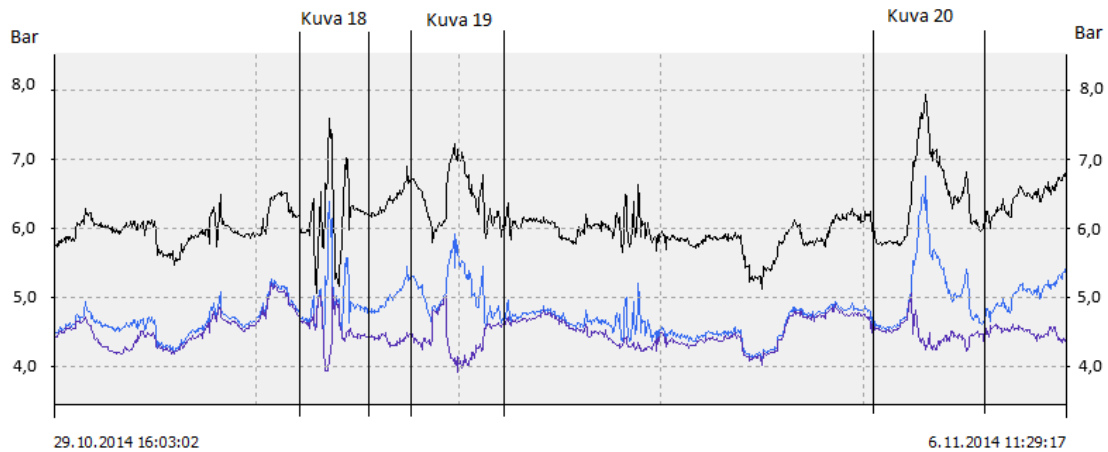
Kohde on As. Oy Puistonportti, joka käsittää 42 asuntoa. Alueena on Oulun Ritaharju, missä paine-ero vaihtelee välillä $3,0 \pm 1,0$ bar. Asennettu paine-erosäädin on Danfossin AVP k_{vs} -arvolla 6,3 ja 0,8–1,6 säätöalueella. Taulukossa 12 on esitetty LJK:n mitoittamiseen tarvittavat tiedot.

TAULUKKO 12. Ritakierros 5:n mitoittustiedot

Lämmönjakokeskuksen laitteiden mitoitus					
	Yksikkö	Käyttövesi		Lämmitys	
Teho	kW	224		90	
		ensiö	toisio	ensiö	toisio
Virtaus	dm ³ /s	1,19	1,11	0,31	0,71
Lämpötilat	°C- °C	70 / 25	10 / 58	115 / 45	40 / 70
Painehäviö	kPa	10	10	5	10
		Käyttövesi TV1		Lämmitys TV 2	
Virtaus	dm ³ /s	1,19		0,31	
Painehäviö	kPa	115		49	
koko / k_{vs} -arvo	DN / k_{vs}	20 / 4,0		15 / 1,6	

Paine-erosäätimen asetusarvo on mittaustulosten perusteella asetusarvo 132,3 kPa. Käyttövedelle saadaan auktoriteetiksi 0,87 ja lämmitykselle 0,37, joten venttiilit vaikuttavat sopivilta. Jos lämmityksen säätöventtiili pienennettäisiin k_{vs} 1,0:aan, sen painehäviö kasvaisi 125 kPa:han ja auktoriteetiksi samalla säätöarvolla tulisi 0,95. Toisaalta silloin venttiilillä olisi suurin painehäviö, ja tähän lisätynä siirtimen ja putkiston häviöt, summaksi tulisi 135 kPa joka on yli esisäätöarvon.

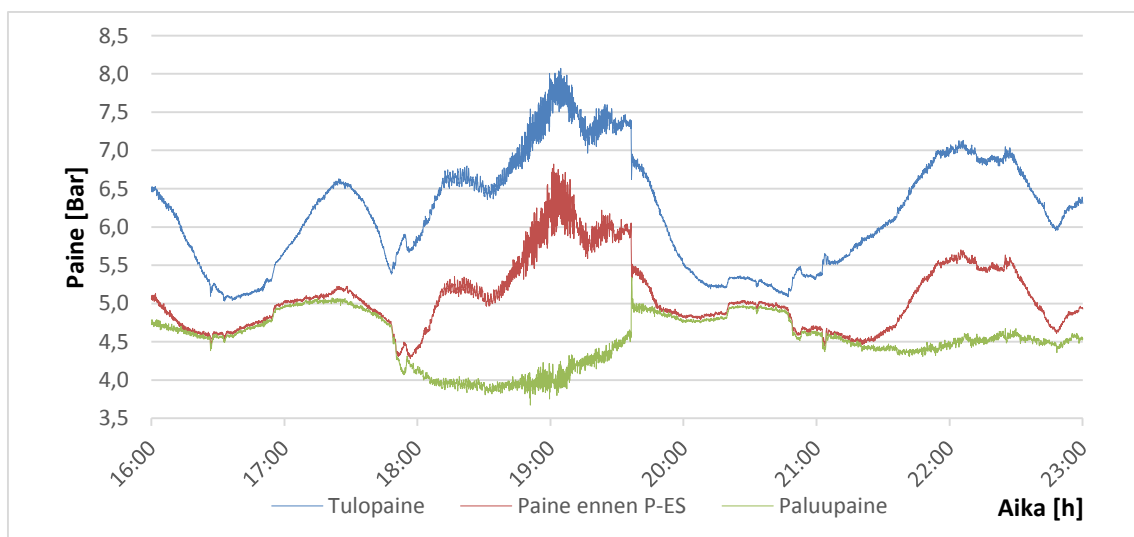
Kuvassa 17 on nähtävillä koko mittauksen tulokset. Mittaus toteutettiin viiden sekunnin intervallilla, ja se aloitettiin 29.10 kello 16.02 ja lopetettiin 6.11 kello 11.29. Mittaus kesti siis lähes 8 vuorokautta. Lämpötila oli matalimmillaan $-14,4$ °C ja korkeimmillaan $7,5$ °C.



KUVA 17. Ritakierros 5:n mittaustulokset

Kuvan 17 perusteella paine-erosäädin toimii silloin kun sitä tarvitaan, sillä kahden alimman käyrän erotessa toisistaan kaksi ylintä pysyy suhteellisen identtisenä. Alimpien käyrien päällekkäisyys viittaa siihen, ettei paine-erosäätimellä ole tarvetta säätää paine-eroa.

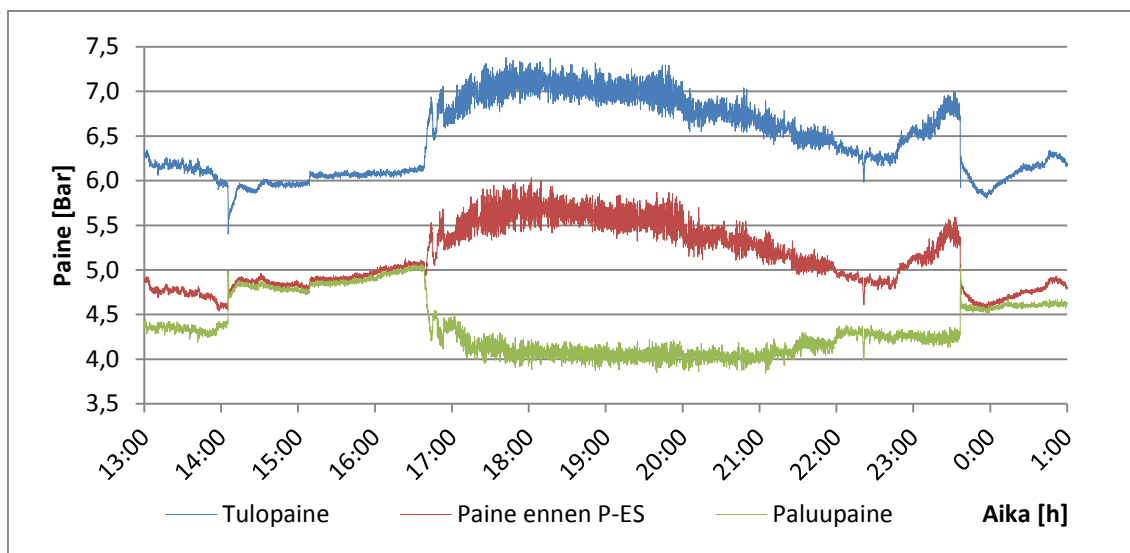
Kuvassa 18 on tarkempi tarkastelu mittauksen ensimmäisestä paineen noususta. Paine-erosäädin joutuu kuristamaan painetta, kun paine-ero kasvaa yli 2,5 barin, jolloin se rupeaa huojumaan. Huojunta on sitä voimakkaampaa mitä suuremmaksi paine-ero kasvaa.



KUVA 18. Perjantai-iltana näkyvä mahdollinen huojunta 31.10.2014

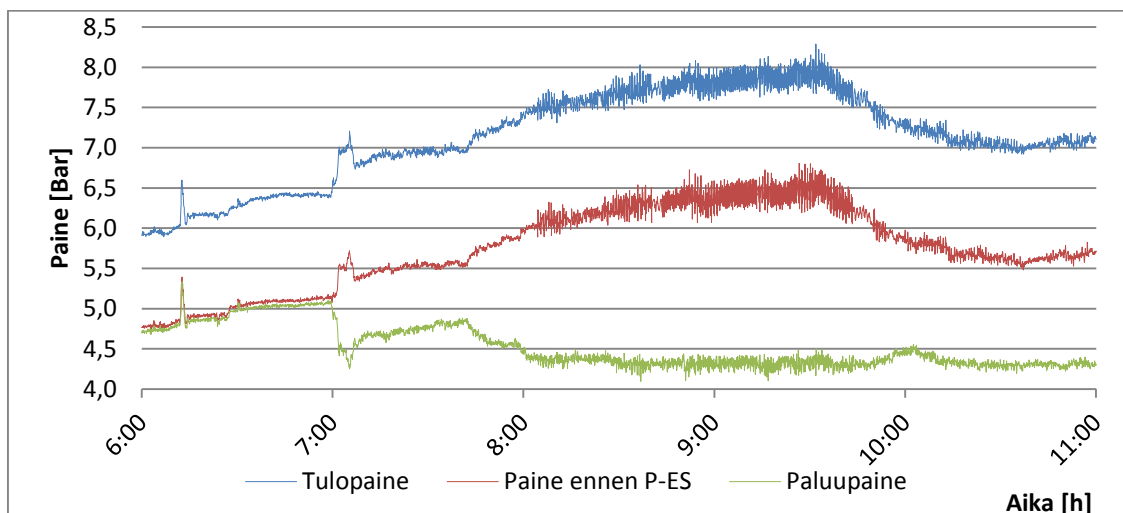
Kuvassa 18 näkyvä tiivis vaihtelu kello 19.00 kohdalla on suurimmillaan yli 100 kPa:n huojuntaa. Yksityiskohtaiset kuvaajat tilanteesta on esitetty liitteessä 2.

Samantapaista huojuntaa on havaittavissa kuvissa 19 ja 20, jotka vahvistavat käsitystä paine-eron kasvun vaikutuksesta. Kaikki käyrät ovat ulkolämpötiloita -5 °C:sta -8 °C:seen eli suhteellisen pienellä ja tasaisella välillä, joten ulkolämpötilan vaikutus huojuntaan on vähäistä. Kuvissa 17 ja 18 nähdään iltapäivän korkeampi kulutus, erityisesti kuvassa 19 joka on lauantai-iltapäivä, mistä johtuu luultavimmin myös paineen nousu. Tässäkin mielenkiintoinen huomio kuvassa 18 on sen lyhyt aikaväli, jolloin paine-ero on korkeampi, vaikka kyseessä on perjantai-ilta.



KUVA 19. Lauantai-illan selkeä huojunta 1.11.2014

Sen sijaan kuva 20 on keskiviikkoamu, mutta paineen kasvu jatkuu lähes kello 10:een saakka. Tähän mennessä oletettavasti suurin osa on jo lähtenyt töihin, joten kulutus on vähäistä. Kulutuksen vaihtelulla ei siis ole ainakaan tässä tapauksessa vaikutusta huojuntaan.



KUVA 20. Keskiviikkoaamun huojunta 5.11.2014

Paine-erosäätimen mitoitus

Mitoitusvirtaamaksi Oulun Energian laskurilla saadaan 2,83 m³/h ja auktoriteeteiksi taulukossa 13 esitetyt arvot.

TAULUKKO 13. Paine-erosäätimen auktoriteetit k_{vs} -arvolla 6,3

	Ylimenevä paine-ero 268 kPa, talvi i-32°C		Pelkkä käyttövesi kesällä Ylimenevä paine-ero 68 kPa, Kesä	
Anna virtaama [dm ³ /s]	0,79	2,83 m ³ /h	1,19	4,28 m ³ /h
Anna Kvs-arvo	6,30		6,30	
Käytettävissä oleva paine-ero [bar]	2,68	267,7 kPa	0,68	67,7 kPa
Paine-eros.hävittävä paine [bar]	0,20	20,2 kPa	0,46	46,2 kPa
Paine-eros. auktoriteetti	0,08		0,68	

Talvitilanteen auktoriteetti on hieman yli 0,06 raja-arvon, joten asennettuna oleva paine-erosäädin on Oulun Energian tarkastelun perusteella toimiva. Paine-erosäätimelle saataisiin parempi auktoriteetti, jos käyttövesiventtiili suurennettaisiin k_{vs} 6,3:een. Tämä mahdollistaisi asetusarvon pienentämisen 60 kPa:han, jolloin paine-erosäätimelle jäisi enemmän painetta käyttöön ja se voitaisiin pienentää k_{vs} 4,0:aan. Pienemmän paine-erosäätimen auktoriteetit on esitetty taulukossa 14.

TAULUKKO 14. Paine-erosäätimen auktoriteetit k_{VS} -arvolla 4,0

	Ylimenevä paine-ero 340 kPa, talvi i-32°C		Pelkkä käyttövesi kesällä Ylimenevä paine-ero 140 kPa, Kesä	
Anna virtaama [dm ³ /s]	0,79	2,83	1,19	4,28
Anna K_{VS} -arvo	4,00		4,00	
Käytettävissä oleva paine-ero [bar]	3,40	340,0 kPa	1,40	140,0 kPa
Paine-eros.hävittävä paine [bar]	0,50	50,0 kPa	1,15	114,7 kPa
Paine-eros. auktoriteetti	0,15		0,82	

Mitattaessa virtaaman keskiarvo oli 0,60 m³/h ja paine-eron 162 kPa, joista saadaan auktoriteetiksi 0,03 joka on alle Oulun Energian suosituksen. Koska paine-erosäädin ei säädä suurimmalta osalta mittausta tai sen vaikutus on minimaalinen, on syytä tarkastella erikseen säätävän ajanjakson auktoriteetti.

31.10. kello 17.00–20.00 paineet vaikuttavat pysyeneen suhteellisen samana, vaikka huojuntaa esiintyykin. Tällä aikavälillä virtaaman keskiarvo on 0,69 m³/h ja paine-eron 294 kPa. Näillä arvoilla auktoriteetiksi tulee vain 0,007.

Danfossin tarkastelutavalla kesätilanteessa paine-ero venttiilin yli on 67,7 kPa eli asetusarvo 132,3 kPa vähennettynä kesän 200 kPa:sta, ja virtaamana on pelkkä käyttövesi eli 4,28 m³/h. Kaavalla 1 näillä arvoilla k_V -arvoksi tulee 5,21. Kaavalla 5 saadaan paine-erosäätimelle laskettua avautumisasteeksi peräti 82,6 %. Sen sijaan talvitilanteen 267,7 kPa:n paine-erolla ja pelkällä lämmityksen virtaamalla 1,12 m³/h saadaan avautumisasteeksi 10,8 %, mikä on selvästi alle Danfossin 30 % suosituksen. Kun lämmitykseen lisätään talven käyttövesi, virtaamaksi tulee 3,26 m³/h ja avautumisasteeksi 31,6 %.

Mittauksen aikana venttiilin k_V -arvo oli 1,09 m³/h ja avautumisaste 17,4 %. Samalla aikavälillä kuin Oulun Energian tarkempi tarkastelu k_V -arvoksi tulee 0,54 m³/h ja avautumisasteeksi vain 8,6 %. Avautumisasteiden perusteella vaikuttaisi, että paine-erosäätimen k_{VS} -arvo on liian suuri, mikä voi olla yksi syy huojuntaan.

Jos säätöventtiileille tehtäisiin samat muutokset, jotka on esitetty Oulun Energian tarkastelun yhteydessä, avautumisaste kesällä olisi 90,4 %, talven lämmityksellä 23,7 % ja mitoitusvirtaamalla 68,9 %. Talven avautumisaste jää edelleen

alle Danfossin suosituksen, mutta on huomattavasti parempi kuin k_{vs} 6,3:lla oleva arvo. Koska pienemmän k_{vs} -arvon asentaminen vaatisi muitakin muutoksia keskukseen, se voisi parhaassa tapauksessa poistaa huojunnan.

6.5 Teuvo Pakkalan katu 10

Kiinteistö on pieni, 8 asunnon vanha puurakennus, ja se sijaitsee Oulun Raksilassa, missä paine-ero vaihtelee välillä $3,0 \pm 1,0$ bar. Lämmönjakokeskukseen on asennettuna IMI-Hydronicin DA516 15/20 -paine-erosäädin, jonka k_{vs} -arvo on 4,0 ja säätöalue 60–150 kPa. Taulukossa 15 on esitetty LJK:n mitoittamiseen tarvittavat tiedot.

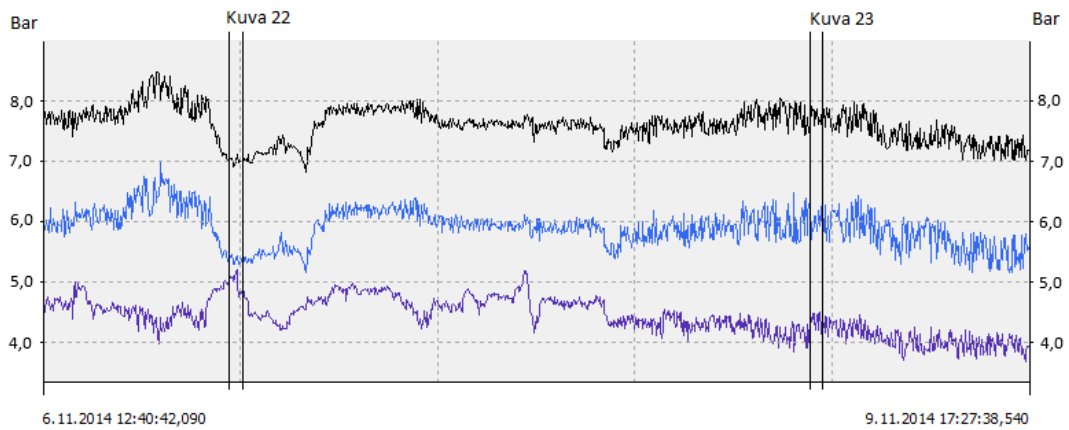
TAULUKKO 15. Teuvo Pakkalan katu 10:n mitoitustiedot

Lämmönjakokeskuksen laitteiden mitoitus					
	Yksikkö	Käyttövesi		Lämmitys	
Teho	kW	139		30	
Virtaus	dm ³ /s	ensiö	toisio	ensiö	toisio
Lämpötilat	°C- °C	0,75	0,7	0,14	0,37
Painehäviö	kPa	70 / 25	10 / 58	115 / 62	60 / 80
		12	11	0	3
		Käyttövesi TV1		Lämmitys TV 2	
Virtaus	dm ³ /s	0,75		0,14	
Painehäviö	kPa	45,2		25,1	
koko / k_{vs} -arvo	DN / k_{vs}	20 / 4,0		15 / 1,0	

Suurin painehäviö on käyttöveden säätöventtiilillä, joten maksimipainehäviöksi tulee $(45,2+12+5)$ kPa = 62,2 kPa. Paine-erosäätimen asetusarvoksi saatiin mittaustulosten perusteella 168,1 kPa. Mitattu asetusarvo on suurempi kuin ilmoitetun säätöalueen suurin arvo, mikä viittaa siihen, ettei paine-erosäädintä ole viritetty asennuksen jälkeen. Käyttövedelle saadaan auktoriteetiksi 0,26 ja lämmitykselle 0,15, mitkä ovat selvästi alle suositellun 0,5 raja-arvon. Sen sijaan, että venttiilit olisivat väärän kokoiset, oikea asetusarvo muuttaisi tilanteen kokonaan. Pienentämällä asetusarvo esimerkiksi 70 kPa:han käyttöveden auk-

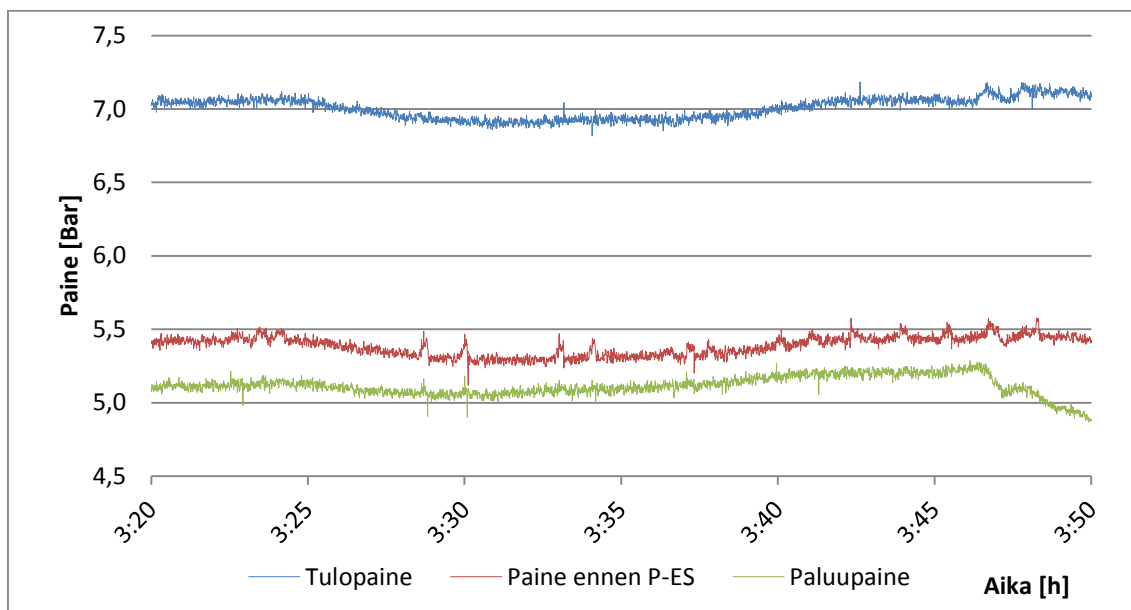
toriteetti nousee 0,65:een ja lämmityksen 0,36:een, jotka olisivat suotuisimmat mutta eivät loistavat arvot.

Teuvo Pakkalan kadun mittaus oli työn tarkin, sillä sen intervalli asetettiin 0,5 sekuntiin. Mittaus alkoi 6.11 kello 12.40 ja päättyi 9.11 kello 17.27. Lämpötila oli matalimmillaan $-10,8\text{ }^{\circ}\text{C}$ ja korkeimmillaan $3,0\text{ }^{\circ}\text{C}$. Mittaustulokset on nähtävissä kuvassa 21.



KUVA 21. Teuvo Pakkalan katu 10:n mittaustulokset

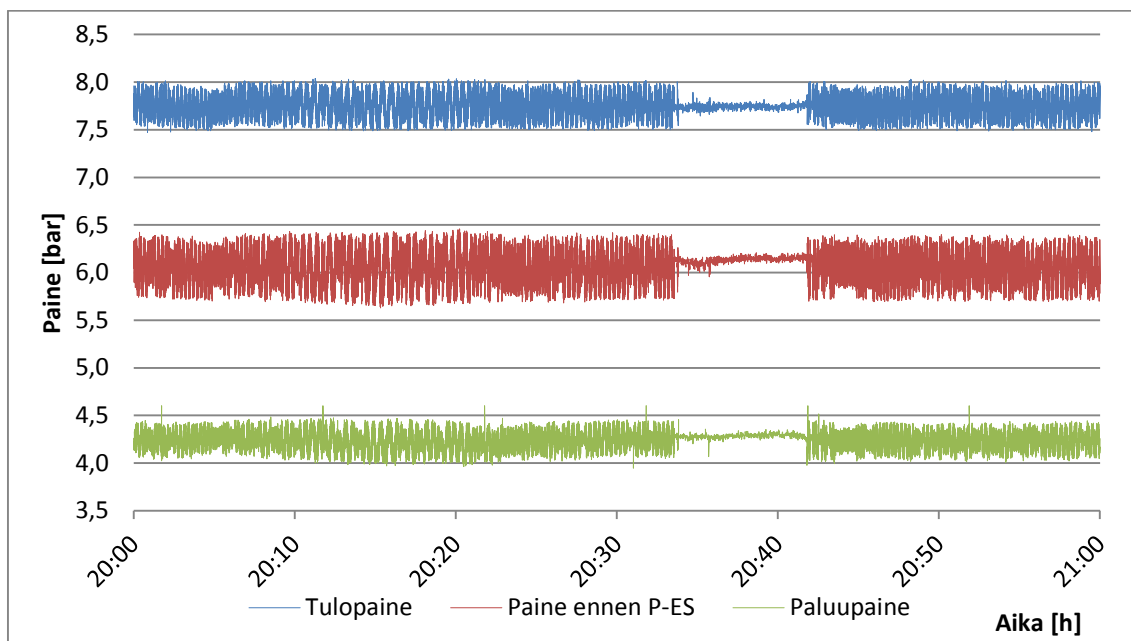
Paine-erosäädin joutuu selvästi säätämään, ja se näyttää pysyvän hyvin mukana, mutta jatkuva sahausliike vaikuttaa huojunnalta, varsinkin kun mittaus kesti vain hieman yli 3 vuorokautta. Paine-eron ollessa vähäisempää mahdollista huojuntaa ei esiinny (kuva 22), mutta mittauksen loppupuolella pienikin paineeron kasvu aiheuttaa selvästi suurempaa sahausliikettä.



KUVA 22. Pieni paine-ero perjantain vastaisena yönä 7.11.2014

Kuten kuvassa 22 on nähtävissä, paineiden vaihtelu on hyvin pientä eikä huojuntaa esiinny, kun paine-ero on lähellä asetusarvoa. Ulkolämpötila oli $-8,6$ °C ja kyseisenä kellonaikana (03.00–04.00) käyttöveden kulutus on pienimmillään, joten lämmöntarve on minimaalista.

Sen sijaan kuva 23 näyttää jatkuvaa ja suurta huojuntaa. Tällöin ulkolämpötila on noussut $-5,5$ °C:seen eli lämmöntarve on vähäisempää, mutta ajanhetkenä on lauantai-ilta, joten käyttöveden kulutus on erittäin korkea. Tarkemmat kuvaukset tilanteesta on esitetty liitteessä 3.



KUVA 23. Lauantai-illan selkeä huojunta 8.11.2014

Toinen mielenkiintoinen huomio mittauksessa on ulkolämpötilan vähäinen vaikutus. Lämpötilojen ääripäiden ero on lähes 14 °C, mutta huojuntaa esiintyy lähes yhtä suurena ulkolämpötilan ollessa niin kylmimmillään kuin lämpimimmilläänkin.

Paine-erosäätimen mitoitus

Mitoitusvirtaamaksi Oulun Energian laskurilla saadaan 1,58 m³/h ja auktoriteettiiksi taulukossa 16 esitetyt arvot.

TAULUKKO 16. Paine-erosäätimen auktoriteetit k_{vs} -arvolla 4,0

	Ylimenevä paine-ero 232 kPa, talvi i-32°C		Pelkkä käyttövesi kesällä Ylimenevä paine-ero 32 kPa, Kesä	
Anna virtaama [dm ³ /s]	0,44	1,58 m ³ /h	0,75	2,70 m ³ /h
Anna Kvs-arvo	4,00		4,00	
Käytettävissä oleva paine-ero [bar]	2,32	232,0 kPa	0,32	32,0 kPa
Paine-eros hävittämä paine [bar]	0,16	15,7 kPa	0,46	45,6 kPa
Paine-eros auktoriteetti	0,07		1,42	

Talvitilanteessa asennettuna oleva paine-erosäädin on juuri yli raja-arvon, mutta sen sijaan kesätilanteessa verkoston paine-ero ei riitä vaadittuun asetusarvoon,

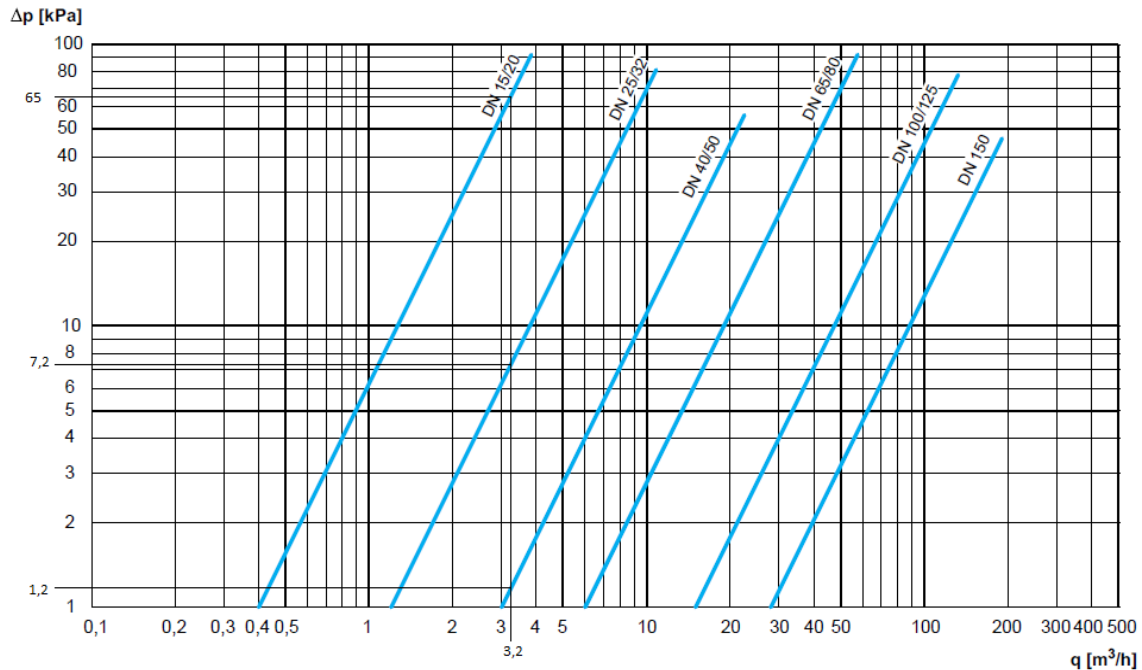
jolloin auktoriteetti nousee yli yhden. Paine-erosäädin ei siis ole sallituissa rajoissa, eikä se täten ole hyväksyttävä.

Muuttamalla asetusarvo 70 kPa:han talven auktoriteetti laskee 0,05, joten venttiilin k_{vs} -arvoa tulee pienentää, jotta venttiili saataisiin molempiin tilanteisiin sopivaksi. Vaihtamalla k_{vs} -arvo 2,5:een ja pitämällä 70 kPa:n asetusarvo auktoriteeteiksi tulisivat taulukossa 17 olevat arvot.

TAULUKKO 17. Paine-erosäätimen auktoriteetit k_{vs} -arvolla 2,5

	Ylimenevä paine-ero 330 kPa, talvi i-32°C		Pelkkä käyttövesi kesällä Ylimenevä paine-ero 130 kPa, Kesä	
Anna virtaama [dm ³ /s]	0,44	1,58	0,75	2,70
Anna k_{vs} -arvo	2,50		2,50	
Käytettävissä oleva paine-ero [bar]	3,30	330,0 kPa	1,30	130,0 kPa
Paine-eros. hävittämä paine [bar]	0,40	40,1 kPa	1,17	116,6 kPa
Paine-eros. auktoriteetti	0,12		0,90	

IMI-Hydronicin tarkastelutavalla mitoitusvirtaamaksi tulee 3,20 m³/h, joka antaa taulukon 4 mukaan tarkasteltuna DA516 -malleista 3 vaihtoehtoa paine-erosäätimeksi. Asennettuna olevalle 15/20:lle käyrästä (kuva 24) ilmoittaa paine-häviöksi noin 65 kPa, seuraavana vaihtoehtona on 25/32, jonka k_{vs} -arvo on 12 ja painehäviö noin 7 kPa ja viimeinen käyrälle osuva on 40/50, jonka k_{vs} -arvo on 30 ja painehäviö noin 1,2 kPa.



KUVA 24. IMI-Hydronicin mitoituskäyrästä ja sopivat paine-erosäätimet (15, s. 4)

Esimerkkikohteen mitoitusta soveltaen DA516 15/20 ja 25/32 olisivat kohteeseen sopivia, joista 25/32 olisi parempi pienemmän painehäviönsä takia. IMI-hydronicin mitoitustavalla kohteessa on siis asennettuna sopiva paine-erosäädin.

Kiinteistö on luokiteltu aikanaan omakotitaloksi useista huoneistoista huolimatta. Tämän takia Oulun Energian asentama mittari antaa vain vuorokausikohtaisen keskiarvon virtaamasta, jota ei voi työssä hyödyntää epätarkkuuden vuoksi. Yksityiskohtaista tarkastelua ei siis ole mahdollista suorittaa.

6.6 Ylioppilaantie 4

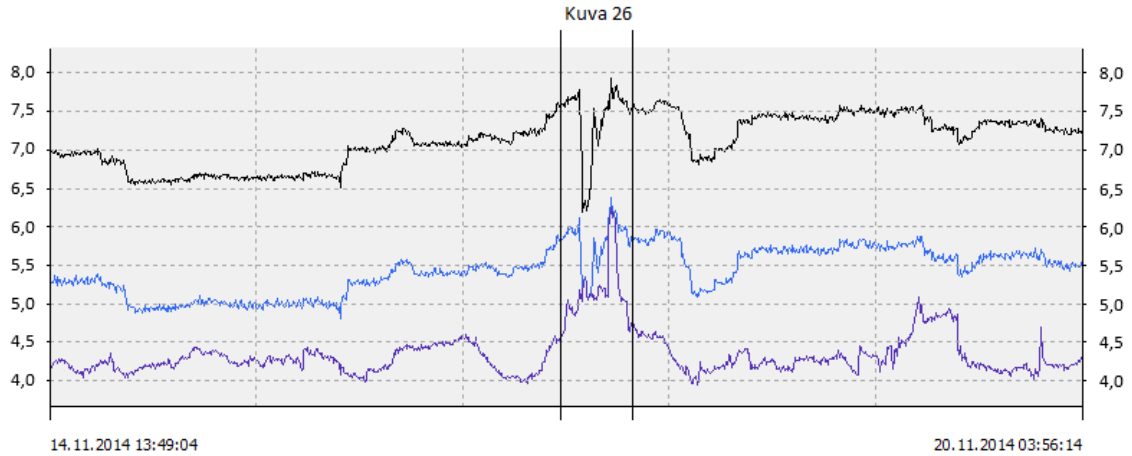
Kohde on 8-kerroksinen opiskelija-asuntola, jossa on 120 asuntoa. Rakennus sijaitsee Oulun Raksilassa, missä paine-ero vaihtelee välillä $3,0 \pm 1,0$ bar. Kohteeseen on asennettuna IMI-Hydronicin DA516 40/50 k_{vs} 30 -paine-erosäädin 60–150 kPa:n säätöalueella. Kohteen LJK:n mitoitus tiedot on esitetty taulukossa 18.

TAULUKKO 18. Ylioppilaantie 4:n mitoitus tiedot

Lämmönjakokeskuksen laitteiden mitoitus							
	Yksikkö	Käyttövesi		Lämmitys		Ilmastointi	
Teho	kW	490		300		470	
		ensiö	toisio	ensiö	toisio	ensiö	toisio
Virtaus	dm ³ /s	2,59	2,62	1,43	6,01	2,24	7,53
Lämpötilat	°C- °C	70 / 25	10 / 55	115 / 65	63 / 75	115 / 65	62 / 77
Painehäviö	kPa	16	16	1	19	3	15
		Käyttövesi TV1	Käyttövesi TV1.2	Lämmitys TV 2	Ilmastointi TV 3		
Virtaus	dm ³ /s	1,85	0,74	1,43	2,24		
Painehäviö	kPa	44	44	67	65		
koko / kvs-arvo	DN / kvs	20 / 10	15 / 4,0	20 / 6,3	20 / 10		

Korkein painehäviö on lämmityksen säätöventtiilillä, ja maksimipainehäviöksi saadaan $(67+1+5)$ kPa = 73 kPa. Paine-erosäätimen asetusarvoksi saatiin mittausten perusteella 169,1 kPa, mikä viittaa siihen, ettei sitä ole säädetty. Tällä asetusarvolla venttiilien auktoriteeteiksi tulee käyttövedelle molemmille vain 0,09, lämmitykselle 0,40 ja ilmanvaihdolle 0,38. Koska säätöventtiilien mitoittaminen tarkastellaan niiden auktoriteettien mukaan, tulisi paine-erosäädin säätää asetusarvoonsa. Maksimipainehäviöstä katsottuna sopiva arvo olisi noin 80 kPa, jolloin auktoriteeteiksi tulisi molemmille käyttövesiventtiileille 0,55, lämmitykselle 0,83 ja ilmanvaihdolle 0,81.

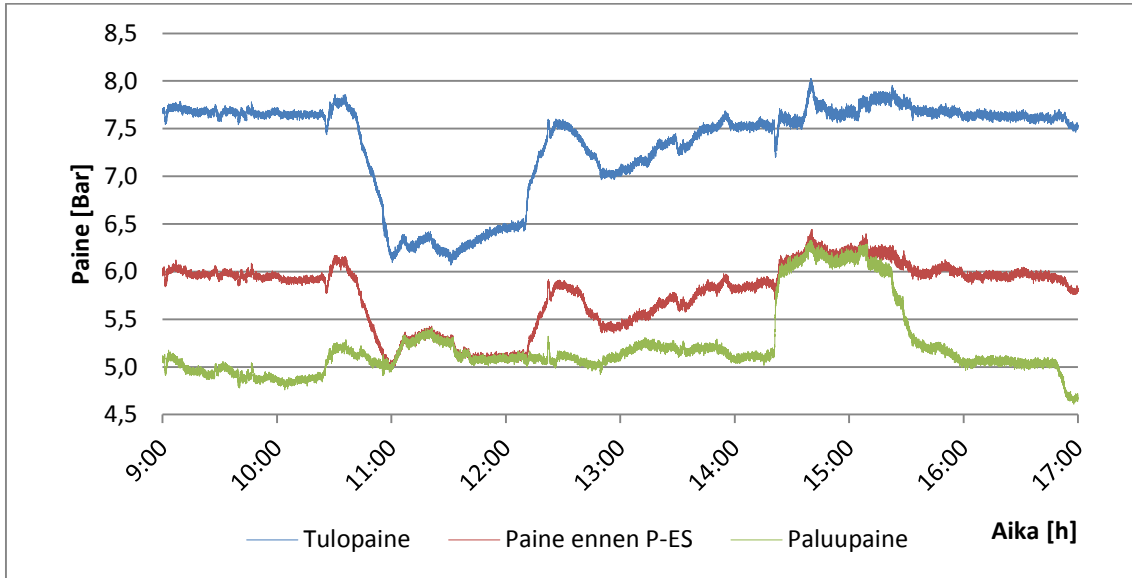
Mittaus aloitettiin 14.11 kello 13.49 ja päätettiin 20.11 kello 03.56. Intervalli asetettiin yhteen sekuntiin. Mittauksen aikana ulkolämpötila vaihteli $-7,5$ °C:sta $+2,6$ °C:seen. Kuvassa 25 on nähtävissä koko mittauksen tulokset.



KUVA 25. Ylioppilaantie 4:n mittaustulokset

Säätämättömyydestä huolimatta paine-erosäädin näyttää pysyvän hyvin muutoksissa mukana ja se on myös selvästi tarpeellinen, sillä ilman sitä paine-ero olisi ollut mittauksen aikana 277 kPa. Vähäistä sahaavaa liikettä on havaittavissa, mutta muutokset ovat niin pieniä, että se on normaalia käyttäytymistä. Paluupaine vaihtelee yllättävänkin paljon, mutta tällä ei ole vaikutusta paine-erosäätimen toimivuuteen, vaan kaksi ylintä käyrää pysyvät lähes identtisinä läpi mittauksen.

Kuvassa 26 on läheisempi tarkastelu mittauksen mielenkiintoisesta tilanteesta, jossa paluupaine kohoaa erittäin suureksi. Paine-erosäätimen toimintaan tämä ei vaikuta, vaan se pitää asetusrvon kohdallaan, kun paine-ero on suurempi kuin asetusrvo.



KUVA 26. Maanantaipäivän tulopaineen äkillinen lasku ja paluupaineen nousu 17.11.2014

Samaan aikaan kun paluupaine nousee yli 5 bariin, sen muutoin ollessa alle 4,5 baria, tulopaine laskee lähes 1,5 baria. Tilanteen aikana lämpötila on 0 °C - +1 °C, joten ulkolämpötilalla ei ole vaikutusta. Samalla alueella on suuria kaukolämmön asiakkaita, esimerkiksi uima-, jää- ja liikuntahalli, joten on mahdollista, että näiden lämmöntarpeissa on tullut muutoksia tänä aikana.

Paine-erosäätimen mitoitus

Mitoitusvirtaamaksi Oulun Energian laskurilla saadaan 16,94 m³/h ja auktoriteettiiksi taulukossa 19 esitetyt arvot.

TAULUKKO 19. Paine-erosäätimen auktoriteetit k_{vs} -arvolla 30,0

	Ylimenevä paine-ero 231 kPa, Talvi -32°C		Pelkkä käyttövesi Kesällä Ylimenevä paine-ero 31 kPa, Kesä	
Anna virtaama [dm ³ /s]	4,706	16,94	2,59	9,32
Anna Kvs-arvo	30,00		30,00	
Käytettävissä oleva paine-ero [bar]	2,31	230,9 kPa	0,31	30,9 kPa
Paine-eros.hävittävä paine [bar]	0,32	31,9 kPa	0,10	9,7 kPa
Paine-eros. auktoriteetti	0,14		0,31	

Paine-erosäätimen auktoriteetit ovat molemmat selvästi yli Oulun Energian raja-arvon, joten venttiili on hyväksyttävä. Jos venttiili säädettäisiin aikaisemmin esillä olleeseen 80 kPa:n asetusarvoon, sen auktoriteetit huononisivat selvästi, mutta pysyisivät yli 0,06:n. Säädetyt tilanteen auktoriteetit on esitetty taulukossa 20.

TAULUKKO 20. Paine-erosäätimen auktoriteetit säädetyllä k_{vs} -arvolla 30,0

	Ylimenevä paine-ero 320 kPa, Talvi -32°C		Pelkkä käyttövesi Kesällä Ylimenevä paine-ero 120 kPa, Kesä	
	Anna virtaama [dm ³ /s]	4,706	16,94 m ³ /h	2,59
Anna K_{vs} -arvo	30,00		30,00	
Käytettävissä oleva paine-ero [bar]	3,20	320,0 kPa	1,20	120,0 kPa
Paine-eros.hävittävä paine [bar]	0,32	31,9 kPa	0,10	9,7 kPa
Paine-eros. auktoriteetti	0,10		0,08	

Venttiilin pienen oman painehäviön vuoksi auktoriteetit jäävät alhaisiksi. Muuttamalla paine-erosäätimen k_{vs} -arvoa pienemmäksi voidaan kasvattaa sen painehäviötä ja täten sen auktoriteettia. Taulukossa 21 on esitetty k_{vs} -arvolla 20 olevan paine-erosäätimen auktoriteetit. Laskelmassa asetusarvo on myös säädetty 80 kPa:han.

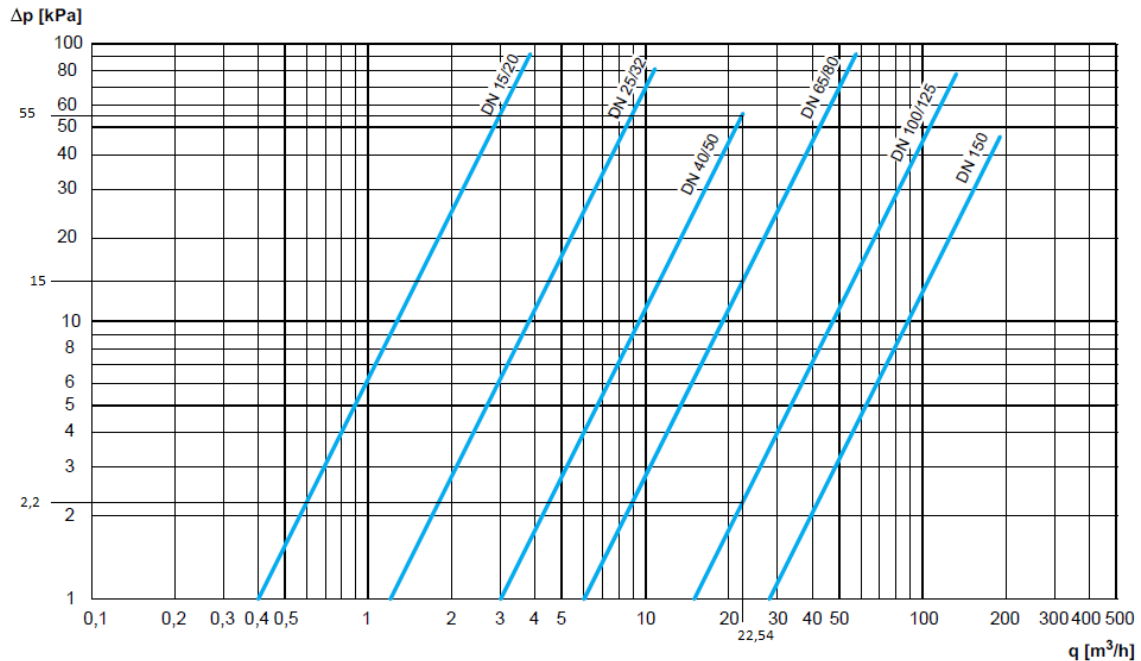
TAULUKKO 21. Paine-erosäätimen auktoriteetit k_{vs} -arvolla 20,0

	Ylimenevä paine-ero 320 kPa, Talvi -32°C		Pelkkä käyttövesi Kesällä Ylimenevä paine-ero 120 kPa, Kesä	
	Anna virtaama [dm ³ /s]	4,706	16,94 m ³ /h	2,59
Anna K_{vs} -arvo	20,00		20,00	
Käytettävissä oleva paine-ero [bar]	3,20	320,0 kPa	1,20	120,0 kPa
Paine-eros.hävittävä paine [bar]	0,72	71,8 kPa	0,22	21,7 kPa
Paine-eros. auktoriteetti	0,22		0,18	

Venttiili saisi siis paremmat auktoriteetit, jos sen k_{vs} -arvoa pienennettäisiin, sillä säätöventtiilien takia paine-erosäädin tulisi säätää joka tapauksessa. Tästä huolimatta nykyinenkin paine-erosäädin on hyväksyttävä.

Mittauksen aikana virtaaman keskiarvo oli 2,42 m³/h ja paine-eron 277,7 kPa, joista saadaan auktoriteetiksi 0,07, pysyen yli raja-arvon. Oulun Energian kriteerien mukaan huojuntaa ei kuuluisikaan esiintyä.

IMI-Hydronicin laskentatavalla mitoitusvirtaamaksi saadaan 22,54 m³/h, jonka mukaan tilanteeseen on tarjolla kolme DA516 -paine-erosäädintä (kuva 27). Pienin mahdollinen venttiili on 40/50, jonka painehäviö on 55 kPa ja k_{VS}-arvo 30, seuraava on 65/80, jonka painehäviö on 15 kPa ja k_{VS}-arvo 60, ja suurin tarjottu on 100/125, jonka painehäviö on 2,2 kPa ja k_{VS}-arvo peräti 150.



KUVA 27. IMI-Hydronicin mitoituskäyrästä ja sopivat paine-erosäätimet (15, s. 4)

Mitoituskäyrästä on nähtävää, että 40/50 on lähes maksimiarvossaan ja 100/125 taas lähes minimissään, joten sopivin vaihtoehto olisi 65/80 15 kPa:n painehäviöllään.

7 HAVAINNOT JA YHTEENVETO

Työn tavoitteena oli mitata ja tutkia paine-erosäätimen toimintaa ja huojunnan syitä. Tarkoituksena oli koota tulosten pohjalta yleinen ohjeistus, jonka mukaan voitaisiin mitoittaa valmistajasta riippumatta toimiva paine-erosäädin. Mittauksissa oli toiveena löytää kohteita joissa esiintyy huojuntaa, ja näiden perusteella ymmärtää siihen johtavia tekijöitä, vaikutusta lämmönjakokeskukseen ja esittää ratkaisuja sen estämiseksi.

Paine-erosäätimen mitoittaminen on selvästi monimutkaisempaa, kuin alun perin oli oletettu. Mitoitusvirtaamat, kriteerit ja näkemykset sopivasta koosta vaihtelevat valmistajien kesken suuresti, eikä niistä löydy selkeää yhteistä linjaa. Erilaisista tuoteperheistä johtuen tämä on ymmärrettävää, mutta poikkeavuuksien suuruus oli odotettua enemmän. Paine-erosäädintä valittaessa olisi parempi päättää ensin käytettävä merkki, ja vasta sitten tehdä mitoittaminen.

Mittausten avulla selkein havainto on Oulun Energian käyttämässä raja-arvossa. Kohteiden Lyötynkatu 3 sekä Revonkuja 7A:n olisi pitänyt huojua Oulun Energian auktoriteetilaskelmien mukaan, mutta näistä kummassakaan ei havaittu mitausten aikana merkittävää huojuntaa. Sen sijaan Ritakierros 5:n ja Teuvo Pakkalan katu 10:n olisi pitänyt olla toimivia, mutta molemmissa kohteissa esiintyi selkeää huojuntaa. Ainoastaan Ylioppilaantie 4:ssä laskelmat ja huojunta menivät oletetulla tavalla. Lisäksi jokaisessa huojumattomassa kohteessa on eri valmistajan paine-erosäädin ja samoin huojuvissa kohteissa on kahden eri valmistajan tuote, eli huojunta ei ole myöskään vain yhden valmistajan ongelma.

Oulun Energian tarkastelu ei silti ole turha, vaikka mitaustulosten mukaan raja-arvo toimii juuri päinvastoin kuin on tarkoitettu, eli alle 0,06:n paine-erosäätimet eivät huoju. Kolmessa kohteessa Oulun Energian laskelmien perusteella olisi pitänyt asentaa pienemmällä k_{VS} -arvolla oleva paine-erosäädin, ja näistä kahdessa myös valmistajan ohjeilla mitoitettu paine-erosäädin olisi ollut pienempi. Lisäksi Danfoss ja Siemens ilmoittivat liian suuren k_{VS} -arvon olevan yksi suurim-

pia syitä huojuntaan. Tarkastelussa raja-arvolla siis ei ole erityisen paljoa merkitystä, mutta laskelmien myötä lämmönjakokeskukseen tulee valituksi auktoriteeteiltaan tarkemmin mietityt venttiilit, mahdollisesti pienemmällä k_{vs} -arvolla oleva paine-erosäädin ja sille perusteltu asetusarvo.

Työn haasteellisuus ja aiheen laajuus yllätti, ja osittain sen takia lopputuloskin jäi hieman laihaksi. Huojunnan tarkempaan tutkimiseen tarvittaisiin selvästi huojuva kohde ja mittauksien tulisi olla monipuolisemmat. Koska järjestelmälle haitallinen huojunta on erittäin nopeaa, esimerkiksi virtaamasta tarvitaan tarkempia mittauservoja, kuin mitä tässä työssä oli tarjolla. Syvemmän analyysin lämmönjakokeskuksen toiminnasta saisi, jos jokaiselle säätöventtiilille olisi omavirtausmittari. Näin pystyttäisiin seuraamaan säätöventtiilin toimintaa ja reagoinnin nopeutta virtauksen muuttuessa.

Helpointa asian tutkiminen olisi sille erikseen rakennetun testipenkin avulla, missä pystyttäisiin simuloimaan eri kaukolämpöverkon tilanteita. Pienimmillään testipenkissä voisi olla kaksi lämmönjakokeskusta: ensimmäisenä olisi tutkittava kohde, ja toisena laajasti säädettävä keskus, jolla voitaisiin luoda suuriakin painehäviöitä tulo- ja paluuputkien välille. Näin pystyttäisiin asettamaan tutkittava paine-erosäädin verkoston ”keskelle”, eikä se olisi ainoa, saati suurin painehävittäjä. Asennusputkien kokojen ollessa riittävän suuret, tällaisella järjestelyllä voitaisiin luultavimmin mallintaa kaukolämpöverkkoa keskikokoisiin kerrostalo-kohteisiin asti.

Asiassa riittää siis tutkimista vielä runsaasti, ja alun perin tavoitteena ollut yleinen mitoitusohje on vielä kaukana. Pinta on kuitenkin raapaistu auki ja tästä on hyvä aloittaa jatkotutkimukset.

LÄHTEET

1. Muikkula, Pekka 2012. Kaukolämpöverkoston suunnittelu Saarelan kaava-alueelle. Opinnäytetyö, Oulu: Oulun seudun ammattikorkeakoulu, talotekniikan koulutusohjelma.
2. Kaukolämpö 2013 graafeina. 2015. Energiateollisuus ry. Saatavissa: <http://energia.fi/tilastot-ja-julkaisut> hakupvm 5.3.2015
3. Kaukolämpötilasto 2013. 2015. Energiateollisuus ry. Saatavissa: http://energia.fi/sites/default/files/kaukolampotilasto_2013_web.pdf hakupvm 5.3.2015
4. Mäkelä, Veli-Matti 2014. T621206 Kaukolämmitys 6 op. Opintojakson luennot syksyllä 2014. Oulu: Oulun ammattikorkeakoulu, tekniikan yksikkö.
5. Kaukolämmön käsikirja. 2006. Kaukolämpö. Helsinki: Energiateollisuus ry.
6. Kaukolämpö. Arvo-putki Oy. Saatavissa: <http://www.arvoputki.fi/tuotteet> hakupv, 7.3.2015
7. Huhtinen, Markku – Korhonen, Risto – Pimiä, Tuomo – Urpalainen, Samu 2008. Voimalaitostekniikka. Tampere: Juvenes Print.
8. Kaukolämmön kiertoveden käsittely. 2007. Energiateollisuus ry. Saatavissa: http://energia.fi/sites/default/files/suosituskk3_2007.pdf hakupvm 7.3.2015
9. Käytä kaukolämpöä oikein. 2007. Energiateollisuus ry. Saatavissa: http://energia.fi/sites/default/files/kayta_kaukolampoa_oikein_suomi.pdf hakupvm 7.3.2015
10. D22 Danfoss Universal Heat Exchangers, condenser/evaporator visuals. 2015. Danfoss Oy. Saatavissa: <http://products.danfoss.com/productrange/visuals/refrigeration/heat-exchangers/mphe-micro-plate-heat-exchanger/mphe-d-range-universal-heat-exchangers-universal-range/d22-danfoss-universal-heat-exchangers-condenser-evaporator/> hakupvm 31.5.2015
11. K1 Rakennusten kaukolämmitys, Määräykset ja ohjeet. 2013. Energiateollisuus ry. Saatavissa:

http://energia.fi/sites/default/files/julkaisuk1_2013_20140509.pdf hakupvm
7.3.2015

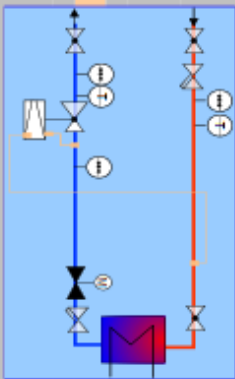
12. Saarela, Jere 2014. Paine-erosäätimen mitoitus. Sähköpostikeskustelu.
Vastaanottaja: Matti Niemi-Nikkola. Syksy 2014.
13. Nevalainen, Markku – Niemi, Heikki – Sutinen, Markku 2014. Paine-
erosäätimen mitoitus. Sähköpostikeskustelu. Vastaanottaja: Matti Niemi-
Nikkola. Syksy 2014.
14. Lättilä, Mikko 2014. Paine-erosäätimen mitoitus. Sähköpostikeskustelu.
Vastaanottaja: Matti Niemi-Nikkola. Syksy 2014.
15. DA516-fi-MAIN. 2013. IMI-Hydronic Engineering. Saatavissa:
www.imi-hydronic.com/fi/ hakupvm 21.5.2015
16. Lindholm, Dennis 2014. Paine-erosäätimen mitoitus. Sähköpostikeskustelu.
Vastaanottaja: Matti Niemi-Nikkola. Syksy 2014.
17. Tuote katalogi 2014. 2014. Siemens. Saatavissa:
http://w3.usa.siemens.com/datapool/us/BT/CPS/docs/pdf/SIE_2013_Catalog_Valves.pdf hakupvm 21.5.2015
18. Lättilä, Mikko 2015. Paine-erosäätimen huojunta. Sähköpostikeskustelu.
Vastaanottaja: Matti Niemi-Nikkola. Kevät 2015
19. Lindholm, Dennis 2015. Paine-erosäätimen huojunta. Sähköpostikeskustelu.
Vastaanottaja: Matti Niemi-Nikkola. Kevät 2015
20. Saarela, Jere 2015. Paine-erosäätimen huojunta. Sähköpostikeskustelu.
Vastaanottaja: Matti Niemi-Nikkola. Kevät 2015

SIEMENSIN MITOITTAMAN PAINE-EROSÄÄTIMEN LASKELMAT

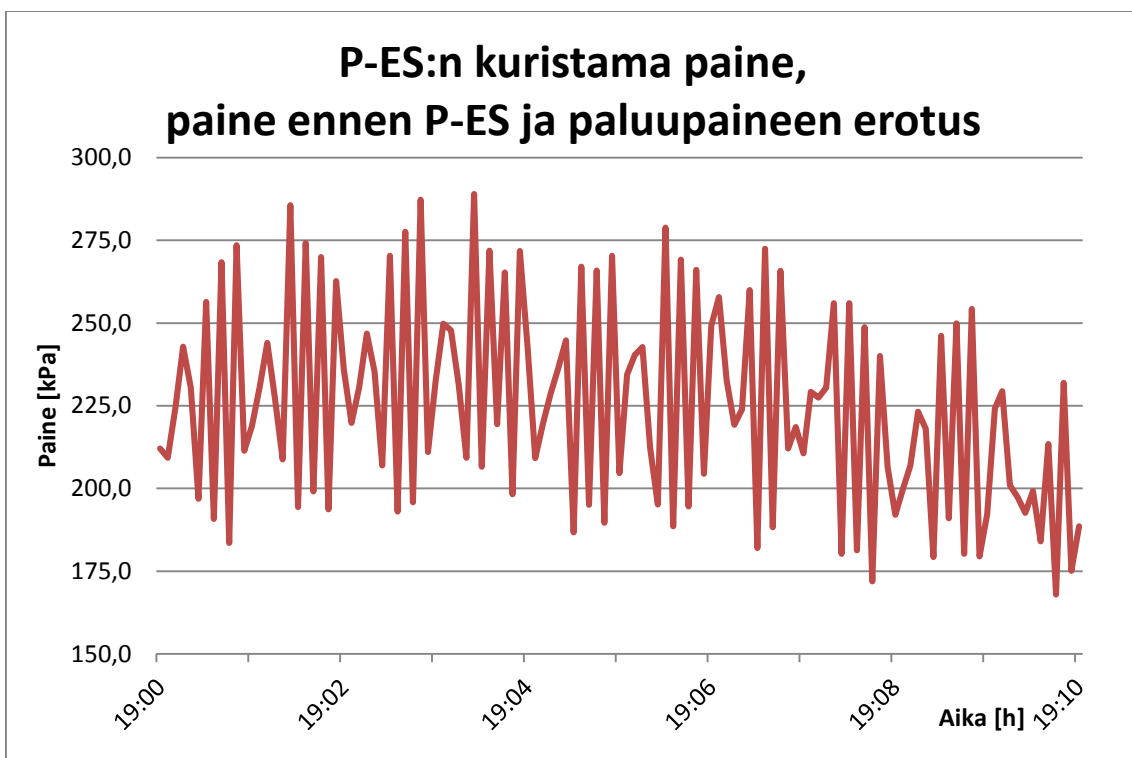
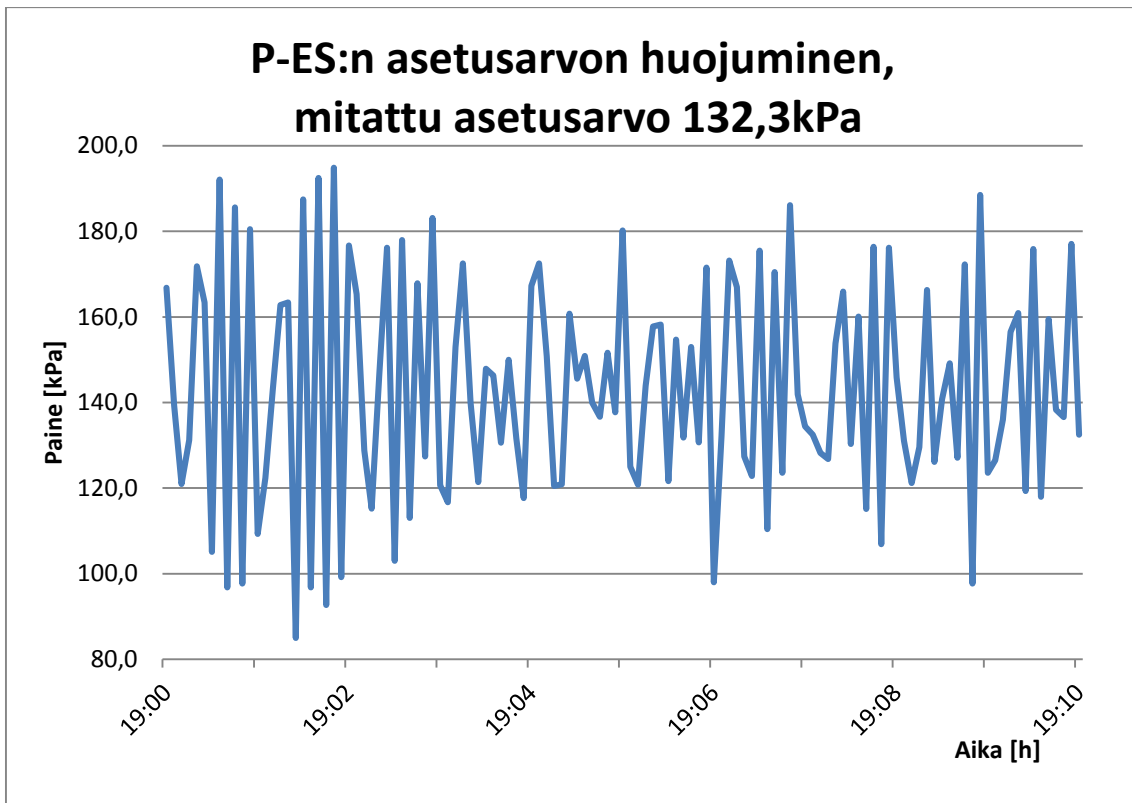
Valve Sizing with differential-pressure-regulation across the whole station

used formulae

Heating Power Consumption	535	kW
Temperature Difference	53,13	°C
Nominal Flow	8,66	m ³ /h
	$V = 0,86 \cdot \sqrt{P/DT}$	
Total differential pressure $\Delta P_{\text{gas, min}}$	200	kPa
Total pressure drop in installation $\Delta P_{\text{exchanger}} + \Delta P_{\text{pipe}} + \Delta P_{\text{devices}}$	53	kPa
differential pressure for control valve ΔP_v	50	kPa
	$\Delta P_v = \Delta P_{\text{exchanger}} + \Delta P_{\text{pipe}} + \Delta P_{\text{devices}}$	
calculated kv-value for control valve (authority 50%)	12,25	m ³ /h
	$k_v = V / \text{SQRT}(\Delta P_{v100})$	
selected kvs-value for control valve	16	m ³ /h
	$k_{vs} > 0,9 \cdot k_v$	
Control valve Authority	36 %	
	38 % PV = $\Delta P_{v100} / (\Delta P_{\text{exchanger}} + \Delta P_{\text{pipe}} + \Delta P_{\text{devices}} + \Delta P_{v100})$	
effective pressure ΔP_w	82	kPa
	$\Delta P_w = \Delta P_{\text{exchanger}} + \Delta P_{\text{pipe}} + \Delta P_{\text{devices}} + \Delta P_{v100}$	
differential pressure for regulator ΔP_{RD}	118	kPa
	$\Delta P_{RD} = \Delta P_{\text{exch, min}} - \Delta P_w$	
kv-value for differential pressure regulator $k_{v, RD}$	8,0	m ³ /h
	$k_{RD} = V / \text{SQRT}(\Delta P_{RD})$	
selected kvs-value for differential pressure regulator kvs_{RD}	15	m ³ /h
	$k_{vsRD} > 1,3 \cdot k_{RD}$	
Selected differential-pressure-regulator	VHG519 M 32-15	
Selected differential-pressure-regulator with flow limitation	VSG519 M 32-15	



RITAKIERROS 5 PAINE-EROSÄÄTIMEN ASETUSARVON JA KURISTAMAN
PAINEEN KUVAAJAT



TEUVO PAKKALAN KATU 10 PAIN-EROSÄÄTIMEN ASETUSARVON JA
KURISTAMAN PAINEN KUVAAJAT

