



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO  
TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

SONJA SAVIRANTA  
VEDENJAKELUJÄRJESTELMÄN ENERGIATASEANALYYSI

Diplomityö

Tarkastaja: prof. Jukka Rintala  
Tarkastaja ja aihe hyväksytty  
Luonnontieteiden tiedekuntaneuvoston kokouksessa 7. lokakuuta 2015

## TIIVISTELMÄ

**SONJA SAVIRANTA:** Vedenjakelujärjestelmän energiataseanalyysi

Tampereen teknillinen yliopisto

Diplomityö, 55 sivua, 9 liitesivua

Marraskuu 2015

Ympäristö- ja energiatekniikan diplomi-insinöörin tutkinto-ohjelma

Pääaine: Vesi- ja jätehuoltotekniikka

Tarkastajat: professori Jukka Rintala ja Saila Kallioinen

Avainsanat: vedenjakelu, energiatase, energiatehokkuus, verkostomallinnus

Energiatehokkuuden parantaminen on keskeinen keino vähentää kasvihuonekaasupäästöjä ja säästää kustannuksissa vesilaitoksilla, joiden käyttämästä energiasta merkittävä osa käytetään veden jakeluun. Tässä työssä viiden suomalaisen vedenjakelujärjestelmän energiankäyttöä tutkittiin energiataseanalyysillä. Verkostomallinnuksella laadittavalla vedenjakelujärjestelmän energiataseanalyysillä voidaan selvittää lähteet, joista energiaa tulee järjestelmään, järjestelmän ja sen eri osien energiankäyttö sekä se, miten energia järjestelmässä käytetään. Energiataseen tulosten pohjalta arvioitiin tarkasteltujen vedenjakelujärjestelmien energiatehokkuutta ja etsittiin kohteita, joilla olisi energiansäästöpotentiaalia. Energiatehokkuutta arvioitiin sekä koko järjestelmän osalta että painepiiri-kohtaisesti. Verkostomallinnuksella laadittavaa vedenjakelujärjestelmän energiatasetta ei ole aikaisemmin tutkittu suomalaisille vedenjakelujärjestelmille. Maailmanlaajuisestikin tässä työssä tehtävä tarkastelu on yksi ensimmäisistä ja ensimmäinen, jossa otetaan huomioon energiankäyttö myös raakavedenotossa ja veden siirrossa käsittelyprosessien sisällä.

Tässä työssä käytettävä energiatasemenetelmä pohjautuu Cabrera et al. (2010) kehittämään menetelmään, jota on täydennetty Sunela & Puust (2015b) esittämällä lisäyksillä. Erona aikaisempiin sovelluksiin energiatasetarkastelu on laajennettu käsittämään myös raakavedenotto ja veden siirtäminen vedenkäsittelyprosessissa. Energiavuo painepiirien läpi ja energiavajaus on otettu taseessa huomioon. Uutta aiempiin sovelluksiin verrattuna on myös tarkka sähköenergian mallinnus ja eri sähköä kuluttavien komponenttien erottelu siten, että pumpun, moottorin ja taajuusmuuttajan häviöt on eritelty. Energiatehokkuuden arvioimiseksi käytettävät tunnusluvut poikkeavat myös aikaisemmista esityksistä.

Tulosten perusteella suomalaisten vedenjakelujärjestelmien ominaisenergiankäyttö vaihtelee tyypillisesti 0,31–0,36 kWh/m<sup>3</sup>:iin ja ominaissähkönkäyttö 0,45–0,50 kWh/m<sup>3</sup>:iin. Verkostojen hydraulinen hyötysuhde vaihtelee 47–52 %, sähköhyötysuhde 32–38 % ja pumppauksen hyötysuhde 52–61 % välillä. Verkoston energiatehokkuutta heikentävistä tekijöistä ylijäämäenergiaa eli tarpeettoman korkeita paineita vedenkäyttäjillä on tyypillisesti 18–22 % kokonaisenergiankäytöstä, kitkahäviöitä 17–22 % kokonaisenergiankäytöstä ja vuotojen mukana järjestelmästä poistuvaa energiaa 9–13 % kokonaisenergiankäytöstä.

Työssä tutkittiin joidenkin toimenpiteiden vaikutusta energiatehokkuuteen. Tampereelle tutkituilla toimenpiteillä kokonaisenergiankäyttö väheni 20 % ja Joensuussa sähkönkäyttö 10 %

## ABSTRACT

**SONJA SAVIRANTA:** Energy Audit of Finnish Water Distribution Networks  
Tampere University of Technology  
Master of Science Thesis, 55 pages, 9 Appendix pages  
November 2015  
Master's Degree Programme in Environmental and Energy Technology  
Major: Water and Waste Engineering  
Examiners: Professor Jukka Rintala and Saila Kallioinen

**Keywords:** water distribution, energy audit, energy efficiency, network modelling

Improving energy efficiency is a key solution for reducing greenhouse emissions and saving costs for water utilities, where water distribution uses major part of the total energy. In this work, energy efficiency of five Finnish water distribution systems was assessed using energy balance method. Using model-based energy audit, the system energy inputs, energy usage of the whole system and its parts, and how the energy is used in the system can be found out. Based on the results, energy efficiency of the systems was evaluated. Energy efficiency was assessed for the whole systems and for each pressure zone separately. Energy audit that is based on network modelling has not been performed before for Finnish water distribution systems. Worldwide this work is one of the first assessments and the first that covers the whole system from raw water extraction to consumers.

The energy balance method in this work is based on the method developed by Cabrera et al. (2010), which has been complemented with some additional elements presented in Sunela & Puust (2015b). Compared with earlier applications, energy audit has been extended to include raw water extraction and conveyance and water transport within water treatment process. Energy flow through pressure zones and energy deficit has been considered in the balance. This work also adds accurate modelling of electrical energy, and separates the electricity using components so that, energy losses in pump, motor and variable-speed drive are all available. Performance indicators used for analyzing energy efficiency differ from earlier publications.

According to the results, the specific hydraulic and electrical energy consumptions of Finnish water distribution systems vary 0,31–0,36 kWh/m<sup>3</sup> and 0,45–0,50 kWh/m<sup>3</sup>, respectively. The hydraulic and electrical efficiencies of networks vary 47–52 % and 32–38 %, respectively, and pumping efficiency 52–61 %. Of all the components that reduce energy efficiency of the network, typically 18–22 % of the total energy is excess energy caused by unnecessary high pressure levels in the network, 17–22 % of the total energy consists of friction losses and 9–13 % of the total energy is leaked out of the system.

The effect of some actions on energy efficiency was studied. In Tampere the studied actions reduced total energy use by 20 %, and in Joensuu total electrical energy use was reduced by 10 %.

## ALKUSANAT

Tämä diplomityö on tehty toimeksiantona Tampereen vedelle, Tuusulan seudun vedelle, Joensuun vedelle, Nokian vedelle ja Imatran vedelle, joille esitän kiitokset tämän työn mahdollistamisesta. Työ on tehty työsuhteessa FCG Suunnittelu ja Tekniikka Oy:ssä, josta haluan kiittää Markus Sunelaa mielenkiintoisesta diplomityön aiheesta ja asiantuntevasta ohjauksesta sekä Antti Smolanderia perehdytyksestä verkostomallinnuksen saloihin. TTY:ltä kiitän työni tarkastajia professori Jukka Rintalaa ja Saira Kallioista hyvästä ohjauksesta ja rakentavista parannusehdotuksista.

Suuret kiitokset myös perheelleni ja ystäville kaikesta tuesta opintojeni aikana. Lisäksi esitän erityiskiitokset rakkaalleni Petrille henkisestä tuesta ja kannustuksesta diplomityön teon ja koko opintojeni aikana.

Jyväskylässä, 5.11.2015

Sonja Saviranta

## SISÄLLYSLUETTELO

1.	JOHDANTO .....	1
2.	TEOREETTINEN TAUSTA .....	3
2.1	Energiankäyttö vedenjakelujärjestelmissä .....	3
2.1.1	Pumppaus .....	3
2.1.2	Kitkahäviöt.....	6
2.2	Vesijohtoverkoston mallinnus.....	7
2.3	Energiataseanalyysi .....	9
2.4	Verkoston energiatehokkuuden mittareita.....	12
2.5	Energiataseen sovellukset .....	14
2.6	Vedenjakelujärjestelmän energiatehokkuuden parantaminen.....	16
2.6.1	Pumppauksen tehostaminen.....	16
2.6.2	Verkoston rakenteeseen liittyvät keinot energiatehokkuuden parantamiseen.....	17
3.	MATERIAALIT JA MENETELMÄT .....	19
3.1	Energiatasemallinnus .....	19
3.1.1	Verkoston energiatehokkuuden tunnusluvut.....	21
3.1.2	Virhelähteet .....	22
3.2	Tarkasteltavien verkoston ominaispiirteet.....	22
4.	TULOKSET .....	26
4.1	Verkoston energiataseet .....	26
4.2	Verkoston energiatehokkuuden tunnusluvut .....	28
4.3	Energiankäyttö painepiireissä .....	33
4.3.1	Kitkahäviöt.....	33
4.3.2	Ylijäämäenergia .....	35
4.3.3	Vuotoenergia .....	38
4.4	Pumppaukset .....	39
4.5	Raakavedenotto ja vedenpuhdistusprosessi .....	41
5.	TULOSTEN TARKASTELO .....	44
5.1	Yhteenveto keskeisistä energiatehokkuuden tunnusluvuista .....	44
5.2	Verkostokohtainen yhteenveto ja parannustoimenpiteet.....	45
5.3	Suomalaisten vedenjakelujärjestelmien energiatehokkuuden vertailu kirjallisuusarvoihin .....	48
6.	JOHTOPÄÄTÖKSET.....	51
	LÄHTEET.....	53

LIITE A: Tampereen energiataseen painepiirikohtaiset tulokset

LIITE B: TSV:n energiataseen painepiirikohtaiset tulokset

LIITE C: Joensuun energiataseen painepiirikohtaiset tulokset

LIITE D: Nokian energiataseen painepiirikohtaiset tulokset

LIITE E: Imatran energiataseen painepiirikohtaiset tulokset

## KUVALUETTELO

<i>Kuva 1.</i>	<i>Esimerkki pumpun tuotto- ja hyötysuhdekäyrästä (Grundfos 2015).....</i>	<i>4</i>
<i>Kuva 2.</i>	<i>Energiataseen komponentit (Sunela &amp; Puust 2015b) .....</i>	<i>12</i>
<i>Kuva 3.</i>	<i>Ruskon vesilaitoksen mallinnettu vedenpuhdistusprosessi, prosessin korkeusasemat näkyvissä.....</i>	<i>20</i>
<i>Kuva 4.</i>	<i>Ominaisenergiankäyttö verkostoissa, vasen pylväs kokonaisvedenkäytölle ja oikea pylväs lasketulle vedenkäytölle .....</i>	<i>28</i>
<i>Kuva 5.</i>	<i>Ominaisenergiankäytöt kokonaisvedenkäytölle suurissa (yllä) ja pienissä (alla) painepiireissä .....</i>	<i>29</i>
<i>Kuva 6.</i>	<i>Ominais sähkönkäyttö verkostoissa, vasen pylväs kokonaisvedenkäytölle ja oikea lasketulle vedenkäytölle.....</i>	<i>30</i>
<i>Kuva 7.</i>	<i>Verkostojen kokonaishyötysuhteet (vasen pylväs) ja sähköhyötysuhteet (oikea pylväs) .....</i>	<i>31</i>
<i>Kuva 8.</i>	<i>Hydraulinen kokonaishyötysuhde suurissa (yllä) ja pienissä (alla) painepiireissä .....</i>	<i>32</i>
<i>Kuva 9.</i>	<i>Kitkahäviöt suurissa (yllä) ja pienissä (alla) painepiireissä.....</i>	<i>34</i>
<i>Kuva 10.</i>	<i>Ylijäämäenergia suurissa (yllä) ja pienissä (alla) painepiireissä.....</i>	<i>36</i>
<i>Kuva 11.</i>	<i>Vuotojen mukana poistuva energia suurissa (yllä) ja pienissä (alla) painepiireissä .....</i>	<i>38</i>
<i>Kuva 12.</i>	<i>Pumppauksen hyötysuhde verkostoissa.....</i>	<i>39</i>
<i>Kuva 13.</i>	<i>Pumppauksen hyötysuhde suurissa (yllä) ja pienissä (alla) painepiireissä .....</i>	<i>40</i>
<i>Kuva 14.</i>	<i>Raakavesipumppauksen hyötysuhde.....</i>	<i>43</i>

## LYHENTEET JA MERKINNÄT

$d$	halkaisija [m]
$E$	vesimassan potentiaalienergia
EPA	Yhdysvaltain ympäristöministeriö
$f$	Darcy-Weisbachin yksikötön kitkakerroin
$g$	painovoimakiihtyvyys [ $\text{m/s}^2$ ]
$\gamma$	veden ominaispaino
$h$	nostokorkeus
$h_f$	putkessa tapahtuva kokonaispainehäviö [m]
$h_s$	virtaukseen lisätty energia
$k$	putken suhteellinen karkeus
$L$	putken pituus
$L_M$	moottorin kuorma
$\ln$	luvun luonnollinen logaritmi
$\log$	luvun kymmenkantainen logaritmi
$\mu$	viskositeetti
$n$	pumpun akselin pyörimisnopeus
$\eta_M$	moottorin hyötysuhde
$\eta_P$	pumpun hyötysuhde
$\eta_{VSD}$	taajuusmuuttajan hyötysuhde
$Q$	virtaama
$P$	teho
$P_F$	kitkaenergia
$P_H$	hydraulinen teho
$P_L$	vuotojen mukana poistuva energia
$P_N$	potentiaalienergia järjestelmään
$P_{NOM}$	moottorin ominaisteho
$P_P$	pumppujen tuottama energia
$P_S$	pumpun akseliteho
$P_U$	vedenkäyttäjille toimitettu energia
$p$	paine [Pa tai m]
$\rho$	tiheys
$Re$	Reynoldsin luku
TSV	Tuusulan seudun vesilaitos –kuntayhtymä
$u$	sisäenergia
$v$	veden virtausnopeus [m/s]
$W$	työ

# 1. JOHDANTO

Ilmastonmuutoksen hillitseminen on tärkeää maapallon tulevaisuuden kannalta, ja siihen voidaan vaikuttaa vähentämällä kasvihuonekaasupäästöjä. Vesihuoltolaitosten toiminnasta syntyy kasvihuonekaasupäästöjä energiankäytön seurauksena sekä päästöinä jäteveden ja lietteen käsittelystä. Vesihuoltolaitokset voivat vähentää päästöjään lisäämällä omaa energiantuotantoa esimerkiksi hyödyntämällä lietteen ja puhdistetun jäteveden energiasisältöjä sekä vähentämällä sähkön ja lämmön käyttöä. (Tukiainen 2009) Vesihuollossa sähköä käytetään vedenpuhdistusprosesseihin ja veden siirtämiseen pumpuilla. Ruotsissa, jonka vesihuolto muistuttaa pitkälti Suomen vesihuoltoa, on arvioitu, että vesihuollon sähkönkulutuksesta 40 % käytetään talousveden tuotantoon ja jakeluun ja 60 % jäteveden siirtämiseen ja käsittelyyn. Vesihuollossa eniten energiaa kuluttava yksikköprosessi on jäteveden ilmastus. Sähkönkulutuksen lisäksi jäteveden käsittelyssä energiaa käytetään lämmitykseen, jos lietteen käsittelyyn kuuluu mädätys. Talousveden tuotannossa eniten sähköä käytetään veden pumppaamiseksi verkostoon, kun taas talousveden puhdistuksen on Ruotsissa arvioitu kattavan 30 % talousveden tuotannon sähkönkäytöstä. (Lingsten & Lundkvist 2008)

On arvioitu, että 2-3 % maailman energiankulutuksesta kuluu pumppauksiin vedenjakelujärjestelmissä. (Nogueira Vilanova & Perrella Balestieri 2014) Yhdysvalloissa on arvioitu jopa 80 % vesihuollon energiankäytöstä käytettävän talous- ja jäteveden siirtämiseen (EPRI 2002). Täten vedenjakelujärjestelmän energiatehokkuuden parantamisella on suuri energiansäästöpotentiaali vesilaitostoiminnassa. Globaalin ilmastonäkökohdan lisäksi yksittäisten vesilaitosten tasolla energiankäyttö on merkittävä kuluerä, jota energiatehokkuutta parantamalla voidaan pienentää. Esimerkiksi Tuusulan seudun vedellä energiakustannus on suurin yksittäinen kustannuserä. (Tuusulan seudun vesilaitos kuntayhtymä 2014)

Vedenjakelujärjestelmän energiankäyttöön vaikuttavat vedenkäyttäjien määrä, verkoston laajuus ja ominaisuudet, raakavesilähde, korkeuserot verkoston alueella ja käytettävä laitteisto. Suurempien vesimäärien siirtämiseen tarvitaan luonnollisesti enemmän energiaa kuin pienten. Verkoston laajuus ja ominaisuudet, kuten putkikoot vaikuttavat energiankäyttöön veden siirtämisessä syntyvien kitkahäviöiden kautta. Järjestelmässä hyödynnettävän raakaveden vaikutus energiankäyttöön riippuu sen sijainnista ja raakaveden lähteestä. Jos raakaveden lähteet sijaitsevat kaukana vedenkäytöstä, tarvitaan enemmän energiaa veden siirtämiseksi vedenkäyttäjille kuin jos raakavettä saadaan otettua läheltä. Pohjavettä hyödynnettäessä raakavesi otetaan tyypillisesti kaivoista, jolloin vettä joudutaan nostamaan enemmän kuin jos käytettäisiin pintavettä. Yhdysvalloissa on arvioitu, että pohjavettä raakavetenä hyödyntävässä vedenjakelujärjestelmässä säh-

köä käytetään noin 30 % enemmän kuin pintavettä hyödyntävässä, sillä veden pumppaaminen pohjavesikaivoista kuluttaa enemmän energiaa kuin vedenotto pintavesilähteestä (EPRI 2002). Verkoston korkeuserot vaikuttavat siihen, auttaako painovoima veden siirtämisessä vai tarvitaanko paljon pumppausta. Energiankäyttöön vaikuttaa myös veden käsittelyyn ja siirtämiseen käytettävien laitteiden energiatehokkuus.

Tämän työn tavoitteena on verkostomallinnuksen avulla tutkia suomalaisten vedenjakelujärjestelmien energiatehokkuutta. Vedenjakelujärjestelmän energiatehokkuuden parantamiseksi on keskeistä löytää merkittävimmät energiaa käyttävät tekijät verkostosta, jotta voidaan löytää vaikuttavuudeltaan parhaat toimenpiteet. Energiataseanalyysillä energiatehokkuutta arvioidaan koko järjestelmäkokonaisuuden osalta aina raakavedenotosta vedenkäyttäjille asti. Ainoastaan vedenpuhdistusprosessin laitteiden energiatehokkuus jää tarkastelun ulkopuolelle. Verkostomallinnuksen avulla laadittava vedenjakelujärjestelmän energiatase paljastaa järjestelmän energiankäytön ja energiankäytön jakaantumisen järjestelmän eri osien kesken. Saadaan myös selville kuinka suuri osa energiankäytöstä kuluu erilaisiin häviöihin. Työssä on mukana viisi erilaista vedenjakelujärjestelmää, mikä mahdollistaa vertailun eri verkostojen välillä. Energiataseen avulla saadaan selville potentiaaliset kohteet joissa energiaa voidaan säästää ja tulosten perusteella esitetään parannusehdotuksia. Verkostomallinnuksen avulla voidaan myös laskea, kuinka paljon energiaa kullakin parannustoimenpiteellä voidaan säästää.

Tässä työssä tarkastellaan Tampereen, Tuusulan seudun, Joensuun, Imatran ja Nokian vedenjakelujärjestelmien energiatasetta. Tarkastelussa mukana olevat verkostot edustavat eri kokoisia ja eri tyyppisiä verkostoja, joten tuloksista saadaan yleiskuva suomalaisten vedenjakelujärjestelmien energiankäytöstä. Verkostomallinnuksella laadittavaa koko vedenjakelujärjestelmän kattavaa energiataseanalyysiä ei ole aikaisemmin tehty suomalaisille vedenjakelujärjestelmille. Maailmanlaajuisestikin tässä työssä tehtävä tarkastelu on yksi ensimmäisistä ja ensimmäinen, jossa otetaan huomioon energiankäyttö myös raakavedenotossa ja veden siirrossa käsittelyprosessien sisällä.

## 2. TEOREETTINEN TAUSTA

Tässä luvussa esitellään ensin keskeisimpien energiaa vedenjakelussa käyttävien tekijöiden, pumppausten ja verkostossa tapahtuvien kitkahäviöiden, teoriaa. Sen jälkeen esitellään energiataselaskennan ja siihen tarvittavan työkalun, vesijohtoverkoston mallinnuksen, teoriaa. Lopuksi tutustutaan vedenjakelujärjestelmien energiatehokkuuden mittareihin ja keinoihin energiatehokkuuden parantamiseksi.

### 2.1 Energiankäyttö vedenjakelujärjestelmissä

#### 2.1.1 Pumppaus

Veden pumppaus on vesilaitoksilla merkittävä sähkönkuluttaja. Etenkin pienillä vesilaitoksilla, joissa veden käsittelytarve on vähäinen, varsinaisten vedenkäsittelylaitteiden sähkönkulutus on pieni (Tukiainen 2009). Vesihuollossa veden siirtämiseen käytetään tyypillisesti keskipakopumppuja. Keskipakopumppu lisää pumpattavaan nesteeseen energiaa lisätäkseen sen nopeutta. Kun nesteen nopeus sittemmin vähenee, paine kasvaa. Yksinkertaistettusti, keskipakopumppu koostuu juoksupyörästä, juoksupyörää pyörittävästä akselistä ja kotelosta, joka suojaa juoksupyörää. Keskipakopumpun toiminta perustuu siihen, että pumpun akselille tuotu mekaaninen energia muuttuu juoksupyörässä hydrauliseksi energiaksi. Pumpattava neste pakotetaan pumpun kotelon imupuolelle, josta se juoksupyörän pyöriessä liikkuu pumpun läpi kohti painepuolta. Nesteen poistuksessa juoksupyörän kehältä alenee paine juoksupyörän tulopuolella, jolloin pumpun kotelon imupuolella vallitseva korkeampi paine pakottaa lisää nestettä juoksupyörälle täyttämään alipaineen. (Volk 2005)

Nesteen hydraulinen energia koostuu kineettisestä sekä paine- ja potentiaalienergiasta. Kineettinen energia on veden liike-energiaa ja paine-energia aikayksikössä tehty työ vesimassan edetessä keskinopeuden  $v$  osoittaman määrän. Vesimassan potentiaalienergia on se työ, joka tarvitaan nostamaan vesimassa vertailutasosta tarkkailutasoon. Kun yhdistetään nämä termit, saadaan Bernoullin yhtälö:

$$E = h + \frac{p}{\gamma} + \frac{v^2}{2g}, \quad (1)$$

missä  $h$  on putken korkeus,  $p$  putkessa vallitseva paine,  $v$  veden virtausnopeus,  $\gamma$  veden tilavuuspaino ja  $g$  painovoimakiihtyvyyden (Simon 1976). Kun virtaushäviöitä ei oteta huomioon, Bernoullin yhtälöä voidaan soveltaa putkivirtauksessa kahden tarkastelupisteen välillä seuraavasti (Fox & McDonald 1994):

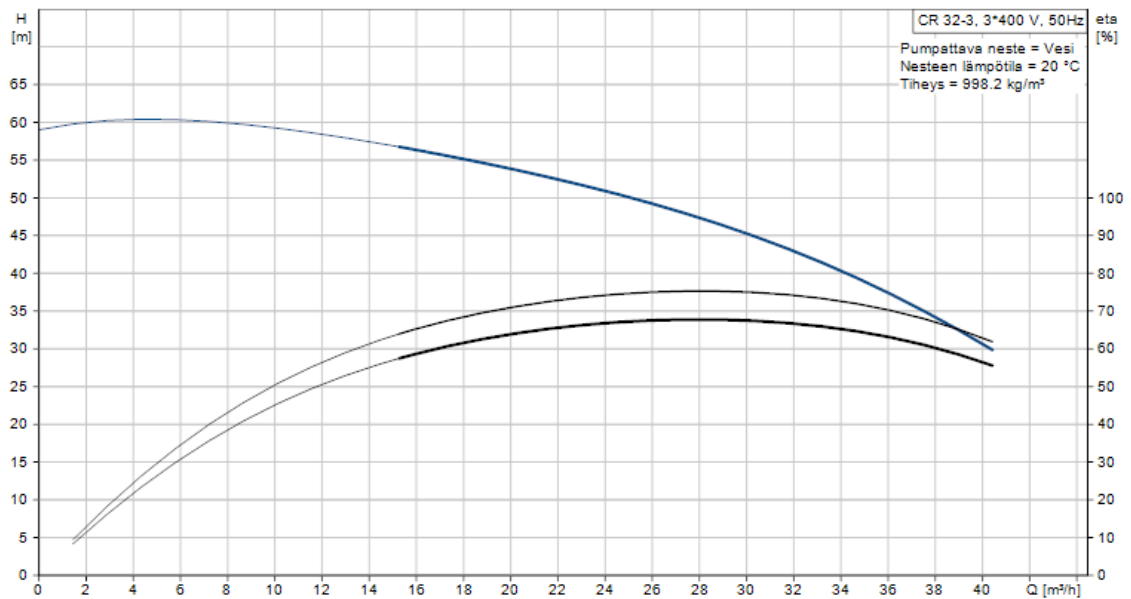
$$h_1 + \frac{p_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g} = h_2 + \frac{p_2}{\gamma} + \frac{v_2^2}{2g}. \quad (2)$$

Kun otetaan huomioon virtaushäviöt ja virtaukseen lisätty energia, saadaan laajennettu Bernoullin yhtälö (Young et al. 2007):

$$h_1 + \frac{p_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g} = h_2 + \frac{p_2}{\gamma} + \frac{v_2^2}{2g} + h_s - h_f, \quad (3)$$

missä  $h_f$  on virtaushäviö ja  $h_s$  virtaukseen lisätty energia, eli käytännössä pumppujen tuottama energia.

Nostokorkeus on korkeusero imutasosta painetasoon, eli se korkeusero, joka pumpun on nestettä nostettava. Systemin kokonaisnostokorkeus muodostuu staattisesta nostokorkeudesta, kitkahäviöistä, painehäviöistä ja nopeushäviöistä. Staattinen nostokorkeus on kokonaiskorkeusero, joka nesteen on voitettava. Normaalisti se määritetään korkeuserona nesteen pinnasta lähtöastiassa nesteen pintaan vastaanottavassa astiassa. Kitkanostokorkeus on nostokorkeus joka vaaditaan voittamaan putkissa ja venttiileissä aiheutuvat virtauksen kitkahäviöt. Painenostokorkeus on nostokorkeus joka vaaditaan voittamaan vastaanottavan systeemin vastapaine. Nopeusnostokorkeus on nesteen energia, joka on seurausta sen liikkeestä tietyllä nopeudella. (Volk 2005)



Kuva 1. Esimerkki pumpun tuotto- ja hyötysuhdekäyrästä (Grundfos 2015)

Pumpun tuoton ja nostokorkeuden suhdetta voidaan tarkastella pumpun ominaiskäyrän avulla (kuva 1). Ominaiskäyrien x-akselilla on pumpun tuottama virtaama ja y-akselilla nostokorkeus tai hyötysuhde. Tuottokäyrä kertoo kuinka pumpun nostokorkeus muuttuu virtaaman funktiona ja hyötysuhdekäyrä hyötysuhteen muuttumisesta virtaaman funktiona. Pumpun toimintapiste on pumpun ja systeemin ominaiskäyrien leikkauspisteessä. Systeemin ominaiskäyrä kuvaa sitä, kuinka häviöt kasvavat putkisysteemissä virtaaman

kasvaessa. Putkistossa tapahtuvat kitka- ja muut häviöt lisätään systeemin staattiseen nostokorkeuteen. Pumpun tuottokäyrän ja systeemin ominaiskäyrän leikkauspiste määrittää pumpun ja prosessin toimintapisteen. Systeemin häviöiden muuttuessa toimintapiste liikkuu pumpun toiminta-alueella vasteena häviöiden muutokselle.

Pumpun virtaukseen lisäämä energia aikayksikössä eli pumpun vaatima teho lasketaan seuraavasti:

$$P = \rho \cdot g \cdot Q \cdot H, \quad (4)$$

missä  $P$  on teho.

Pumpun hyötysuhde riippuu pumppauksessa tapahtuvista häviöistä. Hyötysuhde on pumpun tuottaman ja pumpun ottaman tehon suhde:

$$\eta_{pumppu} = \frac{P_{out}}{P_{in}}. \quad (5)$$

Pumpussa tapahtuu hydraulisia häviöitä, jotka johtuvat juoksupyörän sisäisistä häviöistä ja nesteen jatkuvista suunnanmuutoksista sen liikkeessa pumpussa. Tilavuushäviötä tapahtuu, kun pumpattavaa nestettä vuotaa pumpun painepuolelta imupuolelle. Pumpun mekaaniset häviöt johtuvat pumpun liikkuvien osien osumisesta toisiinsa. Myös juoksupyörän pyörimisestä hyvin lähellä pumpun koteloa syntyy eräänlaisia kitkahäviöitä. Pumpun häviöiden merkitys vaihtelee pumpputyypin välillä. Keskipakopumppujen hyötysuhteet voivat vaihdella suuresti, alle 30 %:sta yli 90 %:in. (Volk 2005)

Pumppukokonaisuuteen kuuluu pumpun lisäksi pumppua pyörittävä sähkömoottori sekä mahdollinen taajuusmuuttaja. Taajuusmuuttaja on laite, joka muuttaa pumpun moottorin pyörimisnopeutta. Sen avulla pumppujen tuottoa voidaan säätää portaattomasti. Pumpun tuoton ja tehon muuttumista pyörimisnopeuden muuttuessa voidaan tarkastella affiniteettisääntöjen avulla. Affiniteettisääntöt perustuvat siihen, että pumpun ominaisnopeus ei muutu. Siten, jos pumpun suorituskyky tietyllä nopeudella ja juoksupyörän halkaisijalla tunnetaan, voidaan päätellä saman pumpun suorituskyky nopeuden tai juoksupyörän halkaisijan muuttuessa. Affiniteettisääntöjen mukaan, kun juoksupyörän halkaisija on vakio, niin seuraavat yhtälöt pätevät:

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{n_1}{n_2} \quad \frac{H_1}{H_2} = \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2 \quad \frac{P_1}{P_2} = \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^3, \quad (6)$$

missä  $n$  on pyörimisnopeus (Volk 2005). Affiniteettisääntöjen perusteella voidaan siis todeta, että taajuuden muutos on sama kuin kierrosnopeuden muutos.

### 2.1.2 Kitkahäviöt

Kun vesi virtaa putkessa tapahtuu kitkahäviötä  $h_f$ , joka aiheutuu putken ja veden välistä kitkasta sekä veden viskositeetista. Yleinen kitkahäviökaava eli Darcy–Weisbachin yhtälö putken ollessa täysi:

$$h_f = f \cdot \frac{L}{d} \cdot \frac{v^2}{2g}, \quad (7)$$

missä  $f$  on kitkahäviökerroin,  $L$  putken pituus ja  $d$  putken halkaisija. Darcy–Weisbachin mukaan virtaushäviö putkessa on siis suoraan verrannollinen virtauksen kineettiseen energiaan ja putken pituuteen ja kääntäen verrannollisesti putken halkaisijaan. (Simon 1976) Darcy–Weisbachin yhtälö ottaa aina huomioon putken karkeuteen liittyvän kertoimen  $f$ , joka riippuu Reynoldsin luvusta ja putken suhteellisesta karkeudesta. Reynoldsin luku on yksikötön termi, joka ilmaisee virtauksen sisäenergian ja viskositeetista johtuvan, virtauksen liikettä hidastavan voiman suhteen. Reynoldsin luku lasketaan seuraavasti:

$$Re = \frac{\rho dv}{\mu}, \quad (8)$$

missä  $\rho$  on nesteen tiheys ja  $\mu$  viskositeetti. (Simon 1976) Nesteen virtaus on joko laminaarisesta tai turbulენტista. Laminaarisessa virtauksessa partikkelit liikkuvat suoraviivaisesti omia liikeratojaan pitkin, turbulენტisessa nestepartikkelit liikkuvat sattumanvaraisesti sekoittuen toisiinsa. Darcy–Weisbachin yhtälössä esiintyvä kitkahäviökerroin  $f$  voidaan laminaarisessa virtauksessa laskea suoraan seuraavalla yhtälöllä (Simon 1976):

$$f = \frac{64}{Re}. \quad (9)$$

Putkivirtaus vesijohtoverkostossa on turbulენტista. Turbulენტiselle virtaukselle on olemassa nomogrammeja  $f$ -kertoimen määrittämiseksi. Turbulენტisen virtauksen alue jakaantuu hydraulisesti sileään alueeseen, hydraulisesti karkeaan alueeseen ja siirtymäalueeseen. Turbulენტiselle virtaukselle kitkahäviökerroin  $f$  voidaan laskea Colebrook–White-yhtälöllä seuraavasti:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left( \frac{k}{3,7d} + \frac{2,51}{Re\sqrt{f}} \right), \quad (10)$$

missä  $k$  on putken karkeus (Fox & McDonald 1994). Colebrook–White- yhtälön ratkaiseminen on hankalaa, joten yleensä ratkaisemiseen käytetään yhtälön graafista muotoa Moodyn diagrammia. Toinen vaihtoehto kitkahäviökertoimen  $f$  selvittämiseksi on Swamee–Jain-yhtälö, joka on huomattavasti yksinkertaisempi ratkaista kuin Colebrook–White (Walski et al. 2003):

$$f = \frac{1,325}{\left[ \ln\left( \frac{k}{3,7 \cdot d} + \frac{5,74}{Re^{0,9}} \right) \right]^2} . \quad (11)$$

Kitkahäviöt putkivirtauksessa voidaan laskea myös kokeellisella Hazen–Williamsin kaavalla:

$$h_f = \frac{C_f L}{C^{1,852} d^{4,87}} Q^{1,852}, \quad (12)$$

missä  $C$  on Hazen–Williamsin kerroin ja  $C_f$  yksikönmuunnoskerroin. Hazen–Williamsin kerroin on dimensioton luku, joka riippuu putkimateriaalista ja sen iästä. Ajan myötä putki karkeutuu, jolloin Hazen–Williamsin kertoimen lukuarvo kasvaa. Hazen–Williamsin kaavaa käytetään tyypillisesti Yhdysvalloissa, Euroopassa taas Darcy–Weisbachin käyttö on yleisempää. (Walski et al. 2003)

## 2.2 Vesijohtoverkoston mallinnus

Verkostomallinnuksen avulla todellisen vesijohtoverkoston toimintaa voidaan tutkia matemaattisesti. Koska mallinnettava vedenjakelujärjestelmä on tavallisesti hyvin laaja sisältäen tuhansia putkia ja solmuja ja verkostossa on paljon silmukoita, ei mallia voida ratkaista analyttisessä muodossa, vaan mallin ratkaisu vaatii numeeristen menetelmien käyttöä. Käytännössä yhtään suurempien mallien ratkaiseminen on lähes mahdotonta käsin, ja sen vuoksi mallinnusohjelmistot ovat käyttökelpoisia työkaluja verkostojen toiminnan tutkimiseksi. (Walski et al. 2003)

Vesijohtoverkoston mallinnusta voidaan soveltaa esimerkiksi pitkän aikavälin suunnitelmien tekemiseen, sammutusvesitarkasteluihin, energian käytön tutkimiseen ja verkostosuunnitteluun. Tässä työssä mallinnusta hyödynnetään vedenjakelujärjestelmän energiantaseen tutkimiseen. Vedenjakelujärjestelmämallissa on kahdenlaisia elementtejä: solmuja ja linkkejä. Solmut edustavat tietyissä pisteissä sijaitsevia kohteita kuten vedenkäyttäjiä, vesialtaita tai vesisäiliöitä ja linkit yhteyksiä solmujen välillä, kuten putkia, pumppuja tai venttiileitä. Mallilla voidaan simuloida järjestelmän toimintaa ja järjestelmän vastetta erilaisiin toimenpiteisiin. (Walski et al. 2003; Sunela & Puust 2015b)

Useimmat mallinnusohjelmat, myös tässä työssä käytettävä FCGnet, perustuvat Yhdysvaltain ympäristöministeriö EPA:n kehittämään EPANET-simulaattoriin. Verkostojen laskenta EPANET:issä perustuu Todinin ja Pilatin kehittämään gradienttimenetelmään. Siinä algoritmi ratkaisee iteratiivisesti matriisisysteemiä ja antaa ratkaistut korjaustermit putkien virtaamille ja solmujen nostokorkeuksille jokaisen iteraation jälkeen. Mallille, jossa on  $n$  putkea ja  $m$  solmua pätee:

$$A\bar{x} = \bar{b}, \quad (13)$$

missä

$$A = \begin{bmatrix} kA_{11} & A_{12} \\ A_{21} & 0 \end{bmatrix}, \quad (14)$$

$$\bar{x} = [dQ_1 \quad \dots \quad dQ_n \quad dH_1 \quad \dots \quad dH_m]^T, \quad (15)$$

$$\bar{b} = [-dE_1 \quad \dots \quad dE_n \quad dq_1 \quad \dots \quad dq_m]^T. \quad (16)$$

$A_{11}$  on  $n$  neliömatriisin  $n$  diagonaali, jossa diagonaalelementit ovat derivaattoja virtauksesta  $kK|Q|^{k-1}$ . Tässä  $K$  ja  $k$  riippuvat yhtälöstä, jota käytetään virtaushäviön laskentaan. Tyypillisesti käytetään arvoa 1,852.  $A_{21}$  on kytkeytymismatriisi. Se on  $m$  neliömatriisin  $m$  diagonaali, missä jokainen elementti  $a_{ij}$  on 1 jos solmu  $i$  on suoraan yhdistetty solmuun  $j$  putken avulla ja muutoin 0.  $a_{ij}$ :n arvo on positiivinen, jos solmu on putken loppusolmu ja negatiivinen jos solmu on putken alkusolmu.  $A_{12}$  on  $A_{21}$ :n transpoosi.  $dQ_i$  on korjaustermi virtaukselle putkessa  $i$  ja  $dH_j$  korjaustermi painekorkeudelle solmussa  $j$ .  $dq_k$  on tulevan ja lähtevän virtauksen erotus solmussa  $k$  ja  $dE_l$  putken taaseen virhe, joka lasketaan käyttäen yhtälöä  $K_l Q_l^k + H_2 - H_1$ , missä  $K_l Q_l^k$  on painehäviö putkessa  $l$ ,  $H_2$  painekorkeus alapuolisessa solmussa ja  $H_1$  painekorkeus yläpuolisessa solmussa.  $k$  ja  $K$  ovat samat mitä käytettiin yhtälössä. (Todini & Pilati 1988, Sunela 2010 mukaan)

$nA_{11}$ ,  $A_{21}$ ,  $A_{12}$  ja 0-matriisien tulos yhdistettynä on systeemin jakobiaanimatriisi. Alkuarvaus putkivirtauksille ja painekorkeuksille tarvitaan, mutta toisin kuin Hardy-Crossmenetelmässä, arvojen ei tarvitse olla tasapainossa tai lähellä loppuratkaisua. (Todini & Pilati 1988, Sunela 2010 mukaan)

Vedenjakelujärjestelmämalli rakennetaan verkostokartan pohjalta. Mallinnussovelluksissa voidaan käyttää taustakarttaa, jolloin verkostokartta voidaan näyttää karttanäkymässä ja verkosto mallintaa suoraan sen päälle. Järjestelmämallin rakentamiseksi tarvittavia tietoja ovat ainakin komponenttien sijainnit, putkikoot ja -materiaalit, putkien linjaus, painepiirirajat, komponenttien korkeusasemat ja vesisäiliöiden ominaisuudet. Mallin käyttötarkoituksesta riippuu, kuinka yksityiskohtaisesti verkosto on tarpeen mallintaa ja voidaanko joitakin verkoston osia jättää pois mallista. (Walski et al. 2003) Vedenjakelujärjestelmän energiataseen tutkimiseksi mallin on oltava täydellinen, kun taas jotkin yksinkertaisemmat verkoston toiminnallisuustarkastelut eivät vaadi mallilta yhtä suurta tarkkuutta. Kun verkostomalli on valmis, se tulisi kalibroida, jotta tulokset vastaavat todellisuutta. Mallin käyttäytymistä verrataan esimerkiksi todellisesta järjestelmästä saatuun automaatiodataan, ja mallia ja sen parametreja muutetaan kunnes mallin toiminta vastaa käyttötarkoitukseen nähden tarpeeksi hyvin todellisuutta. (Walski et al. 2003)

Kun verkostomalli on rakennettu ja saatu toimivaksi, sitä voidaan käyttää simulointiin. Simuloinnissa todellisen järjestelmän käyttäytymistä approksimoidaan mallin avulla. Simulaatio voi olla joko stationaarista tai aikajatkuvaa. Stationaarisessa simuloinnissa järjestelmän tilaa tutkitaan tietyllä ajanhetkellä eivätkä hydrauliset parametrit muutu simuloinnin aikana. Simulointituloksena saadaan muuttujien arvot tasapainotilanteessa. Aikajatkuvassa simuloinnissa jokaisella simuloinnin aika-askeleella ratkaistaan uusi stationaaritila käyttäen edellisen aika-askeleen tuloksia lähtöarvoina. Stationaarisimulaatio voi olla käyttökelpoinen esimerkiksi mitoitustehtävissä, joissa tutkitaan huippuuntia. Kuitenkin usein tarvitaan tietoa siitä, miten mallin muuttujat muuttuvat ajan suhteen, jolloin tarvitaan aikajatkuvaa simulointia. (Walski et al. 2003)

## 2.3 Energiataseanalyysi

Energiataseanalyysin avulla voidaan tutkia vedenjakelujärjestelmän energiankäyttöä laskennallisesti. Vedenjakelujärjestelmän energiataase ottaa huomioon kaikki tekijät, joista energiaa tulee järjestelmään ja mihin järjestelmään tuotu energia käytetään. Energiataseen laatiminen edellyttää, että järjestelmästä on laadittu kattava malli. (Cabrera et al. 2010)

Cabrera et al. (2010) kehittämässä menetelmässä lähdetään liikkeelle integraalienergiayhtälöstä, jota sovelletaan systeemiin, jossa tunnettu määrä vettä ja energiaa virtaa systeemin rajojen läpi. (Cabrera et al. 2010) Vedenjakelujärjestelmän tapauksessa systeemiä rajaavat tyypillisesti vesilähde, säiliöt ja pumput (Rossman 2000). Integraalienergiayhtälö on seuraava: (Cabrera et al. 2010)

$$\frac{dE}{dt} = \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial W}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial t} \iiint_{CV} e\rho dV + \iint_{CS} e\rho(\vec{v} \cdot d\vec{A}). \quad (17)$$

Tässä  $dE/dt$  esittää energian siirtymistä aikayksikössä, joka on toisin sanoen lämmönsiirron  $\partial Q/\partial t$  ja ja työn  $\partial W/\partial t$  summa.  $e$  on kokonaisenergia massayksikköä kohden ja  $\rho$  nesteen tiheys. Tämä yhtälö voidaan esittää energiataasesovellukseen sopivammassa muodossa seuraavasti:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial W_{shaft}}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial t} \iiint_{CV} (gz + u + \frac{v^2}{2})\rho dV + \iint_{CS} (\frac{P}{\rho} + gz + u + \frac{v^2}{2})\rho(\vec{v} \cdot d\vec{A}), \quad (18)$$

missä  $z$  on verkoston solmun korkeusasema ja  $u$  veden sisäenergia.

Yhtälöä 14 voidaan yksinkertaistaa, kun oletetaan, että vesi on kokoon puristumatonta eli  $\rho$  on vakio, lämmönsiirto systeemin rajojen läpi on nolla, akseliteho on pumppujen tuottamaa, kineettistä termiä  $\frac{v^2}{2}$  ei oteta huomioon ja virtaus on yhtenäinen systeemin rajoilla. Näiden oletusten puitteissa yhtälö saa muodon

$$\begin{aligned} \sum_i^{n_P} \gamma Q_{Pi} H_{Pi} &= \rho g \frac{\partial}{\partial t} \iiint_{CV} z dV + \rho \sum_{outlets} Q_{Oi} \left[ \frac{P_{Oi}}{\rho} + g z_{Oi} + u_{Oi} \right] - \\ &\rho \sum_{inlets} Q_{Ii} \left[ \frac{P_{Ii}}{\rho} + g z_{Ii} + u_{Ii} \right]. \end{aligned} \quad (19)$$

Systemille, jonne syötetään vettä  $n_N$  vesilähteestä, joka palvelee  $n$  vedenjakeluosolmaa  $n_P$  systeemiin energiaa tuovan pumppausaseman ja  $n_C$  säiliön avulla, saadaan:

$$\begin{aligned} P_0 &= \sum_i^{n_N} \gamma Q_{Ni} H_{Ni} + \sum_i^{n_P} \gamma Q_{Pi} H_{Pi} = \sum_i^n \gamma Q_{Oi} H_{Oi} + \rho \left[ \sum_i^n Q_{Oi} u_{Oi} - \right. \\ &\left. \sum_i^{n_N} Q_{Ni} u_{Ni} \right] + \sum_{i=1}^{n_C} \gamma \frac{\partial}{\partial t} \iiint_{VC} z_i dV. \end{aligned} \quad (20)$$

Yhtälön vasemmalla puolella on siis järjestelmään toimitettu energia ja oikealla puolella järjestelmässä käytetty energia.  $P_0$  on järjestelmään toimitettu kokonaisenergia, joka koostuu vesilähteiden ja säiliöiden toimittamasta potentiaalienergiasta  $P_N = \sum_i^{n_N} \gamma Q_{Ni} H_{Ni}$  ja pumppujen tuottamasta hydraulisesta energiasta  $P_P = \sum_i^{n_P} \gamma Q_{Pi} H_{Pi}$ . Termi  $\sum_i^n \gamma Q_{Oi} H_{Oi}$  on verkostosta poistuva energia, eli vedenkäyttäjille toimitetun energian ja vuotojen kautta hävitetyn energian summa. Termi  $\rho \left[ \sum_i^n Q_{Oi} u_{Oi} - \sum_i^{n_N} Q_{Ni} u_{Ni} \right]$  on veden sisäenergian muutos ajan suhteen. Koska vedenjakelujärjestelmän tapauksessa lämmönsiirtoa ei tapahdu, sisäenergian kasvaminen ajan suhteen on yhtä kuin kitkahäviöt. Termi  $\sum_{i=1}^{n_C} \gamma \frac{\partial}{\partial t} \iiint_{VC} z_i dV = \sum_i^{n_C} \pm P_{Ci} = \pm P_C$  on järjestelmään kuuluvien vesisäiliöiden potentiaalienergian muutos ajan suhteen. Sen arvo voi olla positiivinen tai negatiivinen. (Cabrera et al. 2010)

Tässä työssä käytettävässä sovelluksessa vesisäiliöihin varastoitunut energia käsitetään yhtenä energiaa verkostossa käyttävänä tekijänä, ja se lasketaan kuten vuotoenergia, mutta varastoenergian tapauksessa  $Q$  on virtaus vesisäiliöön. Varastoenergian arvo on negatiivinen siis aina kun vettä johdetaan säiliöstä pois. Edellä kuvattu energiataseen esitys voidaan lopulta esittää hyvin yksinkertaisessa muodossa seuraavasti:

$$P_N + P_P = P_U + P_L + P_F, \quad (21)$$

missä  $P_U$  on vedenkäyttäjille toimitettu energia,  $P_L$  vuotojen mukana poistuva energia ja  $P_F$  kitkahäviöiden mukana poistuva energia. Eli verkostoon toimitettu energia on yhtä kuin vedenkäyttäjille toimitettu energia ja häviöt. Energiatase tarkastelujaksolla saadaan integroimalla kaava 16 tarkastelujakson yli. Kaavasta 17 on jätetty pois Cabreran (2010) käyttämä kompensatiotermi vesisäiliön potentiaalienergialle, sillä tämän työn energiatasesovelluksessa vesisäiliöön virtaavan tai sieltä poistuvan virtaaman energia sisältyy verkostossa käytettyyn energiaan.

Järjestelmään tuleva energia jakaantuu siis verkostoon tulevaan potentiaalienergiaan ja pumppujen tuottaman hydrauliseen energiaan. Järjestelmään tulevaan energiaan kuuluu myös energia, joka painevajauksesta johtuen jää toimittamatta järjestelmään eli energia-vajaus. Sitä esiintyy, kun jossakin järjestelmän solmussa vallitseva paine on alhaisempi,

kuin solmuille asetettu vaadittava painetaso. Järjestelmässä käytettävä energia jakaantuu viiteen osa-alueeseen: vaadittu energia, ylijäämäenergia, varastoenergia, kitkaenergia ja vuotoenergia. Painepiiritason tarkasteluissa otetaan huomioon myös lähtävä potentiaalienergia, joka siirtyy painepiiristä toiseen. (Sunela & Puust 2015b)

Tähän asti on käsitelty hydraulista energiankäyttöä vedenjakelujärjestelmässä. Jotta saataisiin myös pumppauksessa tapahtuvat häviöt otettua huomioon, on tarkasteltava sähköenergiankäyttöä. Pumpun hydraulisen energian ja moottorin sekä mahdollisen taajuusmuuttajan todellisuudessa käyttämä sähköenergia saadaan laskettua käyttämällä Sunelan & Puustin (2014) kehittämää menetelmää.

Jokaiselle pumpulle annetaan tuottokäyrä, hyötysuhdekäyrä, sallittu minimi- ja maksimitaajuus, moottorin nimellisteho ja moottorille joko IE tehokkuusluokka ja napaluku tai moottorin hyötysuhde 100 % ja 75 % kuormalla. Pumpun ominaiskäyrien perusteella virtaama ja nostokorkeus eri nopeuksilla lasketaan käyttämällä affiniteettisääntöjä. Pumpun hydraulinen hyötysuhde eri pyörimisnopeuksilla lasketaan yhtälöllä (Sunela & Puust 2014)

$$\eta_P = \eta_2 = 1 - (1 - \eta_1) \cdot \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^{0,1} = 1 - (1 - \eta_1) \cdot \left(\frac{1}{\omega}\right)^{0,1}, \quad (22)$$

missä  $\eta_P$  on pumpun hydraulinen hyötysuhde pumpun ominaisnopeudella ja  $\eta_2$  pumpun hydraulinen hyötysuhde muutetulla pyörimisnopeudella. Hydraulisen tehon ollessa  $P_H = \rho g Q H$ , on pumpun akseliteho

$$P_S = \frac{P_H}{\eta_P}, \quad (23)$$

missä  $P_S$  on pumpun akseliteho hyötysuhteella  $\eta_P$ . Moottorin kuorma on

$$L_M = \frac{P_S}{\frac{P_{NOM}}{\eta_{M,100}}}, \quad (24)$$

missä  $L_M$  on moottorin kuorma,  $P_{NOM}$  moottorin nimellisteho ja  $\eta_{100}$  moottorin hyötysuhde täydellä kuormalla. Kun tunnetaan moottorin hyötysuhde täydellä ja 75 % kuormalla, voidaan laskea moottorin hyötysuhde millä tahansa kuormalla käyttämällä seuraavaa yhtälöä:

$$v_L = \frac{\left(\frac{1}{\eta_{M,100}} - 1\right) - 0,75 \cdot \left(\frac{1}{\eta_{M,75}} - 1\right)}{0,4375}, \quad (25)$$

$$v_0 = \left(\frac{1}{\eta_{M,100}} - 1\right) - v_L, \quad (26)$$

$$\eta_M = \frac{1}{1 + \frac{v_0}{L} + v_L \cdot L}, \quad (27)$$

missä  $v_L$  ja  $v_0$  ovat empiirisesti saatuja suhteita,  $\eta_{,75}$  moottorin hyötysuhde 75 % kuormalla ja  $\eta_M$  moottorin hyötysuhde laskettavalla kuormalla. Taajuusmuuttajan kuorma lasketaan samoin kuin moottorin kuorma. Moottorin akselitehoksi tulee siis

$$P_S = \frac{P_H}{\eta_P} \quad (28)$$

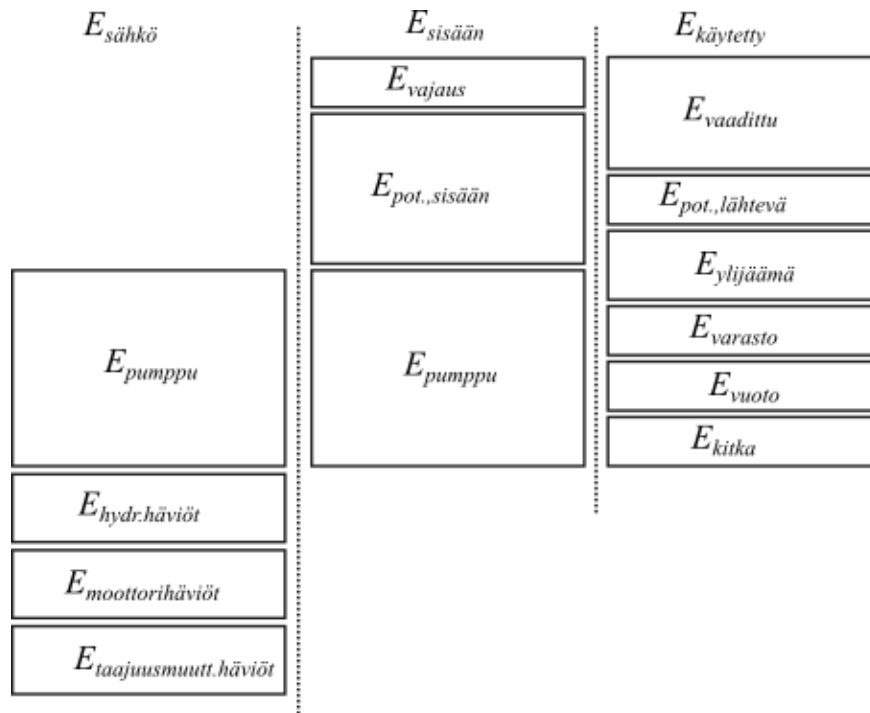
ja pumppukokonaisuuden sähkötehoksi

$$P_E = \frac{P_M}{\eta_{VSD}}, \quad (29)$$

missä  $P_E$  on pumppukokonaisuuden sähköteho,  $P_M$  moottorin teho ja  $\eta_{VSD}$  taajuusmuuttajan hyötysuhde. Lopulta koko pumppukokonaisuuden hyötysuhteeksi saadaan

$$\eta_{TOT} = \frac{P_H}{P_E} = \eta_P \cdot \eta_M \cdot \eta_{VSD}. \quad (30)$$

Eli pumppukokonaisuuden hyötysuhde on pumpun, moottorin ja taajuusmuuttajan hyötysuhteiden tulo. Energiataseen komponentit on vielä koottu kuvaan 2.



Kuva 2. Energiataseen komponentit (Sunela & Puust 2015b)

## 2.4 Verkostojen energiatehokkuuden mittareita

Tässä luvussa esitellään kirjallisuudessa esiteltyjä energiatehokkuuden tunnuslukuja. Ominaisenergiankäyttö kertoo kuinka paljon vedenjakelujärjestelmässä käytetään energiaa vesikuutiota kohti (Sunela & Puust 2015b):

$$E_{ominais} = \frac{E_{tot,verkostoon}}{Q_{tot,verkostoon}}. \quad (31)$$

Ominais sähkökäyttö kertoo kuinka paljon sähköenergiaa verkostossa käytetään vesikuutiota kohti (Sunela & Puust 2015b):

$$E_{sähkö,ominais} = \frac{E_{sähkö,verkostoon}}{Q_{tot,verkostoon}}. \quad (32)$$

Cabrera et al. (2010) esitti viisi tunnuslukua  $I_1 - I_5$  vedenjakelujärjestelmien energiatehokkuuden arvioimiseksi (kaavat 27–31).

$$I_1 = \frac{E_{sisään}(t_p)}{\gamma \sum_{i=1}^n \bar{v}_{u,i}(t_p) \cdot h_{min,i}} \quad (33)$$

$$I_2 = \frac{E_U(t_p)}{E_{sisään}(t_p)} \quad (34)$$

$$I_3 = \frac{E_F(t_p)}{E_{sisään}(t_p)} \quad (35)$$

$$I_4 = E_L(t_p) + E_F(t_p) - \frac{E'_F(t_p)}{E_{sisään}(t_p)} \quad (36)$$

$$I_5 = \frac{E_U(t_p)}{\gamma \sum_{i=1}^n \bar{v}_{u,i}(t_p) \cdot h_{min,i}} \quad (37)$$

Ylijäämäenergian tunnusluku  $I_1$  on verkostoon todellisuudessa syötetyn energian ja verkostossa minimissään tarvittavan energian suhde. Verkoston energiatehokkuus  $I_2$  kertoo kuinka suuri osa verkostoon syötetystä energiasta on käyttökelpoista. Kitkahäviöihin käytetty energia  $I_3$  edustaa verkoston hydraulista kapasiteettia. Vuotoenergia  $I_4$  kertoo vuodoista johtuvan energiahävikin. Viimeisenä  $I_5$  on käyttäjille toimitetun ja minimissään vaaditun energian suhde. Jos  $I_5$  on alle 1, keskimääräiset painetasot ovat liian alhaisia ja alle vaatimusten. Jos  $I_5$  on yli 1, painetasot ovat palvelutason vaatimusten yläpuolella. (Cabrera et al. 2010)

Bolognesi et al. (2014) ehdottaa energiatehokkuuden arvioimista välttämättömän minimienergian  $UME$  (Unavoidable Minimum Energy) pohjalta. Se ottaa huomioon verkoston rakenteen ja pituuden sekä putkien koot ja solmujen korkeusasemat.  $UME$  lasketaan jokaiselle laitteelle ja sitä varten on määriteltävä vertailunostokorkeus  $H_{ref}$ .  $H_{ref}$  on miniminostokorkeus, joka on toimitettava jokaisen pumpun jälkeiseen verkoston osaan, jotta koko verkostolle saadaan vaaditulle palvelutasolle vaadittava paine olettaen, että vuotoja ei ole. Tällöin:

$$UME = \gamma \cdot W \cdot (H_{ref} - H_{ups}) / 3600000, \quad (38)$$

missä  $UME$  on välttämätön minimienergia pumpulla [kWh],  $W$  on pumpun nostama kokonaistilavuus [ $m^3$ ] ja  $H_{ups}$  on keskimääräinen hydraulinen nostokorkeus ennen pumppua. (Bolognesi et al. 2014)

Tältä pohjalta Bolognesi et al. (2014) esittää energiatehokkuuden mittariksi energiatehokkuusindikaattoria  $EEI$  (Energy Efficiency Indicator), joka on välttämättömän minimienergian ja todellisuudessa käytetyn energian  $E_{cons}$  suhde:

$$EEI = \frac{UME}{E_{cons}} . \quad (39)$$

Usein verkostojen energiankäytön tunnuslukuna käytetään ominaisenergiankäyttöä, eli kuinka paljon energiaa käytetään verkostossa vesikuutiota kohti. Ominaisenergiankäyttö kertoo kuitenkin vain energiankäytön määrästä. Verkoston energiatehokkuuden arvioinnissa ja etenkin energiansäästöpotentiaalın selvittämisessä on myös tärkeää tietää mihin energia verkostossa käytetään.

Sunela & Puust (2015b) mukaan hyödyllisiä mittareita ovat systeemin hydraulinen hyötysuhde ja sähköhyötysuhde:

$$\eta_{hydraulinen} = \frac{E_{vaadittu}}{E_{input}} \quad (40)$$

$$\eta_{sähkö} = \frac{E_{vaadittu}}{E_{sähkö}} \quad (41)$$

Hyötysuhteet antavat kuvan siitä, kuinka suuri osa verkostoon syötetystä hydraulisesta tai sähköenergiasta tyydyttää todellista tehontarvetta.

## 2.5 Energiataseen sovellukset

Cabrera et al. (2010) sovelsi kehittämänsä energiatasetelaskentaa kuvitteelliselle verkostolle havainnollistaakseen menetelmän käyttöä. Tämän kuvitteellisen verkoston pohjalta laskelmia ovat tehneet myös Bolognesi et al. (2014) ja Hashemi et al. (2015). Todellisille vedenjakelujärjestelmille energiatasetarkasteluja ovat tehneet Hernandez et al. (2012), Cabrera et al. (2014), Mamade et al. (2015) ja Scanlan & Fillion (2015)

Hernandez et al. (2012) sovelsi Cabrera et al. (2010) kehittämää menetelmää espanjalaisen Denian kaupungin vedenjakelujärjestelmään, ja käytti energiatehokkuuden mittareina Cabrera et al. (2010) esittämiä tunnuslukuja. Energiankäyttöä tutkittiin vuorokauden ja kuukauden mittaisilla tarkastelujaksoilla sekä kokonaisvedenkäytön ja laskutetun vedenkäytön (vedenkäyttö ilman vuotoja) osalta. Tutkitun verkoston tunnusluvut ovat heikkoja (taulukko 1): ylijäämäenergian arvo 5,52, verkoston tehokkuus 33 %, kitkaenergiaa 47 % ja vuotoenergiaa 25 %. Scanlan & Fillion (2015) tutki kolmen kanadalaisen vedenjakelujärjestelmän energiatasetta käyttäen myös Cabreran (2010) menetelmää

ja tunnuslukuja. Menetelmää on myös sovellettu kastelujärjestelmän energiataseen tutkimiseksi (Cabrera et al. 2014).

Mamade et al. (2015) tutki portugalilaisen Águas do Sadon vedenjakelujärjestelmän energiatasetta vuositason yksinkertaistetulla menetelmällä ilman mallinnusta. Ylijäämäenergian ja kitkahäviöiden laskeminen on kuitenkin mahdotonta ilman mallinnusta, joten niiden ja niiden pohjalta laskettavien tunnuslukujen tulokset puuttuvat. Mamaden käyttämässä menetelmässä koko järjestelmälle tehdyn yksinkertaistetun energiataseanalyysin tulosten pohjalta valittiin energiankäytöltään kriittisimmät painepiirit, joihin selvitettiin puuttuvat energiaa käyttävät tekijät mallintamalla.

**Taulukko 1.** Energiataseen tuloksia aiemmista sovelluksista (Hernández et al. 2012; Mamade et al. 2015; Scanlan & Filion 2015)

	<b>Denia (Hernandez et al. (2012))</b>	<b>Systeemi A (Scanlan &amp; Filion 2015)</b>	<b>Systeemi B (Scanlan &amp; Filion 2015)</b>	<b>Systeemi C (Scanlan &amp; Filion 2015)</b>	<b>Águas do Sado (Mamade et al. 2015)</b>
Vedenkäyttäjät (kpl)	100 000	16 000	12 000	49 000	62 306
Vedenkäyttö (m <sup>3</sup> /d)	42 272	5510	6270	38 900	-
Kokonaisenergia järjestelmään (kWh/d)	13 699,9	983	1076	6143	17 141*
Ominaisenergiankäyttö	0,32	0,18	0,17	0,15	-
Ylijäämäenergian tunnusluku $I_1$	5,52	2,03	2,44	2,28	-
Verkoston tehokkuus $I_2$ (%)	33	67	58	61	-
Kitkaenergia (%)	47	9	22	15	-
Vuotoenergia $I_4$ (%)	25	23	24	34	21
Vaatimustason noudattaminen	1,83	1,35	1,40	1,38	-

\* Laskettu vuosittaisesta arvosta.

Energiataseetta voidaan soveltaa reaaliaikaisesti online-simuloinnissa, jolloin käyttäjä voi nähdä kuinka muutokset järjestelmän käytössä vaikuttavat järjestelmän energiatehokkuuteen. Tampereen vedelle toteutetussa online-simulointijärjestelmässä energiataseen tulokset tallennetaan joka tunnilta painepiireittäin. Jatkossa online-järjestelmä optimoi seuraavan 24 tunnin pumppauksen ja vedentuotannon ja tähän voidaan tulevaisuudessa yhdistää myös reaaliaikaisen energiataseen pohjalta optimoitu säätötapa. (Sunela & Puust 2015b)

## 2.6 Vedenjakelujärjestelmän energiatehokkuuden parantaminen

Vedenjakelujärjestelmässä pumppaukset käyttävät sähköenergiaa. Sähköverkosta järjestelmään otetusta energiasta osa muuttuu pumppujen tuottamaksi hydrauliseksi energiaksi ja osa kuluu häviöihin. Energiaa voidaan siis säästää joko vähentämällä hydraulista energiaa eli laskemalla paineita, pienentämällä virtausta tai vaikuttamalla häviöihin.

### 2.6.1 Pumppauksen tehostaminen

Kaya et al (2008) mukaan pumppujen energiankäytöstä voidaan säästää 30 % paremmalla suunnittelulla ja pumppuvalinnoilla. Jo rakennettujen, toimivien pumppaamojen energiatehokkuutta tulisi tutkia aika ajoin mahdollisesti muuttuneiden tilanteiden varalta. Yleisiä syitä pumppujen väärään mitoittamiseen ovat vesimäärien muuttuminen suunnitteluajankohdan arvoista, verkostojen ominaisuuksien muuttuminen laajennusten tai supistusten vuoksi, pumppujen ylimitoitus tulevaisuuden varausten perusteella, pumppujen ominaisuuksien heikentyminen kulumisen seurauksena tai virheellinen taajuusmuuttajakäyttö. (Pulli 2009)

Pumppauksen energiankulutusta voidaan vähentää mitoittamalla pumput niin, että pumppun kapasiteetti  $Q$  on aina mahdollisimman matala (Vogelesang 2008). Tämä tarkoittaa siis sitä, että normaalissa toiminnassa pumppu toimisi aina mahdollisimman lähellä toimintapistettä eikä niin, että toimintapiste on jokin poikkeuksellinen maksimitilanne. Kuronen (2014) ehdottaa pumppujen mitoittamista kahden toimintapisteen mukaan: vaadittava huippupiste toimii reunaehtona mitoitukselle ja tavallinen toimintapiste optimoidaan energiatehokkuuden kannalta. Huippupisteen hyötysuhde ei ole niin tärkeä, vaan merkittävämpää on se millä hyötysuhteella toimitaan suurin osa ajasta. Taajuusmuuttajakäyttö, joka on jo varsin yleistä, on hyvä tapa säätää pumppun tuottoa energiatehokkaasti. Pumppun moottorin hyötysuhteeseen on myös syytä kiinnittää huomiota, sillä se vaikuttaa osaltaan pumppauksen hyötysuhteeseen (Kaya et al. 2008; Sunela & Puust 2015a).

Edullinen ja helpohko tapa energiatehokkuuden parantamiseen on muuttaa verkoston säätötapaa. Säätötavan muutos ei edellytä rakenteellisia muutoksia, joten se ei vaadi suuria investointeja. Säätötapaa muuttamalla voidaan säästää pumppauksessa energiaa pumppaamalla tarvittavat vesimäärät mahdollisimman tasaisesti. Tasainen pumppaus säästää energiaa, koska painehäviöt vähenevät on/off-käytön vähetessä ja virtauksen ollessa lähempänä keskimääräistä arvoa, vesimassan kiihdyttämisestä johtuvat energiämäärät vähenevät käynnistysten yhteydessä ja pumput voidaan mitoittaa toimimaan optimaalialueella. Kun hyödynnetään säiliötilavuutta tehokkaasti ja optimoidaan järjestelmän muiden pumppauslaitosten toimintaa, voidaan pumpata tasaisemmin. Ohjaustapana

kannattaa käyttää tällöin säiliön tavoitepintaa tai ennustemalleihin perustuvia periaatteita. (Pulli 2012)

Pumppauksen energiatehokkuutta voidaan myös huomattavasti parantaa puuttamalla uppopumpuilla tapahtuvaan pumppaukseen. Uppopumppuja pyörittävien märkäasenteisten sähkömoottorien hyötysuhteet ovat tavallisesti huomattavasti heikompia kuin kuiva-asenteisten. Energian säästämiseksi uppopumput kannattaisi vaihtaa kuiva-asenteisiin ja ottaa käyttöön uutta sähkömoottoritekniikkaa. (Kuronen 2014)

Taajuusmuuttajakäyttö, joka on varsin yleistä nykyään, on energiatehokas tapa säätää pumpun tuottoa. Taajuusmuuttajan käytöllä voidaan säästää jopa 50 % energiaa pumpusovelluksissa. Kun pumpun tuottoa säädetään muilla tavoilla, pumpun moottori käy koko ajan täydellä teholla ja virtausta kuristetaan. Tällöin pumppu tuottaa aina maksimimäärän, mutta kuristuksessa tämä energia hukataan kitkaenergiaksi. Taajuusmuuttajan avulla kierroslukua säädettäessä puolestaan moottori käy tarvittavalla nopeudella. (Tolvanen 2008) Taajuusmuuttajan käyttöä tulisi harkita tapauskohtaisesti, sillä taajuusmuuttajakäyttö saattaa joissain tilanteissa jopa lisätä energiantarvetta. Taajuusmuuttajan käytöstä saadaan eniten hyötyä järjestelmissä, joissa nostokorkeus muodostuu pelkästään dynaamisista häviöistä, kun taas järjestelmässä, jossa nostokorkeus muodostuu yksinomaan staattisesta korkeudesta, pumpun hyötysuhde vaihtelee voimakkaasti toimintapisteestä ja kierrosluvusta riippuen ollen usein huonolla alueella. (Pulli 2009)

Pumppauksen hyötysuhde riippuu pumpun, moottorin ja taajuusmuuttajan hyötysuhteista; pumppukokonaisuuden hyötysuhde on näiden kaikkien osien hyötysuhteiden tulo. Täten tulisi valita moottori ja taajuusmuuttaja, joiden hyötysuhteet ovat mahdollisimman hyvät. Normaalisti sähkömoottorit toimivat tehokkaimmin 75 % maksimikuormituksesta ja siitä ylöspäin. Usein kuitenkin valitaan tarpeettoman suuri sähkömoottori, jolloin ne toimivat tehottomasti ja huonolla hyötysuhteella. Oikean tehoisen sähkömoottorin valinnan lisäksi tärkeää on valita mahdollisimman korkealla hyötysuhteella toimiva sähkömoottori. (Kaya et al. 2008) Vaikka taajuusmuuttajan käyttö säästääkin energiaa, on sen hyötysuhde otettava myös huomioon pumppukokonaisuuden hyötysuhteen arvioinnissa. Taajuusmuuttajien kesken hyötysuhteet eivät vaihtelee suuresti (Aranto 2008).

## **2.6.2 Verkoston rakenteeseen liittyvät keinot energiatehokkuuden parantamiseen**

Verkostossa tapahtuvien kitkahäviöiden suuruuteen voidaan vaikuttaa putkimuutoksilla. Putkien uusiminen on kallista, mutta esimerkiksi saneerausten yhteydessä kannattaa tarkastella kitkahäviöiden suuruutta. Verkostosuunnittelu tähtää yleensä investointikustannusten minimointiin käyttökustannusten optimoinnin sijaan. Tämä voi johtaa alimitoitettuihin verkostoihin, mikä aiheuttaa kitkahäviöitä. (Nogueira Vilanova & Perrella Balestieri 2014)

Liian korkeat paineet verkostossa aiheuttavat ylijäämäenergiaa. Myös vuotojen määrä lisääntyy, kun paine kasvaa. Ylijäämäenergiaa voidaan vähentää laskemalla paineita verkostossa. Tämä on kuitenkin hankalaa, sillä verkoston painetasoon voidaan vaikuttaa merkittävästi vain suunnitteluvaiheessa ja valmiissa verkostossa olemassa olevan vesitornin pinta määrittelee verkoston painetason. Tornin pinnan laskemisella on mahdollista laskea paineita hieman. Pintaa ei kuitenkaan ole yleensä varaa laskea paljoa, sillä tornissa halutaan pitää vettä varalla häiriötilanteisiin varautumiseksi. (Kuronen 2014)

Alueilla, joilla korkeuserot ovat suuret, voidaan painetasoa laskea painepiirijaolla. Verkostot tulisi jakaa painepiireihin korkeuserojen mukaan. Matalammilla alueilla painetaso voitaisiin laskea alemman painetason verkostolle sopivaksi ja varustaa muut painepiirit paineenkorotuspumppeuksella. Painetasoa voidaan laskea myös pienen kulutuksen aikana. Tätä keinoa käytetään joskus vanhojen ja huonokuntoisten verkostojen vuoto määrän ja eliniän pidentämiseksi, mutta se tuottaa myös energiansäästöä. (Pulli 2009)

Vuotojen määrää voidaan koko verkoston painetason säätämisen lisäksi vähentää paineenalennuksilla. Paineen alentaminen vähentää olemassa olevia vuotoja, estää uusien vuotojen syntymistä ja vähentää lisäksi putkirikkoja. (Nogueira Vilanova & Perrella Balestieri 2014) Paineenalennusventtiilit tuhlaavat kuitenkin energiaa, sillä paineenalennusventtiileillä aiheutetaan tarkoituksella virtaushäviöitä paineen laskemiseksi. Tämä energia voitaisiinkin ottaa talteen laskemalla painetta venttiilin sijaan paineenalennusturbiinilla. (Nogueira Vilanova & Perrella Balestieri 2014; Pulli 2009) Käytäntö on kuitenkin harvinainen. Vaadittavan laitteiston ja asennuksen kustannusten lisäksi vastaan tulevat tekniset haasteet, kuten talteen otetun energian syöttö sähköverkkoon ja automaatio. Tämä on vielä melko vähän tutkittu energiansäästökeino vesihuoltoverkostoissa, mutta voisi olla kannattavaa suurilla paineenalennuksilla ja vesimäärillä. (Ramos et al. 2010, Kuronen 2014 mukaan)

## 3. MATERIAALIT JA MENETELMÄT

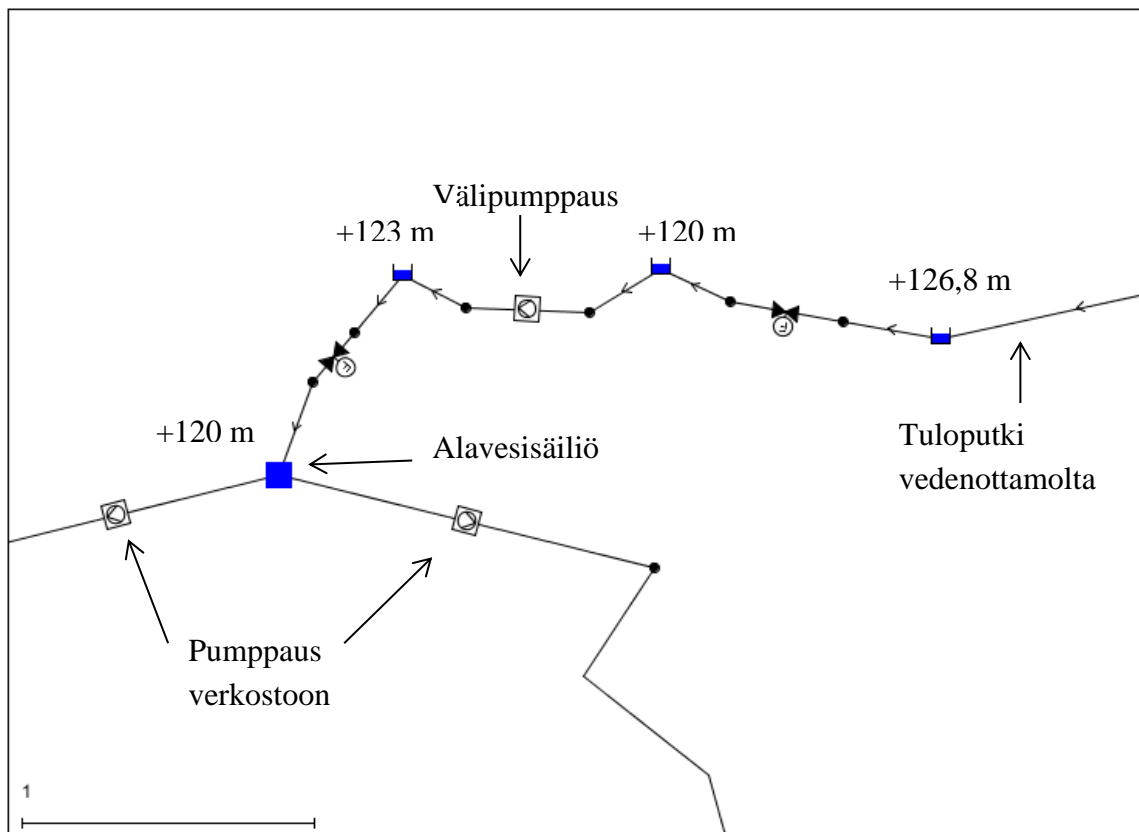
### 3.1 Energiatasemallinnus

Energiataselaskenta tehtiin EPANET-pohjaisella FCGnet-verkostomallinnusohjelmalla. FCGnetissä energiataase lasketaan Cabrera et al. (2010) esittelemällä ja Sunelan & Puustin (2015b) täydentämällä menetelmällä yhden vuorokauden laskentajaksolle. Erona aikaisempiin energiataaseen sovelluksiin käytetty menetelmä sisältää joitakin uusia tekijöitä. Tässä on otettu huomioon energiavuoto painepiirien läpi. Energiavajaus on otettu huomioon ja raakavedenotto ja prosessin hydrauliset häviöt ovat mukana tarkastelussa. Sähköenergia on mallinnettu tarkasti ja pumpun, moottorin ja taajuusmuuttajan häviöt on huomioitu erikseen.

Tutkituista verkostoista oli aikaisemmin laadittu verkostomallit, joita täydennettiin energiataselaskennan vaatimuksiin soveltuviksi. Energiataaseen laskemiseksi järjestelmämallin on vastattava todellista verkostoa mahdollisimman tarkasti. Mallissa on oltava mukana kaikki pumppaukset sisältäen raakaveden pumppaukset ja pumppujen tulee olla mallinnettu todellisten tuotto- ja hyötysuhdekäyrien mukaisesti. Vuodot tulee olla mallinnettu todellisuutta vastaavasti painepiireittäin. Myös automaatiojärjestelmän toiminta pitää olla mallinnettu, jotta malli toimisi kuten todellinen verkosto. Kaikissa malleissa asetettiin käyttöpisteille vaadittavaksi paineeksi 28 mvp, johon käyttöpisteen painetta verrataan. Energiataaseen laskennassa pumppujen käyttämä energia lasketaan vastaanotettavan painepiirin taseeseen ja toisaalta paineenalennusventtiileissä kitkan vuoksi häviävä energia vettä toimittavan painepiirin taseeseen kitkahäviöiksi.

Energiatase tarkastelua varten kaikkiin malleihin lisättiin raakaveden pumppaukset sekä vesilaitoksen prosessit hydraulisten häviöiden osalta, joita ei ollut aiemmin mallinnettu. Tarkastelua varten raakavedenottoon sekä prosessiin liittyville putkille ja solmuille tehtiin malliin omat painepiirinsä, jotta raakavedenoton energiankäyttö saatiin taseessa erilleen muusta energiankäytöstä. Raakavesipumppauksen mallinnuksessa olennaisinta on tietää, mikä on keskimääräinen kaivojen pinnankorkeus, josta vettä pumpataan ja mikä on korkeusasema siinä kohtaa, kun vesi saapuu laitokselle käsiteltäväksi. Jos raakavesikaivojen vedenottomäärien keskinäisistä suhteista ei ollut tietoa, jaettiin laitoksen vedenottomäärä kaikille kaivoille tasan. Todellisuudessa raakavesikaivojen ottomäärät vaihtelevat eri ajanhetkillä, mutta mallissa tehtiin yksinkertaistus, että kaivoilta pumpataan koko ajan tasaisesti sama määrä vettä. Kaivoilta pumpataan laitokselta verkostoon pumpattu vesimäärä lisättynä laitoksen omalla vedentarpeella.

Vedenjakeluverkoston energiatase kertoo kuinka paljon energiaa käytetään veden siirtämiseen raakavesilähteestä kuluttajalle. Vedenkäsittelyprosessin laitteiden energiankulutusta ei ole otettu huomioon muuten kuin hydraulisen energiankäytön osalta, joten tässä yhteydessä prosessin energiankulutuksella tarkoitetaan energiaa, joka kuluu veden siirtämiseksi prosessin läpi. Kuva 3 havainnollistaa prosessin mallinnusta: prosessin altaat on mallinnettu ehtymättöminä vesilähteinä ja niille on annettu korkeusasemaksi laitoksen todelliset pinnankorkeudet, mikäli niistä on ollut tietoa saatavilla. Prosessin vaiheet on mallinnettu venttiileinä. Esimerkiksi yksinkertainen pohjaveden käsittelyprosessi on mallinnettu seuraavanlaisesti: kaivoilta tuleva raakavesiputki tulee laitoksen tulopäähän, joka on mallinnettu reservoar-elementtinä. Siitä vesi valuu prosessia kuvaavan venttiilin kautta laitoksen alavesisäiliöön, joka on myös kuvattu reservoarina. Tässä tärkeintä on olla tieto laitoksen tulo- ja välivaiheiden pinnankorkeuksista, sillä niiden ero määrää prosessin hydrauliset häviöt. Kuvassa 3 esitetty Tampereen Ruskon vesilaitoksen prosessi toimii esimerkkinä monivaiheisen vedenpuhdistusprosessin mallinnuksesta: laitoksen läpi kulkeva vesi kulkee korkeusasemasta toiseen painovoimaisesti yhtä välipumppausta lukuun ottamatta.



Kuva 3. Ruskon vesilaitoksen mallinnettu vedenpuhdistusprosessi, prosessin korkeusasemat näkyvissä

Automaatiomalli rakennettiin siten, että virtaus prosessin läpi ja raakavedenotto riippuvat verkostoon pumpatusta vesimäärästä. Prosessin ja raakavedenoton mallinnuksessa otettiin lisäksi huomioon, että myös prosessin sisällä kuluu hieman vettä esimerkiksi

suodatinten huuhteluihin tai flotaatioon. Mikäli tarkkoja lukuja ei ollut tiedossa, asetettiin prosessin sisäinen virtaus ja raakavedenotto 2 % suuremmaksi kuin verkostoon toimitettu virtaus.

### 3.1.1 Verkoston energiatehokkuuden tunnusluvut

Tunnusluvut verkostojen energiatehokkuuden analysoimiseksi ovat kokonaisenergiankäyttö, sähkönkäyttö, hydraulinen hyötysuhde ja sähköhyötysuhde sekä ominaisenergian- ja ominaissähkönkäyttö verkostoon toimitetun vesimäärän ja laskutetun vesimäärän osalta (taulukko 2). Tunnusluvut laskettiin tarkastelujakson ajalta, eli vuorokauden laskentajaksolle.

**Taulukko 2.** Verkostojen energiatehokkuuden tunnusluvut yksikköineen ja laskukaavoineen

Tunnusluku	Yksikkö	Laskukaava
Kokonaisenergiankäyttö	kWh/d	-
Sähkönkäyttö	kWh/d	-
Hydraulinen hyötysuhde	%	$\eta_{hydraulinen} = \frac{E_{vaadittu}}{E_{input}}$
Sähköhyötysuhde	%	$\eta_{sähkö} = \frac{E_{vaadittu}}{E_{sähkö}}$
Ominaisenergiankäyttö (kokonaisvedenkäytölle)	kWh/m <sup>3</sup>	$E = \frac{E_{hydraulinen, verkostoon}}{Q_{verkostoon}}$
Ominaisenergiankäyttö (laskutetulle vedenkäytölle)	kWh/m <sup>3</sup>	$E = \frac{E_{hydraulinen, verkostoon}}{Q_{vedenkäyttäjille}}$
Ominaissähkönkäyttö	kWh/m <sup>3</sup>	$E = \frac{E_{sähkö, verkostoon}}{Q_{verkostoon}}$
Ominaissähkönkäyttö (laskutetulle vedenkäytölle)	kWh/m <sup>3</sup>	$E = \frac{E_{sähkö, verkostoon}}{Q_{vedenkäyttäjille}}$

Hydraulinen hyötysuhde tarkoittaa vedenjakelun energiantarpeen ja verkostoon syötetyn hydraulisen energian välistä suhdetta eli kuinka suuri osa verkostoon syötetystä energiasta tyydyttää todellista tehontarvetta. Hydraulinen hyötysuhde siis kertoo ylijäämäenergian määrästä. Sähköhyötysuhde puolestaan tarkoittaa vaaditun energian ja verkostoon toimitetun sähköenergian välistä suhdetta, eli kuinka suuri osa sähköenergiasta menee hyötykäyttöön.

Ominaisenergiankäyttö kertoo, paljonko energiaa käytetään kuutiometriä vettä kohti. Ominaisenergiankäyttö lasketaan erikseen hydrauliselle ja sähköenergialle, sekä laskutetulle että kokonaisvedenkäytölle. Laskutetulla vedenkäytöllä tarkoitetaan pelkkää laskutettua vedenkäyttöä ilman vuotoja ja kokonaisvedenkäytöllä vuotojen kanssa. Tässä tunnuslukujen erottelu kokonaisvedenkäytölle ja laskutetulle vedenkäytölle on tarpeen

siksi että verkostoissa, joissa on paljon vuotoja, pelkälle kokonaisvedenkäytölle laskettu tunnusluku antaisi liian hyvän arvon todelliseen tilanteeseen nähden. Kun tunnusluku lasketaan myös laskutetulle vedenkäytölle, nähdään kuinka paljon energiaa käytetään vedenkäyttäjille todellisuudessa toimitettuun vesimäärään.

### **3.1.2 Virhelähteet**

Osa mallinnetuista prosesseista ja raakavesipumppauksista mallinnettiin ilman tarkempia tietoja korkeusasemista ja putkilinjojen koosta ja pituuksista. Pääasiassa nämä ovat pienempiä vesilaitoksia. Varsinkin Tuusulan seudun vedellä (TSV), jolla pieniä laitoksia on useita, ei kaikista laitoksista ollut saatavilla korkeusasemia prosessin eri vaiheista. Myöskään vedenottokaivojen pinnankorkeuksia ei ollut kaikissa tapauksissa saatavilla. Jos tarkempaa tietoa ei ollut, oletettiin, että pohjavesikaivon pinta on 5 metriä maanpinnan alapuolella, kaivosta tulee 100 metriä pitkä putki laitokselle ja laitoksen tulo on 5 metriä maanpinnan yläpuolella.

Kaivojen vedenottotavan yksinkertaistettu mallinnus saattaa aiheuttaa virhettä TSV:n, Nokian ja Imatran verkostojen kohdalla (kappale 3.1). Todellisuudessa kaikista kaivoista ei välttämättä oteta samaan aikaan vettä ja vedenottomäärät voivat vaihdella.

Virhettä pumppujen tarkastelussa saattaa aiheuttaa myös se, että malliin syötetyt pumpukäyrät ovat suoraan valmistajien katalogeista. Kuitenkaan pumput, jotka ovat elinkaarensa loppupäässä, eivät välttämättä enää toimi niin kuin uutena käyrän mukaan. Etenkin vanhat kaivopumput saattavat olla tukkeutuneita ja tuotto ja hyötysuhde heikentyneet huomattavasti alkuperäisestä.

## **3.2 Tarkasteltavien verkostojen ominaispiirteet**

Energiatasetarkastelu tehtiin Imatran, Joensuun, Nokian, Tampereen ja Tuusulan seudun vesilaitosten verkostoille. Taulukkoon 3 on koottu keskeisimpiä tietoja tarkasteltavista verkostoista.

**Taulukko 3.** Tutkittujen verkostojen ominaispiirteet

Verkosto	Käyttäjien määrä	Verkostoon pumpattava vesimäärä (m <sup>3</sup> /d)	Putkia mallissa (km)	Vuodot (%)	Vedenhankinta	Vesitornit/säiliöt (kpl)	Painepiirit (kpl)
Tampere	> 200 000	49 000	808,9	12	Pintavesi, pohjavesi	6	9
Tuusulan seutu	120 000	25 000	855	10	Pohjavesi, tekopohjavesi	8	8
Joensuu	63 300	10 500	742,2	21	Pohjavesi	2	6/(12)*
Nokia	29 000	5300	228,1	20	Pohjavesi	2	6
Imatra	28 460	6400	254,6	22	Pintavesi, pohjavesi	2	4

\*Joensuun keskusta-alueella ei ole painepiirijakoa, mutta malliin sellainen tehtiin energiatasotarkasteluja varten.

Tarkasteltavista verkostoista suurin on Tampereen veden verkosto, jonka toiminta-alueella asuu yli 200 000 asukasta. Pienempiä verkostoja edustavat Imatra ja Nokia, jotka ovat käyttäjämääriltään suunnilleen samankokoiset. Tähän väliin jäävät TSV sekä Joensuu.

Tampereen verkostolla on tutkittavista verkostoista eniten käyttäjiä. Kauppi on tutkittavista painepiireistä suurin: siellä on vedenkäyttöä saman verran kuin verkostoista toiseksi suurimmalla, TSV:llä yhteensä. Kaksi kolmasosaa tamperelaisille toimitetusta vedestä tulee Ruskon pintavesilaitokselta, joka sijaitsee vedenkäyttöön nähden aivan kaupungin kaakkoislaidalla. Vedenotto tapahtuu Roineesta kahdeksan kilometrin päässä vesilaitoksesta. Länsi-Tampereella on pohjavedenottamoita: Mustalampi, Hyhky, Pinsiö ja Julkujärvi. Myös Messukylässä on pohjavedenottamo. Kaksi kolmasosaa Tampereen talousvedestä on pintavettä ja loput pohjavettä. Lähivuosina Tampereella siirrytään käyttämään pääosin Näsijärven pintavettä Roineen sijaan, kun Kaupinojan vesilaitoksen saneeraus valmistuu 2016. Ruskon ja Kaupinojan vedenottosuhteeksi tulee 1:2 ja Rusko toimii myös varalaitoksena mutta kuitenkin jatkuvassa käytössä. Tämä siirtää Tampereen vedentuotannon lähemmäs kulutuksen painopistettä. Tampereen vesi toimittaa vettä myös Pirkkalaan ja tarvittaessa myös Nokialle, Lempäälään ja Kangasalle. Tutkituista verkostoista Tampereen malli on kaikkein kattavin. Mallissa on myös vuotovedet tarkasti mallinnettuna.

TSV on tukkuvesiyhtiö Keski-Uudellamaalla, joka tuottaa talousveden Keravan ja Järvenpään kaupungeille sekä Tuusulan ja Sipoon kunnille. TSV omistaa ja operoi 11 vesilaitosta, joista kaksi on suuria tekopohjavesilaitoksia (Jäniksenlinna ja Rusutjärvi) ja yhdeksän luonnollista pohjavettä käyttäviä pienempiä laitoksia. (Kuronen 2014) TSV on tutkittavista verkostoista ainoa, jolla on merkittävää tekopohjaveden tuotantoa. Jäniksenlinnan vesilaitosta saneerataan parhaillaan, ja mallissa prosessi on mallinnettu saneerauksen jälkeisen tilanteen mukaan.

Joensuun vedenotto perustuu pohjaveteen, jota pumpataan 16 vedenottamosta eri puolilta kaupunkia. Joensuun keskusta-alueella ei ole painepiirejä, mutta tarkasteluja varten malliin kuitenkin tehtiin keinotekoinen mittarointialuejako selkeyttämään energiatase-tarkasteluja. Keskustan alueella, jossa suurin osa vedenkäytöstä sijaitsee, on hyvin tasaista. Verkoston reuna-alueilla sijaitsee korkeita vaaroja, joten pienillä Heinävaaran ja Kiihtelysvaaran alueilla korkeuserot ovat paikoin suuria. Vesitorneja on kaksi, keskustan läheisyydessä Niinivaaralla sekä Hammaslahden taajamassa.

Nokian raakavesi otetaan Maatialan pohjavedenottamolta ja Miharin pohjavedenottamolta Hämeenkyröstä. Vettä myös ostetaan Tampereelta. Nokia on vedenkäytöltään samankokoinen kuin Imatra, mutta verkosto on laajempi ja korkeuseroista johtuen paineenkorotusalueita on useampia. Nokian verkostomallissa oli mukana myös osa Tampereen verkostosta, sillä välillä vettä otetaan myös Tampereelta. Tässä työssä Tampereen vaikutus haluttiin kuitenkin pois, sillä se hankaloitti järkevien tulosten saamista, joten energiatasetta tutkittiin vain tilanteessa, jossa kaikki vesi otetaan Nokian omista vedenottamoista ja Tampereen verkosto poistettiin mallista.

Imatran vedenhankinta perustuu Hiekkoinlahden ja Joutsenon Myllypuron pohjaveteen sekä pieneltä osin Immalanjärven pintaveteen. Immalan vesilaitoksella Immalanjärven pintavettä sekoitetaan Hiekkoinlahden vedenottamolta pumpattuun pohjaveteen. Joutsenon Myllypurosta vettä johdetaan yhdysvesijohtoa pitkin. Talousvedestä yli 90 % on pohjavettä. Painepiirejä on neljä: Kurkvuori, Tuulikallio, Karhumäki ja Saarlampi, joka on liitetty Ruokolahden kunnan vedenjakeluverkostoon. Kurkvuoren ja Tuulikallion painepiireissä on vesitornit.

Taulukossa 4 esitellään vielä tarkastellut painepiirit ja mittarointialueet verkostoittain ja niiden vedenkäytöt.

**Taulukko 4.** Tutkittujen painepiirien vedenkäytöt vuorokauden tarkastelujaksolla

<b>Painepiiri</b>	<b>Vedenkäyttö tarkastelujaksolla (m<sup>3</sup>/d)</b>
<b>Tampere</b>	
Atala	2519
Hallila	379
Hervanta	4512
Kauppi	23 823
Koivistonkylä	2517
Pirkkala	3320
Pyynikki	4278
Tesoma	6264
Ylä-Rusko	144
<b>Joensuu</b>	
Heinävaara	122
Keskusta itä	3544
Keskusta länsi	4696
Kiihtelysvaara	126
Kukkola	912
Marjala	207
Nappikuja	44
Noljakka	783
<b>Imatra</b>	
Karhumäki	290
Kurkvuori	302
Saarilampi*	760
Tuulikallio	3768
<b>Nokia</b>	
Harjuniitty	75
Kankaantaka	141
Keskusta	3535
Siuro	413
Takalauttala	283
Vesitorninmäki	16
<b>TSV</b>	
Hyrylä	2780
Jokela	918
Järvenpää	5607
Kellokoski	694
Kerava	8725
Laakso	929
Nikkilä	711
Pohjois-Sipoo	162
Söderkulla	1835
Talma	155

## 4. TULOKSET

Tässä luvussa esitellään vedenjakelujärjestelmien energiataseanalyysin keskeisimmät tulokset ja analysoidaan niitä. Ensin esitellään verkostojen taseet koko verkoston osalta ja tärkeimmät tunnusluvut verkosto- ja painepiirikohtaisesti. Sen jälkeen tutkitaan energiankäyttöä painepiireissä. Myös raakavedenoton ja prosessien hydraulisten häviöiden osuus energiankäytöstä esitellään. Painepiirikohtaisissa tarkasteluissa on tarkasteltu erikseen pieniä, vedenkäytöltään alle 2000 m<sup>3</sup>/d painepiirejä ja isoja, vedenkäytöltään yli 2000 m<sup>3</sup>/d painepiirejä. Tähän jakoon päädyttiin, sillä siten saatiin painepiirit jaettua kahteen tulosten esittelyn kannalta sopivan kokoiseen joukkoon. Kaikki tulokset ovat vuorokauden pituiselle tarkastelujaksolle.

### 4.1 Verkostojen energiataseet

Verkostojen kokonaisenergiankäyttö antaa kuvan verkostojen energiankäytön suuruusluokasta ja keskinäisistä suhteista verkostojen kesken (taulukko 5). Kokonaisenergiankäyttö jakaantuu vaadittuun energiaan, ylijäämäenergiaan, vuotoenergiaan, kitkaenergiaan ja varastoenergiaan.

**Taulukko 5.** Kokonaisenergiankäyttö verkostossa ja käytetyn energian jakautuminen eri tekijöihin

Energiankäyttö järjestelmässä (kWh/d)	Tampere	TSV	Joensuu	Imatra	Nokia
Kokonaisenergiankäyttö	19 380	8460	2590	1590	1640
Vaadittu energia	8780 (45 %)	4570 (54 %)	1090 (42 %)	780 (49 %)	930 (56 %)
Ylijäämäenergia	3290 (17 %)	1290 (15 %)	740 (29 %)	350 (22 %)	290 (18 %)
Vuotoenergia	1470 (8 %)	590 (7 %)	270 (10 %)	230 (14 %)	250 (15 %)
Kitkaenergia	5330 (27 %)	1780 (21 %)	460 (18 %)	300 (19 %)	170 (10 %)
Varastoenergia	520 (3 %)	230 (3 %)	30 (1 %)	-70 (-4 %)	3 (0,2 %)

Nokiolla 56 % verkostoon tulleesta energiasta on vaadittua energiaa eli se tyydyttää todellista energiantarvetta, mikä on paras tulos tutkituista verkostoista. Tampereella puolestaan vain 45 % on vaadittua energiaa. Ylijäämäenergiaa on prosentuaalisesti eni-

ten Joensuussa, 29 % ja vähiten TSV:llä, 15 %. Vuotoenergiaa on eniten Nokiolla (15 %).

Tampereella on tutkituista verkostoista eniten kitkahäviöitä, 27 %. Vähiten kitkahäviöitä on Nokiolla, 10 %. Tuloksista huomataan, että verkostoon syötetty energia voidaan käyttää eri tavalla myös käyttäjämäärältään samankokoisten verkostojen välillä. Nokia ja Imatra ovat käyttäjämääriltään suunnilleen samankokoiset, mutta Imatralla energiaa käytetään enemmän kitkahäviöihin.

Järjestelmään tuleva potentiaalienergia ja pumppujen tuottama hydraulinen energia kertovat verkostoon tulevan energian luonteesta (taulukko 6). Näihin tekijöihin ei juuri voi vaikuttaa, sillä ne johtuvat rakenteellisista seikoista, mutta luvut auttavat hahmottamaan vedenjakelujärjestelmien rakenteelliset erot, jotka vaikuttavat energiankäyttöön. Järjestelmässä, jossa suuri osa verkostoon tulevasta energiasta saadaan potentiaalinenenergiana, tarvitaan vähemmän pumppausta ja siten sähköenergian käyttö on vähäisempää ja päinvastoin. Energiavajaus on vedenkäyttäjien tarvitsemaa energiaa, joka jää toimittamatta koska painetaso on alhaisempi kuin mitä tarvittaisiin.

**Taulukko 6.** Verkostoon tuleva energia

Energiasyöte järjestelmään (kWh/d)	Tampere	TSV	Joensuu	Imatra	Nokia
Kokonaisenergia järjestelmään	19390	8460	2600	1590	1710
Potentiaalienergia sisään	1500 (8 %)	2400 (28 %)	774 (30 %)	480 (30 %)	181 (11 %)
Pumppujen tuottama hydraulinen energia	17880 (92 %)	6060 (72 %)	1821 (70 %)	1110 (70 %)	1530 (89 %)
Energiavajaus	7,7 (0,04 %)	0,5 (0,005 %)	0,3 (0,01 %)	0,007 (0,0004 %)	0,6 (0,03 %)

Tutkituista verkostoista Tampereella suurin osuus verkostoon tulevasta energiasta tuotetaan pumpuilla, 92 % ja potentiaalienergian osuus on vain 8 %. Nokiolla tilanne on samankaltainen, pumpuilla tuotetaan 89 % ja 11 % on potentiaalienergiaa. Muissa verkostoissa näiden tekijöiden jakaumat ovat melko samat: 28-30 % potentiaalienergiaa ja 70-72% pumppujen hydraulista energiaa. Energiavajaus on eniten Tampereella ja Nokiolla: 0,04 % ja 0,03 %.

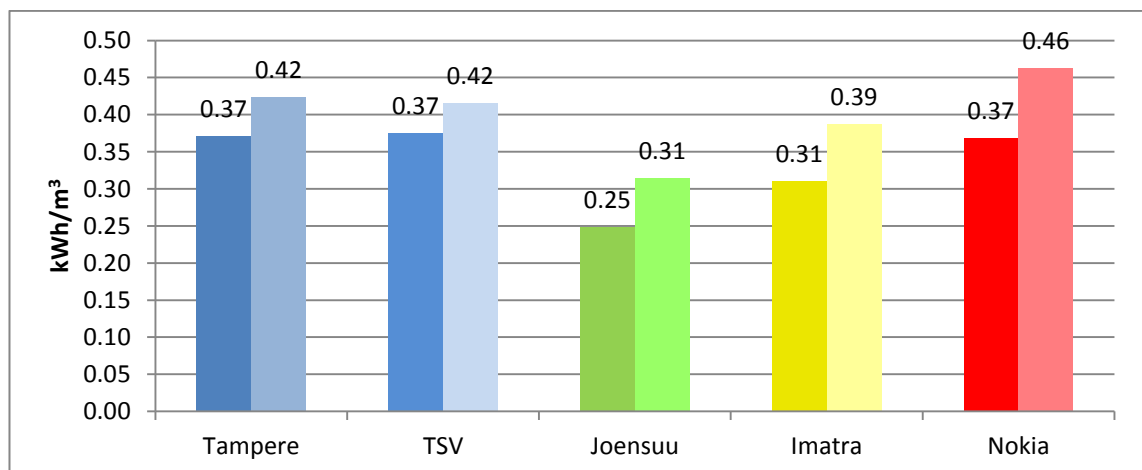
**Taulukko 7.** Verkostoon tulevan sähköenergian käyttö

Sähköenergia (kWh)	Tampere	TSV	Joensuu	Imatra	Nokia
Kokonaissähkönkäyttö	25 670	10 210	4430	2160	2620
Pumppujen tuottama hydraulinen energia	17 880 (70 %)	6060 (59 %)	1820 (41 %)	1110 (51 %)	1530 (59 %)
Pumppujen hydrauliset häviöt	5460 (21 %)	2920 (29 %)	2170 (49 %)	810 (37 %)	570 (22 %)
Pumppujen moottori- ja taajuusmuuttajahäviöt	2330 (9 %)	1230 (12 %)	431 (10 %)	250 (12 %)	510 (19 %)

Verkostoon tulevaa sähköenergiaa käyttävät pumppukokonaisuuden laitteet (taulukko 7). Parhaiten verkostoon tuleva sähköenergia saadaan hyödynnettyä Tampereella, missä sähköenergiasta lähes 70 % käytetään pumppujen hydraulisena energiana. Huonoimmat tulokset ovat Joensuussa, jossa vain alle puolet verkostoon syötetystä sähköenergiasta saadaan hyödynnettyä pumppujen hydrauliseksi energiaksi ja lähes 60 % sähköenergiasta käytetään häviöihin.

## 4.2 Verkostojen energiatehokkuuden tunnusluvut

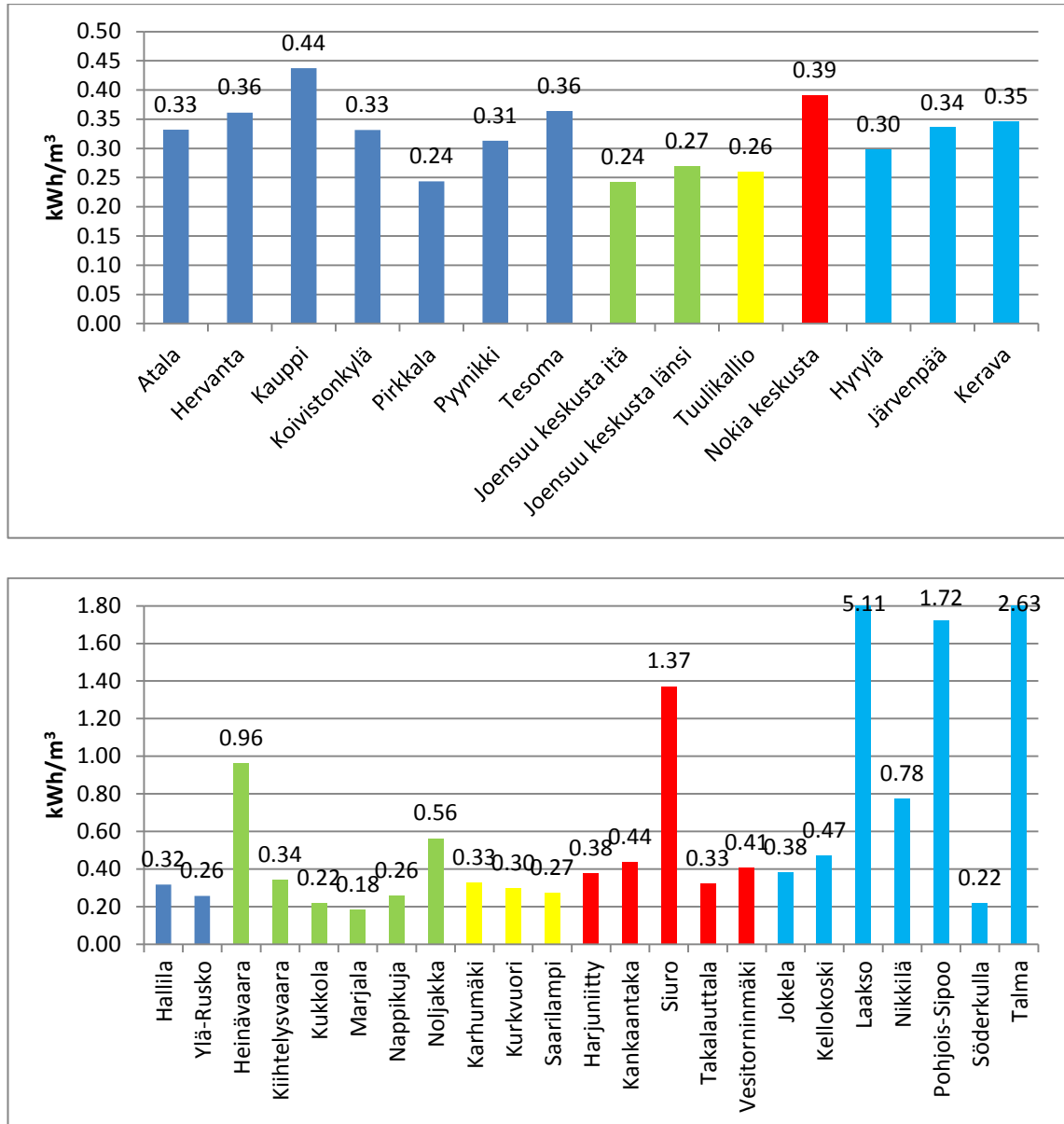
Verkostojen energiatehokkuuden tunnusluvuista esitetään ensimmäisenä ominaisenergiankäyttö kuvissa 4 ja 5. Se kertoo kuinka paljon energiaa vedenjakelujärjestelmässä käytetään vesikuutiota kohti. Ominaisenergiankäytöt esitellään kokonaisvedenkäytön ja laskutetun vedenkäytön osalta. Kokonaisvedenkäytössä on mukana verkoston vuodot ja laskutettu vedenkäyttö tarkoittaa vedenkäyttöä ilman vuotoja.



Kuva 4. Ominaisenergiankäyttö verkostoissa, vasen pylväs kokonaisvedenkäytölle ja oikea pylväs laskutetulle vedenkäytölle

Ominaisenergiankäytön lukuarvo koko vedenkäytön osalta on matalin Joensuussa: 0,25 kWh/m<sup>3</sup> kokonaisvedenkäytölle ja 0,31 kWh/m<sup>3</sup> laskutetulle vedenkäytölle. Nokian esimerkki osoittaa, kuinka suuri ero tunnusluvuilla on kokonaisvedenkäytön ja lasku-

tetun vedenkäytön osalta verkostossa, jossa on paljon vuotoja. Kokonaisvedenkäytölle esitetyn arvon valossa ( $0,37 \text{ kWh/m}^3$ ) verkoston energiankäyttö vaikuttaa huomattavasti pienemmältä kuin todellisessa tilanteessa, jossa energiaa käytetään  $0,46 \text{ kWh}$  vedenkäyttäjille toimitettua vesikuutiota kohden. Isoimpien tarkasteltujen verkostojen Tampereen ja TSV:n tulokset ovat samat:  $0,37 \text{ kWh/m}^3$  kokonaisvedenkäytölle ja molemmilla  $0,42 \text{ kWh/m}^3$  laskutetulle vedenkäytölle.



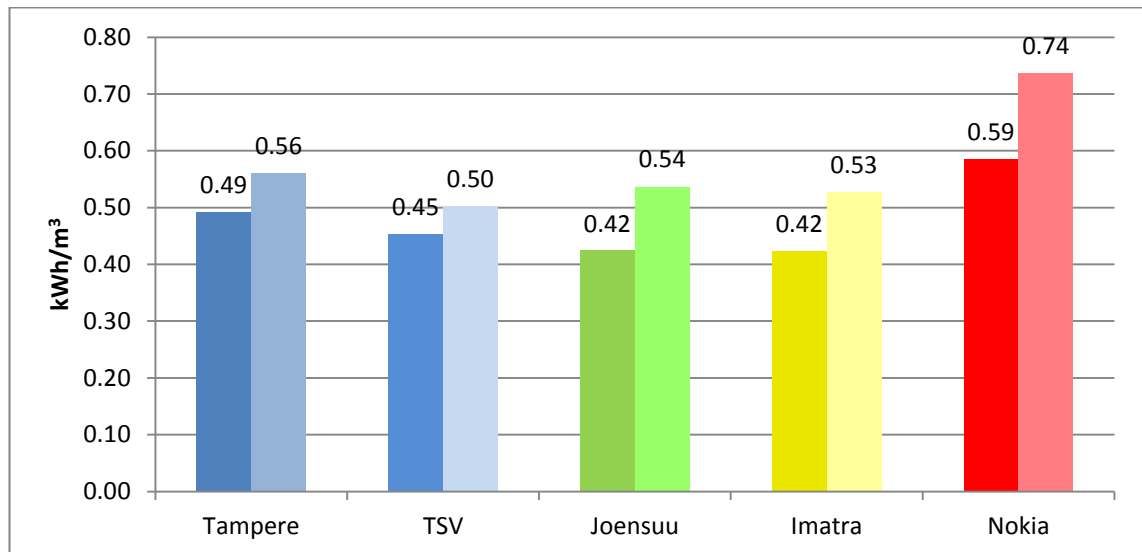
Kuva 5. Ominaisenergiankäytöt kokonaisvedenkäytölle suurissa (yllä) ja pienissä (alla) painepiireissä

Painepiirikohtaiset ominaisenergiankäytöt kertovat missä painepiireissä energiaa käytetään eniten vedenkäyttöön nähden (kuva 5). Ominaisenergiankulutus vaihtelee suurten painepiirien kesken vain vähän: suurin osa arvoista on välillä  $0,27\text{--}0,36 \text{ kWh/m}^3$  (kuva 5). Tampereen Kauppi suurimpana painepiirinä suurine häviöineen erottuu selvästi keskimääräisistä arvoista ominaisenergiankäytöllä  $0,44 \text{ kWh/m}^3$ . Myös Nokian keskusta

nousee yli keskiarvon ominaisenergiakäytöllä  $0,39 \text{ kWh/m}^3$ ; siellä tehokkuutta laskee iso määrä ylijäämäenergiaa ja vuotoja.

Pienissä painepiireissä on enemmän hajontaa ominaisenergiakäytön suhteen: pienin ominaisenergiakäyttö on Joensuun Marjalassa,  $0,18 \text{ kWh/m}^3$ , ja suurin TSV:n Laakossa,  $5,11 \text{ kWh/m}^3$  (kuva 5). Pienten painepiirien suuri ominaisenergiakäyttö voi johtua siitä, että painepiiri saattaa ylittää laajalle ja silti vedenkäyttöä on vain vähän. Joistakin pienistä painepiireistä toimitetaan suuria määriä vettä muualle verkostoon, ja sen takia ominaisenergian arvo on suuri. Esimerkiksi TSV:n Laakson painepiirissä vedenkäyttö on vähän alle  $1000 \text{ m}^3/\text{d}$ , mutta sen kautta kulkee molemmilta TSV:n suurilta vesilaitoksilta, Jäniksenlinnasta ja Rusutjärveltä, tuleva puhdas vesi toisiin painepiireihin. Laaksosta siis lähtee suuri määrä potentiaalienergiaa muualle, mikä vaikuttaa ominaisenergian lukuarvoon ( $5,11 \text{ kWh/m}^3$ ), vaikka itse painepiirissä energiankäyttö ei erityisen suurta olekaan. Samoin Talman, joka on yksi pienimmistä tarkastelluista painepiireistä, läpi kulkee paljon vettä muualle, minkä vuoksi ominaisenergiakäyttö on suurta ( $2,63 \text{ kWh/m}^3$ ).

Pienten painepiirien joukossa on painepiirejä, joissa ominaisenergiakäyttö on pientä ja päästään arvoihin, jotka ovat pienempiä kuin suurissa painepiireissä. Esimerkiksi Joensuun Marjalassa ominaisenergiakäyttö on vain  $0,18 \text{ kWh/m}^3$  ja TSV:n Söderkullassa  $0,22 \text{ kWh/m}^3$ .

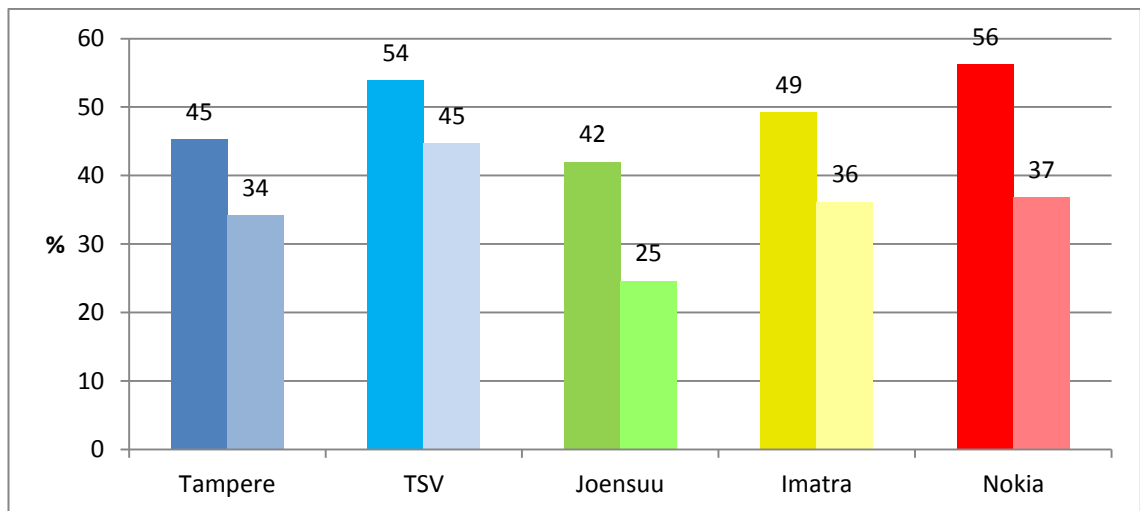


Kuva 6. Ominais sähkökäyttö verkostoissa, vasen pylväs kokonaisvedenkäytölle ja oikea laskutetulle vedenkäytölle

Verkoston ominais sähkökäyttö kertoo kuinka paljon sähköenergiaa verkostoissa käytetään veden siirtämiseen vesikuutiota kohti (kuva 6). Kuten ominaisenergiakäyttö, ominais sähkökäyttökin on korkein Nokialla. Vaikka Tampereen ja TSV:n ominaisenergiakäytöt olivat samat, niin Tampereella ominais sähkökäyttö on korkeampi. Tämä johtuu siitä, että Tampereella lähes kaikki verkostoon tuleva energia on pumppujen

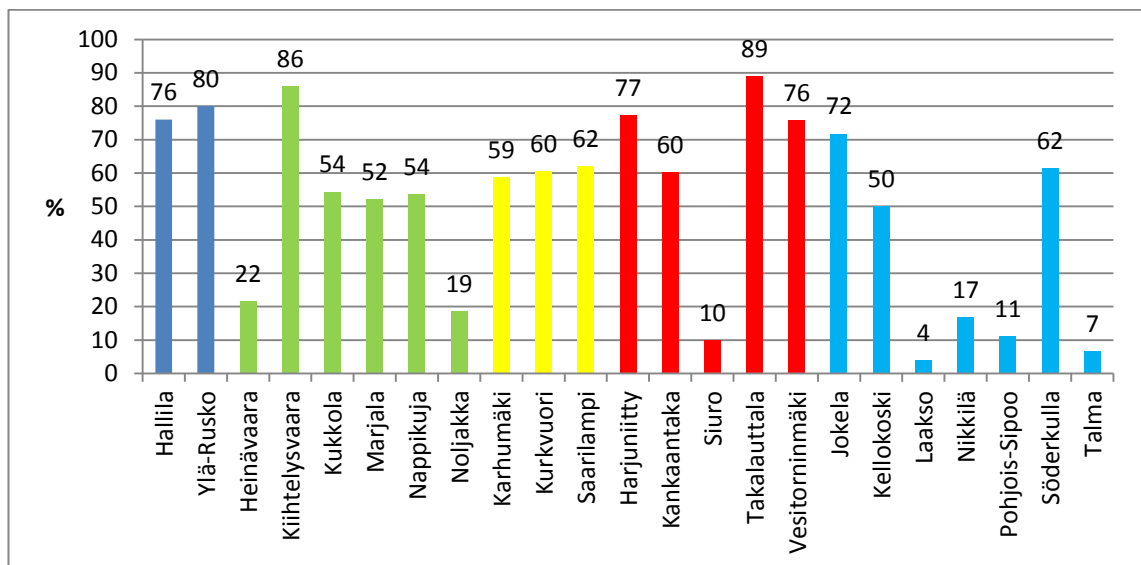
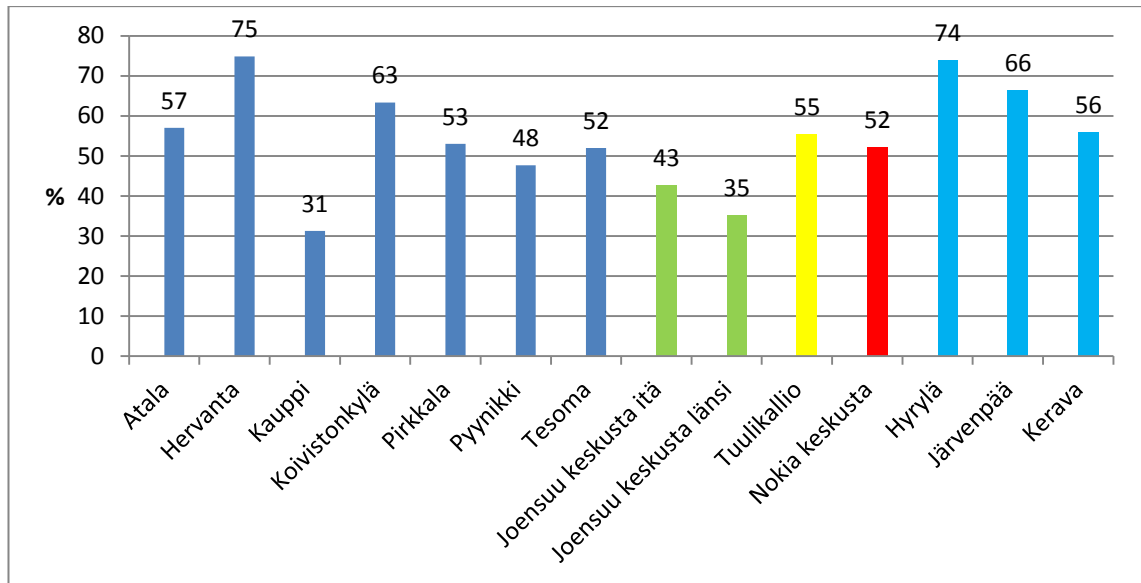
tuottamaa hydraulista energiaa, jolloin sähköäkin käytetään enemmän, kun taas TSV:llä suurempi osa verkostoon tulevasta energiasta on potentiaalienergiaa. Nokialla puolestaan korkeampi ominaissähkökäyttö liittyy huonompaan pumppauksen hyötysuhteeseen, tästä lisää luvussa 4.4.

Verkoston kokonaishyötysuhde kuvaa sitä, kuinka suuri osa verkostoon syötetystä hydraulisesta energiasta on verkoston todellista energiantarvetta eli vaadittua energiaa (kuva 7). Sähköhyötysuhde vastaavasti kuvaa kuinka suuri osa verkostoon tulevasta sähköenergiasta tyydyttää todellista energiantarvetta. Sähkölaitteet vedenjakelujärjestelmän tapauksessa ovat pumppujen moottorit ja taajuusmuuttajat, joten sähköhyötysuhde kertoo osaltaan pumppauksen energiatehokkuudesta.



Kuva 7. Verkostojen kokonaishyötysuhteet (vasen pylväs) ja sähköhyötysuhteet (oikea pylväs)

Tarkasteltujen verkostojen tulosten joukossa verkoston kokonaishyötysuhde näyttää laskevan sitä mukaa kuin verkosto ja käyttäjämäärä kasvavat. Tämä johtunee siitä, että kun vesi kulkee verkostossa pitkiä matkoja, yhä suurempi osa verkostoon tulevasta hydraulisesta energiasta muuttuu erilaisiksi häviöiksi. Paras kokonaishyötysuhde on Nokialla, 56 % ja paras sähköhyötysuhde TSV:llä, 45 %. Heikoimmat hyötysuhteet puolestaan ovat Joensuussa, jossa kokonaishyötysuhde on 42 % ja sähköhyötysuhde 25 %.



Kuva 8. Hydraulinen kokonaishyötysuhde suurissa (yllä) ja pienissä (alla) paine-  
piireissä

Suurilla paineipiireillä hydraulisten hyötysuhteiden vaihteluväli on pienempi kuin pienillä paineipiireillä (kuva 8). Toisaalta suurten paineipiirien hyötysuhteissa ei päästä yli 75 % toisin kuin eräissä pienissä paineipiireissä: esimerkiksi Nokian Takalauttalan hydraulinen kokonaishyötysuhde on 89 % ja Joensuun Kiihtelysvaaran 86 %. Suurista paineipiireistä huonoin hydraulinen hyötysuhde, eli suurimmat verkostohäviöt ovat Tampereen Kaupissa, 31 %. Kaupissa liikutellaan niin suuria määriä vettä laajalla alueella ja paikoin ahtaissa putkissa, että siinä syntyy paljon häviöitä. Joensuun läntisen keskustan hyötysuhdetta (35 %) huonontaa se, että sen kautta kulkee vettä kahdelta eri vesilaitokselta muihin paineipiireihin.

Hydraulinen kokonaishyötysuhde on paras sellaisilla paineipiireillä, jotka ovat paineenkorotuksen takana verkoston päässä, kuten Kiihtelysvaara (86 %), Harjuniitty (77 %),

Takalauttala (89 %) ja Vesitorninmäki (76 %) (kuva 8). Parempiin hyötysuhteisiin yltyvät pienet painepiirit kuin suuret. Toisaalta huonoimmat hyötysuhteet saavat pienet painepiirit, joiden läpi kulkee vettä toisiin painepiireihin. Tästä esimerkkeinä Siuro (10 %), Laakso (4 %), Pohjois-Sipoo (11 %) ja Talma (7 %).

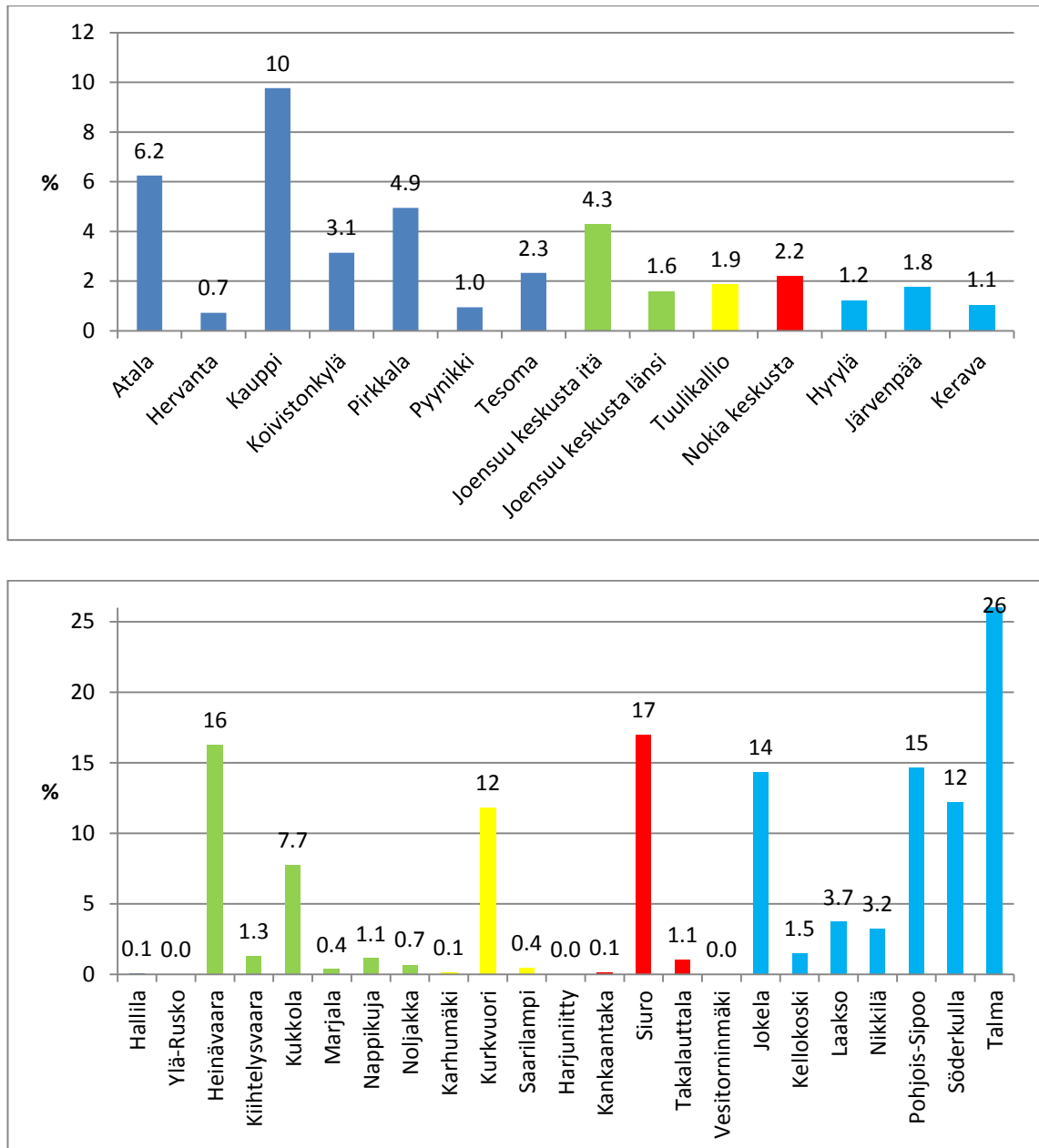
### **4.3 Energiankäyttö painepiireissä**

Tässä luvussa kerrotaan, kuinka suuri osa kokonaisenergiankäytöstä tutkituissa painepiireissä käytetään kitkahäviöihin, ylijäämäenergiaan ja vuotojen mukana poistuvaan energiaan. Painepiirien täydelliset energiataseet on esitetty verkostoittain liitteissä A-E.

#### **4.3.1 Kitkahäviöt**

Kitkahäviöt suurissa painepiireissä ovat enimmäkseen vähäisiä, alle 10 % energiankäytöstä (kuva 9). Ainoastaan Tampereen Kaupissa kitkahäviöitä on 10 %, mikä on merkittävä määrä energiaa, sillä Kauppi on suurin tarkasteltavista painepiireistä. Pienissä painepiireissä kitkahäviöiden määrä puolestaan vaihtelee 0-26 %. Kaikista tutkituista painepiireistä suhteessa eniten kitkahäviöitä on TSV:n Talmassa (26 %). Sieltä kulkee suuria määriä vettä muualle verkostoon, ja jotkin putkista ovat ahtaita. TSV:llä on muitakin painepiirejä, joissa osa putkista on ahtaahkoja siirrettävään vesimäärään nähden: Pohjois-Sipoo, Söderkulla, ja Jokela.

Pienissä painepiireissä kitkahäviöiden määrä jää yleensä vähäisemmäksi pienemmistä virtaamista johtuen. Luonnollisesti siten taas painepiireissä, joiden läpi kulkee suuria määriä vettä muualle verkostoon, syntyy enemmän kitkahäviöitä. Isoista painepiireistä Tampereen Kaupissa on kitkahäviöitä eniten (10 %). Tämä selittyy sillä, että Kaupista toimitetaan suuria määriä vettä edelleen muihin painepiireihin. Putket, joissa kitkahäviöitä esiintyy eniten, ovat reitillä Ruskon vesilaitokselta keskustaan.



Kuva 9. Kitkahäviöt suurissa (yllä) ja pienissä (alla) painepiireissä

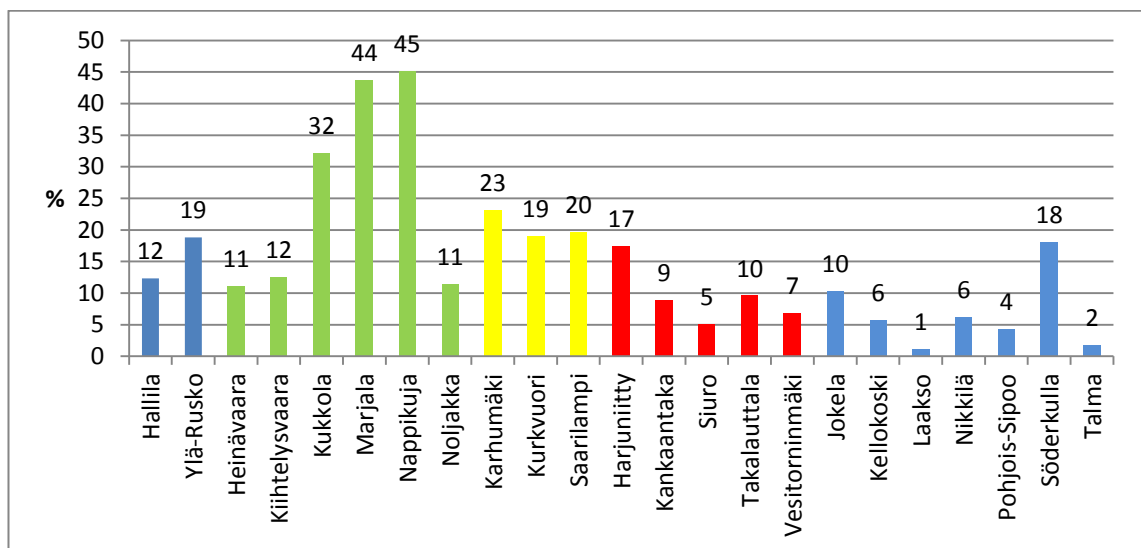
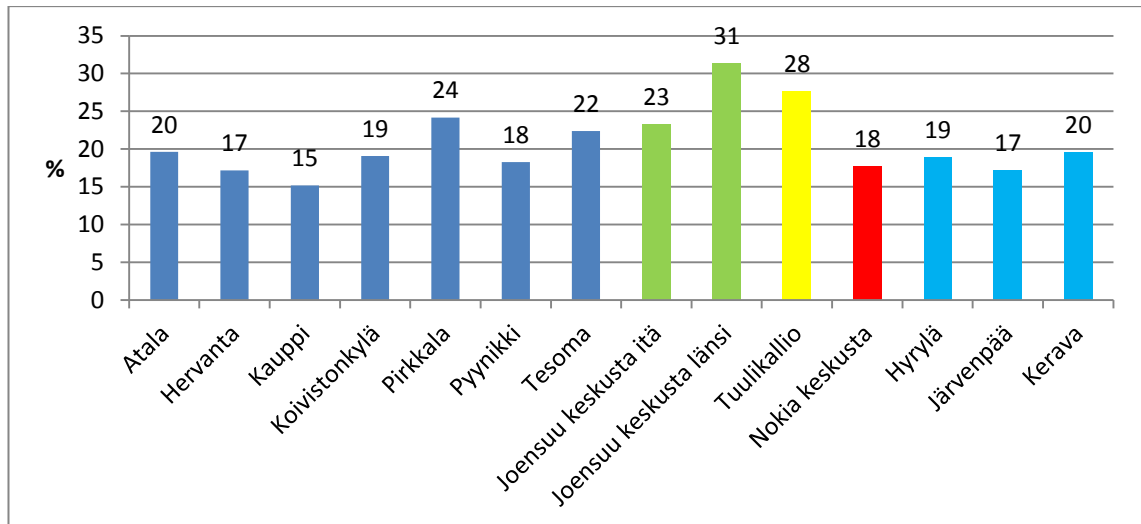
Vaikka Imatralla kitkahäviöiden osuus energiankäytöstä on melko suuri (19 %), jakeluverkostossa kitkahäviöt ovat kuitenkin vähäisiä, vain 1,9 % Tuulikalliossa ja 0,1 % Karhumäellä. Kurkvuoren painepiirissä määrä on hieman suurempi, 12 %. Kurkvuoren kitkahäviöiden määrä on seurausta Kurkvuoren painepiirin säätötavasta ja vesitornin sijainnista. Kurkvuoren vesitorni sijaitsee aivan Imatran verkoston laidalla ja se pumpataan vuorokauden aikana kolme kertaa täyteen hyvin nopeasti. Tällöin tornin täytön aikana verkoston läpi virtaa suuri määrä vettä lyhyessä ajassa, jolloin Imatran muuten väljässä verkostossa virtausnopeudet kasvavat suuriksi ja sen myötä myös kitkahäviöt. Imatralla vähäinen kitkahäviöiden määrä vedenjakelussa johtuu siitä, että suuri osa jakeluverkoston putkista on ylimitoitettuja tyypilliseen tarpeeseen nähden. Suurimmat kitkahäviöt Imatran verkostossa tapahtuvatkin pääasiassa raakavedenotossa ja veden toi-

mittamisessa kaupungin verkostoon. Nokian painepiireistä ainoastaan Siurossa esiintyy enemmän kitkahäviöitä (17 %), mutta siellä vettä joudutaankin kuljettamaan pitkiä matkoja ennen kuin se saavuttaa vedenkäyttäjät.

Vaikka joillakin työssä tarkastelluilla verkostoilla merkittävä osa kokonaisenergiankäytöstä selittyy kitkahäviöillä, niin näistä häviöistä suhteellisen pieni osa tapahtuu vedenjakelussa. Suurimmat kitkahäviöt tapahtuvatkin raakavedenotossa, josta kerrotaan enemmän luvussa 4.3.

### **4.3.2 Ylijäämäenergia**

Ylijäämäenergian määrä kertoo siitä, onko verkoston painetaso tarpeettoman korkea vaadittuun 28 mvp paineeseen suhteutettuna (kuva 10). Joensuun läntisessä keskustassa on tutkituista isoista painepiireistä eniten ylijäämäenergiaa (31 %). Toiseksi eniten ylijäämäenergiaa on Imatran Tuulikallion painepiirissä (27 %). Isoista painepiireistä Tampereen Kaupilla puolestaan on vähiten ylijäämäenergiaa (15 %).



Kuva 10. Ylijäämäenergia suurissa (yllä) ja pienissä (alla) painepiireissä

Joensuun suurimmilla vedenjakelualueilla läntisessä ja itäisessä keskustassa ylijäämäenergiaa on huomattavasti. Koko keskusta-alueella melkein kaikilla vedenkäyttäjillä on painetta 45-60 metriä, osalla jopa enemmän. Ainoastaan Niinivaaran vesitornin lähetyksillä on vedenkäyttäjillä, joilla paine on alhaisempi, mutta niilläkin kaikilla riittävä. Niinivaara on ainoa korkeampi piste muuten hyvin tasaisella keskusta-alueella. Suuri ylijäämäenergian määrä johtuu tarpeettoman korkealle sijoitetusta Niinivaaran vesitornista. Joensuun verkoston pienillä painepiireillä Kukkola, Marjala ja Nappikuja on suhteessa hyvin paljon ylijäämäenergiaa (32 %, 44 % ja 45 %). Näistä Nappikujan vedenkäyttö on niin pientä, että todellisuudessa hukkaan mennyt energiamäärä jää pieneksi, mutta Kukkolassa voisi olla energiansäästöpotentiaalia. Kukkolassa vedenkäyttökin on suhteellisen merkittävää, yli 10 % koko kaupungin laskutetusta vedenkäytöstä laskentajakson aikana.

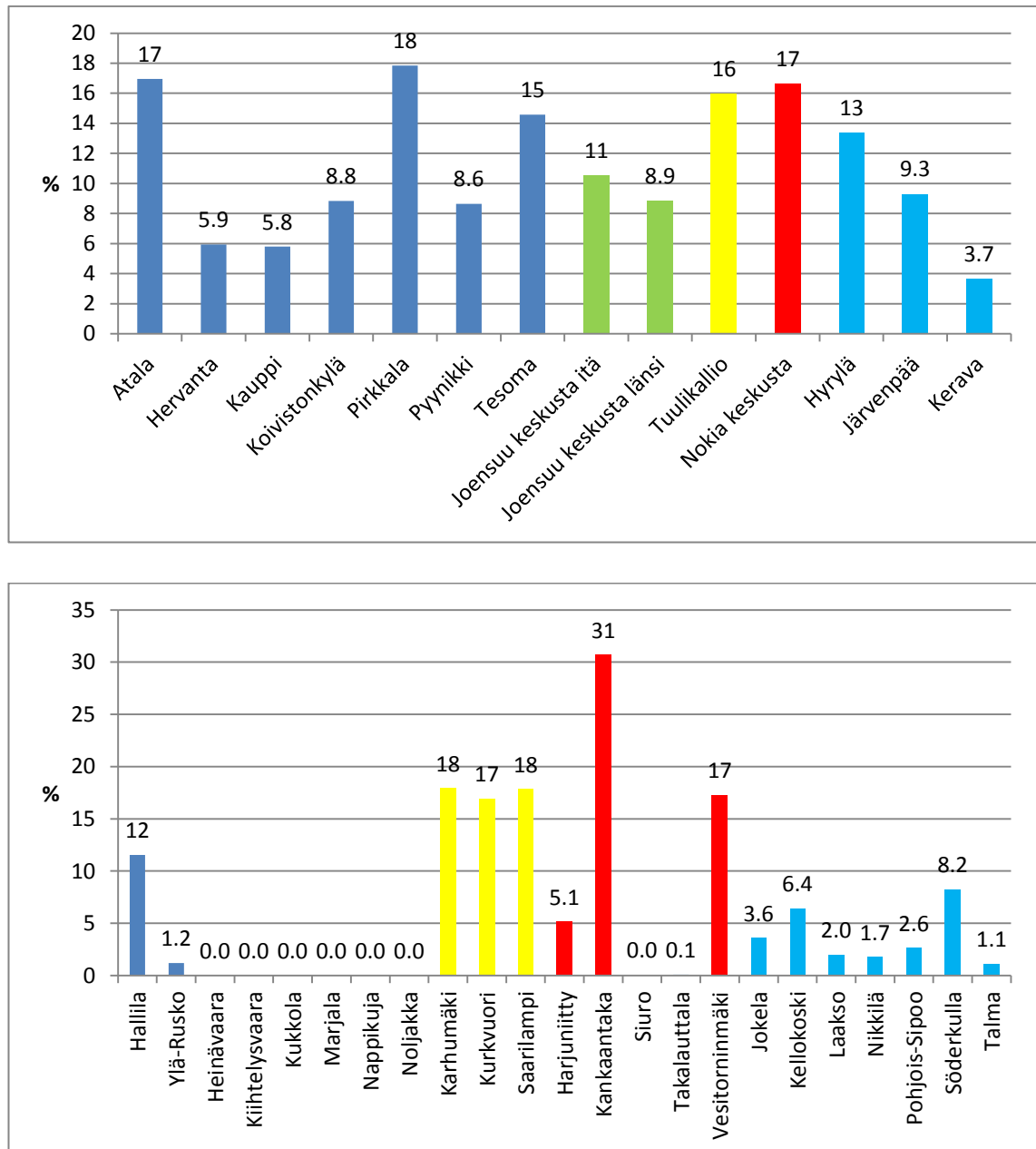
Tampereella ylijäämäenergiaa on erityisesti Pirkkalassa (24 %) ja Tesomalla (22 %). Tesomalla suurella osalla vedenkäyttäjistä painetta on vähimmilläänkin yli 55 metriä.

Tesomalla osa vedenkäyttäjistä sijaitsee matalalla, kun taas vesitorni on varsin korkealla paikalla, jolloin korkeuseroa voi olla jopa 70 metriä. Atalassa on myös 20 % ylijäämäenergiaa. Atalan pohjoisosissa kuitenkin on nykyisellään paineongelmia, minkä vuoksi painetaso pidetään koko alueelle korkeampana kuin mitä suuri osa vedenkäyttäjistä tarvitsisi. Hervannassa ylijäämäenergiaa on jonkin verran, 17 %. Tämä johtuu siitä, että korkeuserojen vuoksi painetaso pidetään korkeammalla sijaitsevalle Pohjois-Hervannalle riittävänä jolloin Hervannan eteläosissa paineet ovat tarvittua suuremmat.

Imatralla ylijäämäenergiaa on merkittävästi, kaikissa painepiireissä 19-28 %. Karhumäen painepiirin ylijäämäenergia (23 %) voi johtua myös mallin virheestä, mutta jos tulos on todenmukainen, sitä on helppo parantaa sillä alue on paineenkorotuksen takana. TSV:llä taas ylijäämäenergiaa ei ole missään painepiirissä yli 20 %. Söderkullassa, Keravalla ja Hyrylässä kuitenkin lähes 20 %. Söderkulla sijaitsee meren läheisyydessä, joten vedenkäyttäjät ovat osin hyvin matalalla. Tällöin korkealla mäellä sijaitseva ylä-veisisäiliö aiheuttaa sen, että paineet ovat suurella osalla vedenkäyttäjistä korkeat.

### 4.3.3 Vuotoenergia

Vedenjakeluverkoston vuotojen mukana verkostosta poistuu energiaa (kuva 11).

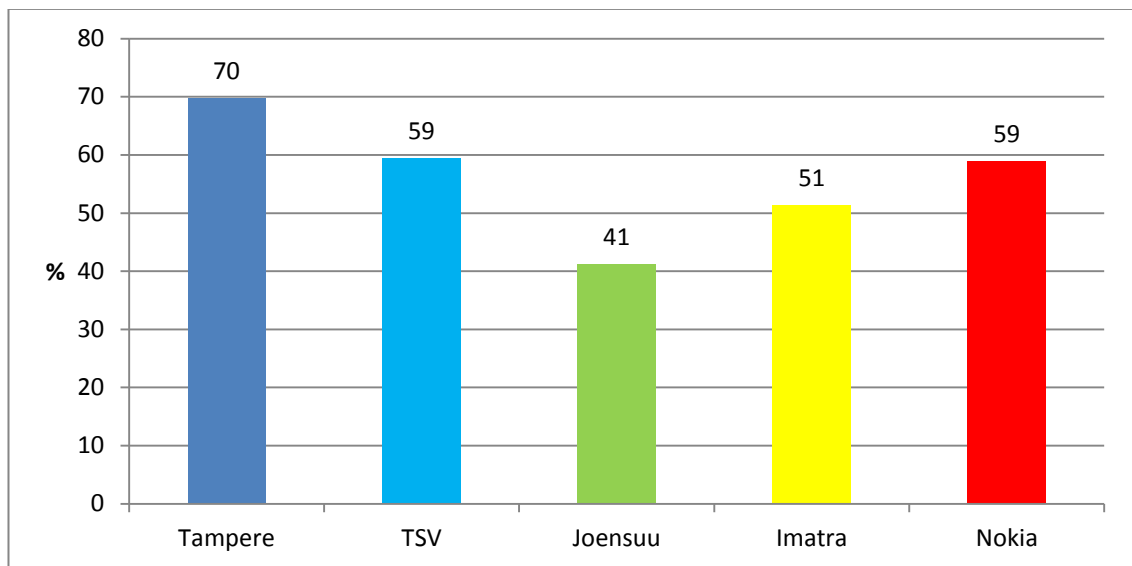


Kuva 11. Vuotojen mukana poistuva energia suurissa (yllä) ja pienissä (alla) paine-  
piireissä

Suurista painepiireistä eniten vuotojen mukana poistuu energiaa Pirkkalassa (18 %), Atalassa (17 %) ja Nokian keskustassa (17 %) (kuva 11). Tutkituista painepiireistä suhteessa kokonaisenergiankäyttöön eniten vuotoenergiaa on Nokian Kankaantaassa, 31 %. Imatralla vuotoenergiaa on myös paljon, kaikkialla vähintään 16 %. Tampereen verkostossa Pirkkalan ja Atalan lisäksi Tesomalla vuotoenergian määrä on huomattava (15 %). TSV:llä vuotoihin käytetään eniten energiaa Hyrylässä (13 %).

## 4.4 Pumppaukset

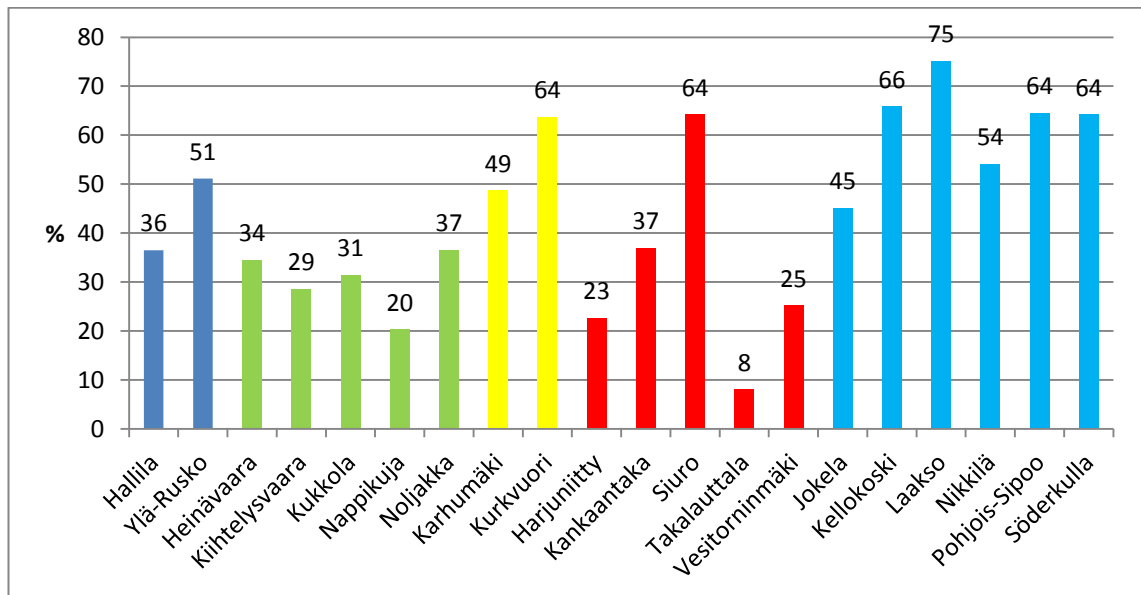
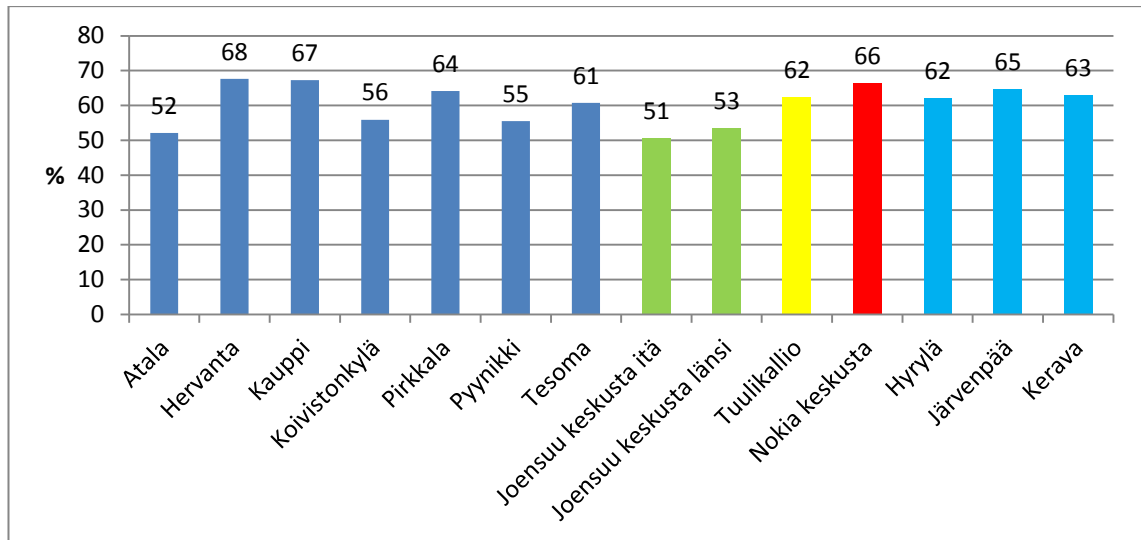
Pumppausten energiatehokkuutta lähestytään pumppauksen hyötysuhteen kautta (kuvat 12 ja 13). Pumppauksen hyötysuhteella tarkoitetaan tässä pumppujen tuottamaa hydraulista energiaa ja tarkemmin sen prosenttiosuutta kokonaissähkönkäytöstä. Luku kattaa koko pumppukokonaisuuden hyötysuhteen, sillä siinä on mukana myös moottorin ja mahdollisen taajuusmuuttajan häviöt. Kuvassa 12 esitettävä pumppauksen hyötysuhde on laskettu kaikille vedenjakelujärjestelmän pumppuille, eli myös raakavesipumput ovat luvussa mukana.



Kuva 12. *Pumppauksen hyötysuhde verkostoissa*

Pumppauksen hyötysuhteessa on verkostokohtaisesti merkittävä ero parhaan ja huonoimman välillä (kuva 12). Tampereella pumppauksen hyötysuhde on varsin hyvä, 70 %, kun taas Joensuussa pumppauksen hyötysuhde on vain 41 %.

Painepiirikohtaisesti pumppauksen hyötysuhde käsittää painepiiriin ja painepiiriin sisällä pumppaavat pumpit (kuva 13). Tässä yhteydessä pumppauksen hyötysuhteessa on kyse siitä, kuinka hyvin pumppujen mitoitus vastaa tarvetta. Todellisuudessa, johtuen esimerkiksi pumppujen kulumisesta ja tukkeutumisesta, tilanne voi olla heikompi mutta sitä ei ollut tässä työssä mahdollista ottaa huomioon.



Kuva 13. *Pumppauksen hyötysuhde suurissa (yllä) ja pienissä (alla) paineipiireissä*

Suurten paineipiirien pumppauksen hyötysuhteissa ei ole suurta hajontaa ja kaikkialla päästään yli 50 prosentin hyötysuhteisiin (kuva 13). Suuria vesimääriä pumpattaessa on hyötysuhteiden syytä olla kunnossa, joten tämä on hyvä tulos verkostojen kokonaisenergiankäytön kannalta. Pienissä paineipiireissä pumppauksen hyötysuhteessa on enemmän hajontaa ja hyötysuhteeltaan heikkoja paineipiirejä on useita. Tampereen paineipiireistä huonoin pumppauksen hyötysuhde on Hallilassa, 36 %.

Kuva 13 kertoo miksi Joensuussa pumppauksen hyötysuhde on niin heikko: pienissä paineipiireissä toimitaan hyvin huonoilla hyötysuhteilla. Yli 50 prosentin hyötysuhteisiin päästään vain keskustan paineipiireissä. Heinävaarassa, Kukkolassa ja Nollakassa hyötysuhteet ovat 30–40 % vaiheilla, Nappikujalla vain 20 %. Syynä tähän on, että Joensuun verkosto- ja paineenkorotuspumpuista useat ovat reilusti ylimitoitettuja. Vesilaitosten verkostopumppauksissa ylimitoituksella on varauduttu tilanteeseen, jossa jokin

vesilaitoksista olisi pois käytöstä. Normaalisissa toiminnassa verkostopumput toimivat kuitenkin huonolla hyötysuhteella: Onttolan vesilaitoksella pumppauksen hyötysuhde jää 40 prosentin tienoille, Rantakylän laitoksella ollaan välillä jopa alle tämän. Iso osa ajasta Rantakylässä kuitenkin toimitaan melko hyvällä hyötysuhteella, kun taas Onttolassa ei päästä missään vaiheessa hyvälle hyötysuhdealueelle. Kerolan vesilaitoksen verkostopumppaus on korkeuseroista johtuen energiatehokasta pumppauksen hyötysuhteesta riippumatta, sillä laitos sijaitsee korkean mäen päällä jolloin verkostopumpuilta vaadittava nostokorkeus jää pieneksi.

Nokiolla paineenkorotuspumppausten hyötysuhde on huono: Harjuniityssä 23 %, Kankaantaassa 37 % ja Takalauttalassa vain 8 %. Harjuniityssä ja Takalauttalassa pumput näyttäisivät olevan liian suuria: toimintapisteet tarkastelujaksolla ovat aivan pumppujen toiminta-alueiden vasemmassa äärilaidassa. Näistä alueista ainakin Takalauttalaan on tulevaisuudessa tulossa lisää asutusta, joten mitoituksella on haluttu varautua kasvavaan vedenkäyttöön. Normaalitylanteeseen ylimitoitetuilla pumpuilla saatetaan varautua myös sammutusveden tarpeeseen tulipalotilanteessa, kuten Kankaantaan painepiirissä Nokiolla, jossa vettä toimitetaan lähinnä Kankaantaan teollisuusalueelle.

TSV:llä on paineenkorotuksia, joista vettä voidaan johtaa kumpaan suuntaan tahansa. Verkoston ohjaustapa on sellainen, että mahdollisimman paljon vettä otetaan pohjavedenottamoilta ja yli jäänyt vesi valutetaan tarpeen mukaan paineenkorotusasemien läpi suuntaan tai toiseen muihin painepiireihin (Sunela 2010). Tällöin näiden paineenkorotusasemien virtaamat voivat vaihdella suurestikin. Tämän vuoksi myös hyötysuhteet heittelevät.

## **4.5 Raakavedenotto ja vedenpuhdistusprosessi**

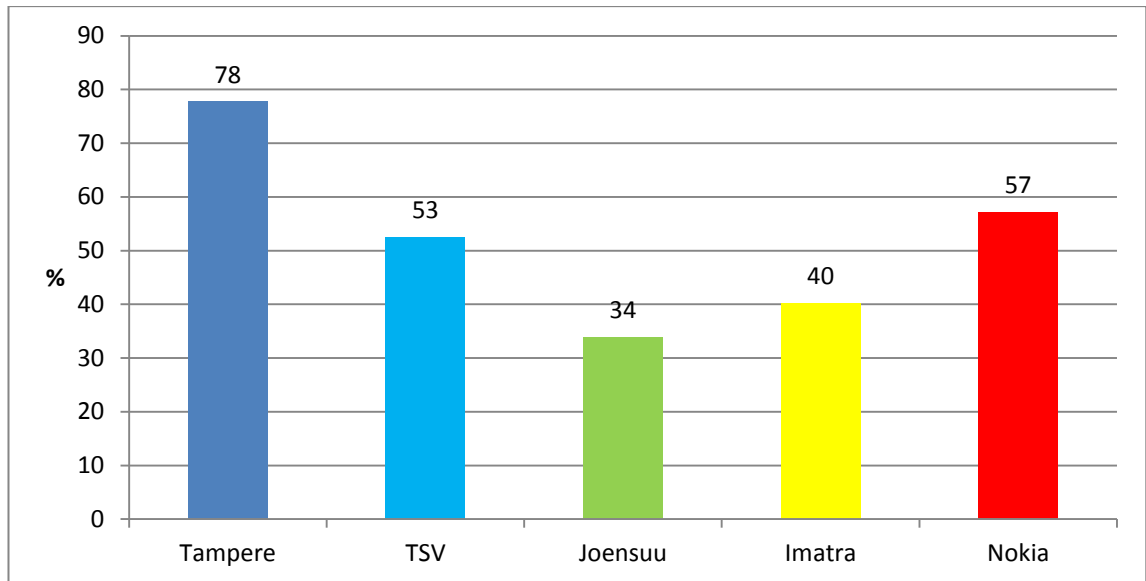
Tässä luvussa käsitellään raakavedenoton ja vedenpuhdistusprosessin energiankäyttöä. Raakavedenoton energiatehokkuutta selvitetään kokonaisenergian- ja sähkönkäytön, kitkahäviöiden ja raakavesipumppausten hyötysuhteen avulla (taulukko 8, kuva 14). Prosessin energiankäytöllä tarkoitetaan tässä prosessin hydraulisia häviöitä. Raakavedenoton ja prosessin energiankäyttöä koko järjestelmään verrattaessa on niiden energiankäytöstä vähennetty muualle verkostoon lähtevä potentiaalienergia.

**Taulukko 8.** Raakavedenoton energian- ja sähkönkäyttö ja sen osuus kokonaisenergian- ja sähkönkäytöstä, raakavedenoton kitkahäviöiden osuus koko verkoston kitkahäviöistä sekä prosessin hydrauliset häviöt ja niiden osuus kokonaisenergiankäytöstä

	Tampere	TSV	Joensuu	Imatra	Nokia
Energiankäyttö (kWh)	2620 (14 %)	1030 (12 %)	430 (17 %)	180 (11 %)	20 (1 %)
Sähkönkäyttö (kWh)	11370 (44 %)	5650 (55 %)	1420 (32 %)	800 (37 %)	620 (24 %)
Kitkahäviöt (% koko verkoston kitkahäviöistä)	49	49	64	60	12
Vedenkäsittelyprosessin hydrauliset häviöt (kWh)	1950 (10 %)	390 (5 %)	100 (4 %)	120 (8 %)	30 (2 %)

Verrattuna muihin tutkittaviin verkostoihin, Joensuussa raakavedenotto käsittää suurimman osan koko verkoston hydraulisesta energiankulutuksesta, 17 %. Hydraulinen energiankäyttö raakavedenotossa kertoo lähinnä kitkahäviöistä, sillä raakavesipuolella ei ole sellaista vedenkäyttöä, joka vaatisi tietyn painetason toisin kuin jakeluverkoston puolella (taulukko 8). Taulukko 8 havainnollistaa verkostojen suurten kitkahäviöiden muodostumisen: Joensuussa 64 % koko verkoston kitkahäviöistä tulee raakavedenotossa, Imatralla 56 % sekä TSV:llä ja Tampereellakin 49 %. Nokialla taas raakavedenoton hydrauliset häviöt ovat pienet, energiankäyttö on vain 1 % koko järjestelmän kokonaisenergiankäytöstä, sillä raakavesilähteet sijaitsevat lähellä laitoksia. Muissa tutkituissa verkostoissa raakavettä on kuljetettava pitkiä matkoja ennen kuin se tulee laitokselle käsiteltäväksi.

Raakavedenotossa käytettävien pumppujen energiankäytöstä kertoo hydraulista energiankäyttöä paremmin se, kuinka paljon sähköä käytetään raakavesipuolella suhteessa muuhun verkostoon. TSV:llä 55 % verkostoon syötetystä sähköenergiasta käytetään raakavedenotossa. Tampereella raakavedenottoon menee 44 % sähkönkäytöstä ja Joensuussakin 32 %. TSV:n tulosta selittää se, että suurin osa vedentuotannosta on tekopohjavettä. Vesi pumpataan ensin Päijännetunnelista imeytysalueille ja imeytyksen jälkeen kaivoista laitokselle. Kuluttajille toimitettava vesi on siis pumpattu moneen kertaan, mikä kuluttaa paljon sähköenergiaa. Vedenkäsittelyprosessiin eniten hydraulista energiaa käytetään Tampereella (10 %). Muissa tutkituissa verkostoissa prosessin hydrauliset häviöt käsittävät alle 10 % koko verkoston energiankäytöstä.



Kuva 14. Raakavesipumppauksen hyötysuhde

Korkea raakavedenoton sähkönkäyttö Joensuussa johtuu raakavesipumppauksen huonosta hyötysuhteesta (kuva 14). Tampereella raakavesipumppauksen hyötysuhde on varsin hyvä, 78 %.. Näin korkea hyötysuhde on mahdollinen, koska Roineesta pumpaavan raakavesipumpun, joka pumpkaa 70 % Tampereen raakavedestä, hyötysuhde on hyvin korkea. Joensuussa ja Imatralla puolestaan hyötysuhteet ovat heikot, 34 % ja 40 %.

## 5. TULOSTEN TARKASTELU

Tässä luvussa kootaan yhteen tärkeimmät tuloksista tehdyt havainnot ja päätelmät ja tutkitaan niiden pohjalta toimenpiteitä energiataseen parantamiseksi. Tulosten vertailun perusteella valittiin energiatehokkuuden tunnuslukujen osalta muista painepiireistä poikkeavia painepiirejä ja etsittiin niille parannuskeinoja. Tässä luvussa esitellään kaksi parannusehdotusta ja niiden vaikutukset energiankäyttöön. Parannuskeinojen vaikutus energiankäyttöön tutkitaan mallintamalla, ja tuloksia verrataan nykytilanteeseen.

### 5.1 Yhteenveto keskeisistä energiatehokkuuden tunnusluvuis- ta

Taulukossa 9 esitetään mediaanit ja vaihteluvälit 60 % luottamusvälillä keskeisille energiatehokkuuden tunnusluvuille. Vaihteluväli on saatu siten, että on oletettu tulosten noudattavan normaalijakaumaa. Tällöin 60 % luottamusväli tarkoittaa sitä, että saatujen tuloksien koko vaihteluvälillä 20 % tuloksista on jätetty pois vaihteluvälin molemmista päistä.

**Taulukko 9.** *Suomalaisten vedenjakelujärjestelmien tyypilliset tunnuslukujen vaihteluvälit 60 % luottamusvälillä*

	Mediaani	60 % luottamusväli
Ominaisenergiankäyttö (kWh/m <sup>3</sup> )	0,37	0,31-0,36
Ominais sähkönkäyttö (kWh/m <sup>3</sup> )	0,45	0,45-0,50
Hydraulinen hyötysuhde (%)	49	47-52
Sähköhyötysuhde (%)	36	32-38
Pumppauksen kokonaishyötysuhde (%)	59	52-61
Ylijäämäenergia (%)	18	18-22
Kitkahäviöt (%)	19	17-22
Vuotoenergia (%)	10	9-13

Ominaisenergiankäyttö verkostoon pumpatulle kokonaisvesimäärälle on suomalaisissa verkostoissa tyypillisesti 0,31–0,36 kWh/m<sup>3</sup> ja ominais sähkönkäyttö 0,45–0,50 kWh/m<sup>3</sup>. Verkostojen hydraulinen kokonaishyötysuhde vaihtelee 47–52 % ja sähköhyötysuhde 32–38 %. Yhteenvedosta huomataan, että suomalaisissa vedenjakelujärjestelmissä on tyypillisesti melko paljon ylijäämäenergiaa (18–22 % kokonaisenergian-

käytöstä) ja kitkahäviöitä (17–22 % kokonaisenergiankäytöstä). Pumppauksen kokonaishyötysuhde on pääosin kohtuullisella tasolla, 52–61 %.

## 5.2 Verkostokohtainen yhteenveto ja parannustoimenpiteet

Tampereen verkoston energiatase on kokonaisuutena melko hyvä. Raakaveden osuus energiankäytöstä on noin neljännes ja vedenkäsittelyprosessin reilu 10 %. Pumppauksen hyötysuhde on varsin hyvä, 70 %. Ylijäämäenergiaa ei ole kovin paljoa verrattuna muihin verkostoihin, mutta kitkahäviöt ovat suuria ja vuotoja on melko paljon.

Tampereella on tutkituista verkostoista eniten kitkahäviöitä. Nykyisessä tilanteessa suuri osa kitkahäviöistä tulee raakavedenotossa sekä johdettaessa Ruskon vesilaitoksella käsiteltä vettä verkoston halki keskustan painepiireihin. Tämä tilanne tulee kuitenkin muuttumaan, kun Kaupinojan vesilaitoksen saneeraus valmistuu vuonna 2016. Tällöin Ruskon vesilaitokselle Roineesta otettava vesimäärä vähenee, ja näin ollen virtauksen pientyessä kyseisellä putkilinjalla myös kitkahäviöt vähenevät. Kaupinojan laitoksen käyttöönotto vähentää kitkahäviöitä sekä raakavedenotossa että jakeluverkostossa. Raakavesilähde sijaitsee laitoksen vieressä, joten raakavettä ei tarvitse kuljettaa pitkää matkaa, ja laitos sijaitsee lähempänä vedenkäytön painopistettä, jolloin myös verkostossa tapahtuvat kitkahäviöt jäävät vähäisemmiksi. Kaupinojan laitoksen käyttöönoton lisäksi uusi syöttöjohto verkoston halki Kaupista Kauhakorpeen on rakenteilla. Näiden toimenpiteiden vaikutus kokonaisenergiankäyttöön tutkittiin ja verrattiin tuloksia nykytilanteeseen.

**Taulukko 10.** Tampereen vedenjakelujärjestelmän energiatase nykytilanteessa ja muutosten jälkeen

	Nykytilanne	Tuleva tilanne
Kokonaisenergiankäyttö (kWh)	19 387	15 341
Kitkahäviöt (kWh)	5336 (28 %)	1914 (12 %)
Hydraulinen hyötysuhde (%)	45	53
Ominaisenergiankäyttö (kWh/m <sup>3</sup> )	0,37	0,31
Sähkönkäyttö (kWh)	25 561	20 542
Sähköhyötysuhde (%)	34	40
Ominais sähkönkäyttö (kWh/m <sup>3</sup> )	0,49	0,42

Tulevassa tilanteessa muutos on huomattava: kokonaisenergiankäyttö vähenee 4000 kWh/d, mikä tarkoittaa 20 % energiansäästöä (taulukko 10). Kokonaisenergiankäytön väheneminen näkyy ominaisenergiankäytössä joka pienenee 0,37 kWh/m<sup>3</sup>:sta 0,31 kWh/m<sup>3</sup>:n. Kokonaisenergiesäästö johtuu pääasiassa siitä, että kitkahäviöt vähenevät 65 %. Tulevassa tilanteessa kitkahäviöiden osuus kokonaisenergiankäytöstä on vain 12 %, mikä on varsin hyvä tulos verrattuna muihin tässä työssä tutkittuihin verkos-

toihin, kun osuus aikaisemmin oli 28 %. Kun energiaa tulevassa tilanteessa käytetään vähemmän häviöihin, paranee myös hydraulinen hyötysuhde 45 %:sta 53 %:in.

Sähkönkäyttö vähenee 5000 kWh/d, joten sähköä säästyy myös 20 % nykytilanteeseen verrattuna. Tästä johtuen ominaissähkönkäyttö pienenee 0,49 kWh/m<sup>3</sup>:sta 0,42 kWh/m<sup>3</sup>:n.

**Taulukko 11.** Tampereen vedenjakelujärjestelmän energiatase: verkostoon tuleva energia nykytilanteessa ja muutosten jälkeen

	Nykytilanne	Tuleva tilanne
Kokonaisenergia järjestelmään	19 391	15 343
Potentiaalienergia sisään	1502 (8 %)	2409 (16 %)
Energiavajaus	7,8 (0,04 %)	8,9 (0,06 %)
Pumppujen tuottama hydraulinen energia	17 881 (92 %)	12 925 (84 %)

Muutokset verkostossa muuttavat verkoston rakennetta siten, että tulevassa tilanteessa järjestelmässä tarvitaan vähemmän pumppujen tuottamaa hydraulista energiaa (taulukko 11). Nykyisin 92 % järjestelmään tulevasta energiasta on pumppujen tuottamaa hydraulista energiaa, tulevassa tilanteessa sen osuus on 84 %. Verkostossa käytetty pumppujen tuottama hydraulinen energia vähenee siis 28 %, mikä näkyikin lopulta vähentyneenä sähkönkäyttönä (taulukko 10).

Ylijäämäenergia on yleistä monissa tutkituissa painepiireissä. Sen vähentäminen on kuitenkin hankalaa, kuten todettiin luvussa 2.6.2. Joensuussa ylijäämäenergiaa on eniten tutkituista verkostoista, 29 %. Tämä johtuu siitä, että koko verkoston alueella vedenkäyttäjillä paine on suurempi kuin tarvittaisiin, suurimmalla osalla painetta on yli 50 metriä kun vedenkäyttäjille asetettu vaadittu paine on 28 metriä. Isolla osalla vedenkäyttäjistä painetta on siis lähes kaksinkertaisesti siihen nähden, mitä tarvittaisiin. Koska Joensuun keskusta-alueella ei ole varsinaisia painepiirejä, pidetään koko verkoston paine sellaisena, että korkeimmalle kohdalle riittää vettä, jolloin alempana sijaitseville vedenkäyttäjille tulee tarpeettoman korkeat paineet. Jos saneerausten yhteydessä on mahdollista tehdä muutoksia verkoston painetasoihin vesitornin korkeusaseman muuttamisen kautta, niin Joensuussa tätä vaihtoehtoa kannattaisi tutkia. Paineiden laskeminen verkostossa vaikuttaa energiankäyttöön myös vuotoenergian vähenemisen kautta. Verkoston rasitus myös pienenee paineiden laskiessa, mikä vähentää putkirikkoja ja putkirikoissa vuotavaa vesimäärää.

Ylijäämäenergian vähentämisen sijaan melko edullinen tapa vaikuttaa energiankäyttöön on pumppujen uudelleenmitoitus. Tehottomia pumppuja löytyi kaikista verkostoista. Suuri energiansäästöpotentiaali olisi esimerkiksi Joensuun keskustan verkostopumppuksissa, jotka toimivat huonoilla hyötysuhteilla. Pumput ovat ylimitoitettuja, koska on

haluttu varautua tilanteeseen, jossa kaikki vesi jouduttaisiin pumppaamaan verkostoon yhdeltä laitokselta.

Joensuussa koko verkoston tasolla pumppauksen hyötysuhde on melko huono, vain 41 %. Joensuuhun onkin siten luontevaa tutkia pumppujen uudelleenmitoituksesta syntyvää energiansäästöpotentiaalia. Joensuun verkostossa Onttolan vesilaitokselle mallinnettiin tarpeeseen nähden sopivamman kokoinen verkostopumppu. Tällä saatiin sähkökäyttöverkostossa vähenemään 430 kWh päivässä, mikä on melkein 10 % säästö koko verkoston sähkökäytöstä (taulukko 12). Myös ominaissähkökäyttö pieneni 0,43 kWh/m<sup>3</sup>:sta 0,38 kWh/m<sup>3</sup>:n. Jos Joensuussa halutaan varautua äärimmäiseen poikkeustilanteeseen niin kuin nyt on tehty, voitaisiin näiden suurten verkostopumppujen rinnalle tuoda normaalitilanteeseen paremmin mitoitettut pumpput, jotta pumppaus saataisiin hoidettua energiatehokkaammin. Nykyiset suuret pumpput voitaisiin pitää varalla häiriötilanteita varten. Energiankäytön kannalta merkittävää on se, kuinka energiatehokkaasti pumppaus tapahtuu suurimman osan aikaa eikä energiatehokkuudella ole niin suurta merkitystä häiriötilanteissa.

**Taulukko 12.** Sähkökäyttö Joensuun verkostossa nykytilanteessa ja muutosten jälkeen

	Nykytilanne	Muutosten jälkeen
Sähkökäyttö (kWh)	4432	4002
Ominaissähkökäyttö (kWh/m <sup>3</sup> )	0,43	0,38
Sähköhyötysuhde (%)	24,6	27,3
Pumppauksen hyötysuhde verkostossa (%)	41	46

Pumpun vaihto pelkästään Onttolaan ei paranna vielä verkoston sähköhyötysuhdetta merkittävästi, sillä verkostossa on monia muitakin energiatehokkuudeltaan huonoja pumppuja, joiden uudelleenmitoitusta tulisi myös miettiä. Pumppauksen höytysuhde koko verkostossa parani muutoksen myötä 5 %-yksikköä.

Nokian heikkouksia muihin verkostoihin nähden ovat runsaat vuodot, joiden osuus on 16 % hydraulisesta energiankäytöstä, sekä paineenkorotuspumppauksen huonot hyötysuhteet. Nokialla hydraulinen hyötysuhde on kuitenkin parempi kuin muilla tutkituilla verkostoilla ja sähköhyötysuhde toiseksi paras. Nokialla energiankäyttöön vaikuttaa edullisesti se, että korkeammilla kohdilla sijaitsevia alueita on jaettu useaksi pienemmäksi painepiiriksi, jolloin ylijäämäenergiaa ei tule niin paljoa.

TSV:llä on tutkituista verkostoista toiseksi eniten kitkahäviöitä, joista 55 % tulee raakavedenotossa. Raakavedenotossa suuria kitkahäviöitä esiintyy etenkin johdettaessa Päijännetunnelin vettä tekopohjavesilaitoksille imeytykseen. Jakeluverkostossakin kitkahäviöiden määrä on melko suuri. Tässä on taustalla samat syyt kuin Tampereellakin: suurimmat vesilaitokset sijaitsevat verkoston laidalla kaukana vedenkäytön painopisteestä. Suuria määriä vettä kulkee koko verkoston halki, jolloin kitkahäviöt kasvavat suuriksi.

Tämän ilmiön vaikutusta on pyritty minimoimaan verkoston säätötavalla, joka ottaa aina mahdollisimman suuren vesimäärän pitkin verkostoa olevilta pieniltä vesilaitoksilta (Sunela 2010). Kitkahäviöihin ovat paikoin syynä myös ahtaat putket. Jokelan painepiirissä 14 % kitkahäviöiden taustalla on Santakosken vedenottamolta sekä Linjamäen paineenkorotusasemalta tulevien putkien ahtaus.

TSV:n pumppauksen hyötysuhde on tutkituista verkostoista paras, ylijäämäenergiaa ei myöskään ole paljoa. TSV:n paineenkorotuksista Broböle, joka pumppaa vettä Söderkullaan päin, toimii toiminta-alueensa alalaidassa, joten parantamisen varaa olisi. Tämä johtuu luultavasti siitä, että Söderkullaan mentäessä varsinaista paineenkorotustarvetta ei ole paljoa, sillä korkeuserot ovat vähäisiä.

Keskeisimmät Imatran energiatasetta huonontavat tekijät ovat suuret kitkahäviöt sekä suuret määrät vuoto- ja ylijäämäenergiaa. Kitkahäviöitä aiheuttavat pääasiassa pitkät ja osin ahtaat raakavesiputket, jakeluverkostossa puolestaan kitkahäviöitä on hyvin vähän. Imatralla eniten kitkaenergiaa syntyy Hiekkoinlahden pohjavedenottamolta Immalan vesilaitokselle Immalanjärven poikki johtavalla 355M-putkilinjalla. Ahtaiden ja paljon energiankäyttöä kitkahäviöiden muodossa aiheuttavien putkien vaihtaminen suuremmiksi tulee kysymykseen lähinnä verkoston saneerausten yhteydessä kalleutensa vuoksi. Tämän vuoksi esimerkiksi Imatran ahtaimpien putkien, jotka kuljettavat vettä Hiekkoinlahden vedenottamolta Immalan vesilaitokselle, suurentaminen ei ole realistinen parannusehdotus tässä työssä, sillä putkien elinkaarta on vielä kymmeniä vuosia jäljellä. Kitkahäviöiden perusteella voitaisiin kuitenkin arvioida missä suhteessa raakavettä kannattaa ottaa Joutsenon Myllypuron vedenottamolta ja missä suhteessa Hiekkoinlahden vedenottamolta, mikäli vedenottamoiden antoisuudet sallivat vedenottomäärien muuttamisen.

### **5.3 Suomalaisen vedenjakelujärjestelmien energiatehokkuuden vertailu kirjallisuusarvoihin**

Suomalaisen vedenjakelujärjestelmien energiatasestarkastelun tuloksia vertailtiin Hernández et al. (2012), Scanlan & Filion (2015) ja Mamade et al. (2015) esittelemiin tuloksiin. Mamade et al. (2015) ei tehnyt täydellistä energiataseanalyysiä koko verkostosta, joten osa tunnusluvuista puuttuu. Tulosten vertailemiseksi kirjallisuusarvoihin, laskettiin tämän työn tuloksille puuttuvat tunnusluvut  $I_1$ ,  $I_2$  ja  $I_5$  Cabreran (2010) mukaan. Mamade et al. (2015) esittelemille tuloksille laskettiin tunnusluku  $I_1$ . Kirjallisuudessa (Hernández et al. 2012; Scanlan & Filion 2015) esitettiin tunnusluville  $I_1$ ,  $I_2$  ja  $I_3$  arvot erikseen kokonaisvedenkäytölle ja vedenkäytölle ilman vuotoja, mutta tässä esitetään tunnusluvut vain kokonaisvedenkäytölle, sillä tämän työn tuloksissa tunnuslukujen laskemiseksi tarvittavat arvot ovat aina kokonaisvedenkäytölle.

**Taulukko 13.** Tulosten vertailu kirjallisuudessa esitettyihin tunnuslukuihin, kirjallisuusarvot esitetty kursivilla

Järjestelmä	Ylijäämäenergian tunnusluku $I_1$	Verkoston energiatehokkuus $I_2$	Kitkahäviöt $I_3$	Vuotoenergian $E_L$ osuus kokonaisenergiankäytöstä	$I_5$
Tampere	2,21	0,62	0,27	0,08	1,37
TSV	1,85	0,69	0,21	0,07	1,28
Joensuu	2,38	0,70	0,18	0,10	1,68
Imatra	2,03	0,71	0,19	0,14	1,45
Nokia	1,85	0,71	0,07	0,15	1,32
<i>Denia</i>	<i>5,52</i>	<i>0,33</i>	<i>0,47</i>	<i>0,15</i>	<i>1,83</i>
<i>Águas do Sado</i>	<i>2,27</i>	-	-	<i>0,21</i>	-
<i>Systeemi A</i>	<i>2,03</i>	<i>0,67</i>	<i>0,09</i>	-	<i>1,35</i>
<i>Systeemi B</i>	<i>2,44</i>	<i>0,58</i>	<i>0,22</i>	-	<i>1,40</i>
<i>Systeemi C</i>	<i>2,28</i>	<i>0,61</i>	<i>0,15</i>	-	<i>1,38</i>

Taulukosta 13 huomataan, että suomalaisten vedenjakelujärjestelmien energiatehokkuuden tunnusluvut ovat hyvin samankaltaisia kuin kanadalaisilla vedenjakelujärjestelmillä A, B ja C (Scanlan & Filion 2015). Lähes kaikki kanadalaisten järjestelmien tunnusluvut sijoittuvat suomalaisten järjestelmien tunnuslukujen vaihteluvälille. Espanjalaisen Denian (Hernández et al. 2012) vedenjakelujärjestelmän muista järjestelmistä poikkeavat tunnusluvut johtunevat suuremmista kitkahäviöiden ja ylijäämäenergian määristä. Kitkahäviöitä vertailtaessa tulee muistaa, että kirjallisuudessa esitetyissä tuloksissa ei ole mukana vedenoton ja prosessin energiankäyttöä, kuten tämän työn tuloksissa, joissa puolestaan suuri osa koko vedenjakelujärjestelmän kitkahäviöistä havaittiin tulevan raakavedenotossa. Águas do Sadon (Mamade et al. 2015) vedenjakelujärjestelmän energiatehokkuutta on hankalaa vertailla muihin esiteltyihin järjestelmiin, sillä energiataseen tuloksista puuttuu näiden tunnuslukujen laskemiseen tarvittavat arvot kitkahäviöille ja ylijäämäenergialle. Ylijäämäenergian tunnusluvusta (2,27) voidaan kuitenkin todeta, että se on samankaltainen kuin muissa tutkituissa järjestelmissä.

Tunnusluvuista vuotoenergiaa ei pystytty vertailemaan kanadalaisten järjestelmien kanssa, sillä niille vuotojen mukana poistuvaa energiaa oli kuvattu ainoastaan Cabreran tunnusluvulla  $I_4$ , kun taas tässä työssä tarkasteltiin vuotojen mukana poistuvan energian osuutta vedenjakelujärjestelmän kokonaisenergiankäytöstä. Vuotojen mukana poistuva energia on Imatralla ja Nokiolla samalla tasolla espanjalaisen Denian kanssa.

Scanlan & Filion (2015) selittää suurta eroa kanadalaisten järjestelmien välillä muun muassa sillä, että Kanadassa, kuten myös Suomessa, sammutusvesi ja kotitalouksille jaettava vesi tulevat samasta järjestelmästä. Tämän vuoksi vedenjakelujärjestelmät mitoitetaan kotitalouksien huippukulutukselle ja samanaikaiselle sammutusvedenotolle, joten putkikoot ovat suurempia kuin normaali keskimääräinen vedenkäyttö vaatisi. Täl-

löin myös kitkahäviöt ovat pienemmät. Denian tapauksessa taas vedenjakelujärjestelmä on todennäköisesti mitoitettu vain kotitalouksien vedenkäytölle, joten putkikoot ovat pienempiä ja täten kitkahäviöt suurempia ja järjestelmän energiatehokkuus matalampi kuin kanadalaisissa ja suomalaisissa järjestelmissä. (Hernández et al. 2012; Scanlan & Filion 2015)

Korkea ylimääräisen energian tunnusluku Deniassa selittyy sillä, että alueella korkeuserot ovat suurempia kuin muissa esiteltyissä vedenjakelujärjestelmissä. Korkeimmalla ja matalimmalla sijaitsevien vedenkäyttäjien korkeusero on 180 metriä, kun taas kanadalaisista järjestelmistä suurin korkeusero on 57 metriä systeemissä C. (Hernández et al. 2012; Scanlan & Filion 2015)

## 6. JOHTOPÄÄTÖKSET

Tässä työssä tutkittiin suomalaisten vedenjakelujärjestelmien energiankäyttöä verkostomallinnuksella laaditun energiataseanalyysin avulla ja tuloksena saatiin yleiskuva järjestelmien energiankäytöstä. Suomalaisissa vedenjakelujärjestelmissä käytetään sähköä 0,45–0,50 kWh/m<sup>3</sup>. Energiankäyttöön vaikuttaa suuresti vedenjakelujärjestelmän rakenne, johon ei yleensä ole kaupunkirakenteesta ja pinnanmuodoista johtuen mahdollista vaikuttaa merkittävästi. Vedenjakelujärjestelmien osat ovat pitkäaikaisia investointeja, joilla on kauaskantoiset vaikutukset, ja monesti on käytössä vesilaitosten historiaan liittyvistä syistä johtuvia tehottomia ratkaisuja.

Tulosten perusteella yleisimmin suomalaisten vedenjakelujärjestelmien energiatehokkuutta heikentävät liian korkeat paineet vedenkäyttäjillä ja kitkahäviöt verkostoissa etenkin raakavedenotossa. Laajoissa verkostoissa, joissa vedenkäyttö on suurta ja vedentuotanto tapahtuu verkoston äärilaidalla, esiintyy eniten kitkahäviöitä. Vuotoenergian määrä vaihteli verkostojen kesken. Pumpkauksen hyötysuhde puolestaan on suomalaisissa vedenjakelujärjestelmissä yleensä hyvä, varsinkin suurissa painepiireissä.

Vaikka rakenteelliset seikat vaikuttavat vedenjakelujärjestelmien energiankäyttöön kunkin verkoston kohdalla omalla tavallaan, ovat eri verkostojen energiatehokkuuden painepiirikohtaiset tunnusluvut yllättävän samankaltaisia. Suurten painepiirien osalta energiatehokkuuden tunnusluvusta ominaisenergiankäyttö on yhtä poikkeusta lukuun ottamatta hyvin tasaista. Suurta hajontaa esiintyy lähinnä pienemmissä painepiireissä, joissa energiankulutukseen voi vaikuttaa painepiirin läpi toisiin painepiireihin toimitettavat suuret määrät vettä. Suurimman eron eri järjestelmien tuloksiin tekeekin raakavedenotto.

Osassa tutkituista järjestelmistä vesilähteet sijaitsevat kaukana vedenkäytöstä, jolloin vettä joudutaan pumppaamaan pitkiä matkoja kaivoilta vesilaitoksille, kuten Joensuussa. Kaivopumppausten hyötysuhteiden on oltava hyvät ja putkikoon sellainen, että vedenotossa ei synny tarpeettoman paljon kitkahäviöitä. Työn tulokset vaikuttavat siltä, ettei kaivopumppujen energiatehokkuuteen ole kiinnitetty niin paljon huomiota kuin muihin pumppauksiin ja tässä olisikin parantamisen varaa.

Vaikka pumppauksen hyötysuhde tutkituissa verkostoissa oli yleisesti ottaen hyvä, etenkin suuremmissa painepiireissä, niin tehottomiakin pumppauksia löytyi. Näiden tehottomien pumppausten huono hyötysuhde johtui usein ylimitoituksesta, jolla on haluttu varautua johonkin poikkeustilanteeseen, kuten vakavaan häiriöön vesilaitoksella tai sammutusveden tarpeeseen. Pumput kannattaisi mitoittaa kuitenkin normaalitilantee-

seen, jolloin suurimman osan aikaa toimittaisiin hyvällä hyötysuhteella. Poikkeustilanteeseen varautumiseksi voisi olla varalla suurempi pumppu.

Energiatehokkuuden tunnuslukujen valossa energiatehokkuus on heikoin pienissä painepiireissä, joiden läpi toimitetaan suuria määriä vettä toisiin painepiireihin. Näiden painepiirien energiatasearkasteluissa tulisikin erottaa painepiiristä lähtevä potentiaalienergia painepiirissä käytetystä energiasta jotta saataisiin todenmukaisempi kuva itse painepiirin energiankäytöstä. Toisaalta koko verkoston tasolla näiden painepiirien huonompi tulos kertoo verkoston hyötysuhteesta.

Työn tulosten vertailu tieteellisissä artikkeleissa esitelyihin tuloksiin kertoo, että suomalaisten vedenjakelujärjestelmien energiatase on hyvin samankaltainen kanadalaisten vedenjakelujärjestelmien kanssa. Verrattaessa espanjalaiseen järjestelmään, suomalaisten järjestelmien energiatehokkuus on parempi kaikkien energiatehokkuuden tunnuslukujen valossa.

Verkostomallinnuksella tehtävä vedenjakelujärjestelmän energiatase on menetelmä, jolla voidaan arvioida vedenjakelujärjestelmän energiankäyttöä ja energiatehokkuutta kokonaisvaltaisesti. Kokonaisuus paljastaa, millä osa-alueella energiankäyttö on suurta ja voidaan kohdennetusti etsiä suurimpia energiankäyttäjiä. Energiatase on sopiva työkalu päätöksenteon tueksi vedenjakelujärjestelmän energiatehokkuuden parantamisessa. Menetelmä on sovellettavissa kaikille vedenjakelujärjestelmille, joista on tarpeeksi tietoa saatavilla kattavan verkostomallin rakentamiseksi.

Tässä työssä kuvatun kaltaista energiataselaskentaa voisi soveltaa myös muihin verkostoihin. Jätevesiverkoston energiataseessa vedenkäsittelyprosessin osuus energiankäytöstä tulisi ottaa tarkemmin käsittelyyn, sillä jätevedenkäsittelyprosessin vaiheet ovat hyvin energiantensiivisiä, etenkin jäteveden ilmastus. Kaukolämpöverkoston energiataseen laskennassa pitäisi puolestaan ottaa huomioon lämpöön ja lämmönsiirtoon liittyviä tekijöitä.

## LÄHTEET

- Aranto, N., 2008. *Competitor comparison: Variable Speed Drives In Pumping Applications*. Lappeenranta University of Technology. 100 p. Saatavissa: <https://www.doria.fi/bitstream/handle/10024/38120/nbnfi-fe200805161399.pdf?sequence=3>
- Bolognesi, a., Bragalli, C., Lenzi, C. & Artina, S., 2014. Energy efficiency optimization in water distribution systems. *Procedia Engineering*, 70, pp.181–190.
- Cabrera, E., Gomez, E., Cabrera Jr., E., Soriano, J. & Espert, V., 2014. Energy Assessment of Pressurized Water Systems. *Journal of Water Resources Planning and Management*, pp.1–12.
- Cabrera, E., Pardo, M. a., Cobacho, R. & Cabrera, E., 2010. Energy Audit of Water Networks. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 136(6), pp.669–677.
- EPRI, 2002. Water & Sustainability (Volume 4): U.S. Electricity Consumption for Water Supply & Treatment - The Next Half Century. *Water Supply*, 4(Volume 4), p.93.
- Fox, R.W. & McDonald, A.T., 1994. *Introduction to Fluid Mechanics* Fourth Edi., John Wiley & Sons, Inc. 781 p.
- Grundfos, 2015. CR 32-3-pumppu, tekniset tiedot. Saatavissa: [https://product-selection.grundfos.com/product-detail.html?application=&area=&family=&from\\_suid=144671129724306757943793199956&installation=&pumpsystemid=54662567&scenario=Catalogue&step=3&subtype=CR%2B32-3&type=CRFAM&qcid=57351086](https://product-selection.grundfos.com/product-detail.html?application=&area=&family=&from_suid=144671129724306757943793199956&installation=&pumpsystemid=54662567&scenario=Catalogue&step=3&subtype=CR%2B32-3&type=CRFAM&qcid=57351086)
- Hernández, E., Pardo, M.A., Cabrera, E. & Cobacho, R., 2012. Energy assessment of water networks: A case study. In *12th Annual International Conference on Water Distribution Systems Analysis 2010, WDSA 2010*. pp. 1168–1179.
- Kaya, D., Yagmur, E.A., Yigit, K.S., Kilic, F.C., Eren, a. S. & Celik, C., 2008. Energy efficiency in pumps. *Energy Conversion and Management*, 49(6), pp.1662–1673.
- Kuronen, M., 2014. *Energiatohokkuuden parantaminen talousveden jakelussa*. Aalto University. 92 s.  
Saatavissa: [https://aaltodoc.aalto.fi/bitstream/handle/123456789/14795/master\\_Kuronen\\_Mika\\_2014.pdf?sequence=1](https://aaltodoc.aalto.fi/bitstream/handle/123456789/14795/master_Kuronen_Mika_2014.pdf?sequence=1)
- Lingsten, A. & Lundkvist, M., 2008. *Nulägesbeskrivning av VA- verkens energianvändning*, Svenskt Vatten AB, 36 s.

- Mamade, A., Sousa, C., Marques, A., Loureiro, D., Alegre, H. & Covas, D., 2015. Energy Auditing as a Tool for Outlining Major Inefficiencies: Results from a Real Water Supply System. *Procedia Engineering*, 119, pp.1098–1108.
- Nogueira Vilanova, M.R. & Perrella Balestieri, J.A., 2014. Energy and hydraulic efficiency in conventional water supply systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 30, pp.701–714.
- Pulli, M., 2012. Energiatohokkuus vesien siirrossa. *Vesitalous*, 1, pp.32–37.
- Pulli, M., 2009. Virtaustekniikka: Vedensiirtojärjestelmien toiminnallinen suunnittelu nykyaikaisin menetelmin 1. painos, Tammertekniikka. 248 s.
- Rossman, L. a, 2000. EPANET 2: users manual. Cincinnati US Environmental Protection Agency National Risk Management Research Laboratory, 38(September), p.200.
- Scanlan, M. & Fillion, Y.R., 2015. Application of Energy Use Indicators to Evaluate Energy Dynamics in Canadian Water Distribution Systems. *Procedia Engineering*, 119, pp.1039–1048.
- Simon, A.L., 1976. *Practical Hydraulics*, John Wiley & Sons, Inc. 304 p.
- Sunela, M., 2010. *Vedenjakeluverkoston automaation mallintaminen*. Tampereen teknillinen yliopisto. 93 s. Saatavissa: <http://URN.fi/URN:NBN:fi:tty-201010141339>
- Sunela, M.I. & Puust, R., 2015a. Modeling water supply system control system algorithms. *Procedia Engineering*, 119, pp.734–743.
- Sunela, M.I. & Puust, R., 2015b. Real time water supply system hydraulic and quality modeling – a case study. *Procedia Engineering*, 119, pp.744–752.
- Sunela, M.I. & Puust, R., 2014. Simple Visual Tool to Analyse Pump Battery Efficiencies for Various Pump Combinations. *Procedia Engineering*, 89, pp.525–532.
- Tolvanen, J., 2008. Saving energy with variable speed drives. *World Pumps*, 2008(501), pp.32–33.
- Tukiainen, T., 2009. *Vesihuoltolaitosten kasvihuonekaasupäästöt Suomessa*. Teknillinen Korkeakoulu. 139 s.
- Tuusulan seudun vesilaitos kuntayhtymä, 2014. *Vuosikertomus 2014*. Saatavissa: <http://www.tsvesi.fi/assets/TSVvk2014net.pdf>
- Walski, T., Chase, D., Savic, D., Grayman, W., Beckwith, S. & Koelle, E., 2003. *Advanced Water Distribution Modeling and Management* First Edit., Haestad Methods.

Vogelesang, H., 2008. An introduction to energy consumption in pumps. *World Pumps*, (496), pp.28–31.

Volk, M., 2005. *Pump Characteristics and Applications* Second Edi., Columbus, Ohio: CRC Press. 525 p.

Young, D., Munson, B., Okiishi, T. & Huebsch, W., 2007. *A brief introduction to fluid mechanics*, John Wiley & Sons, Inc. 502 p.



	Ata- la	%	Hal- lila	%	Her- van- ta	%	Kaup- pi	%	Koi- vis- ton- kylä	%	Pirk- kala	%	Pyy- nikki	%	Teso- so- ma	%	Ylä- Rus- ko	%
Pumppujen moot- tori- ja taajuus- muuttajahäviöt	56	16	15	17	82	10	838	11	41	12	16	14	164	23	229	11	85	6
Sähköenergia järjestelmään	351	100	91	100	805	100	7901	100	347	100	107	100	713	100	2012	100	1334	100
Laskutettu veden- käyttö	1690	78	330	87	4223	94	20888	88	2250	89	2581	78	3719	87	5172	83	4860	99
Vuotovesimäärä	469	22	50	13	290	6	2936	12	267	11	739	22	559	13	1092	17	59	1
Kokonaisveden- käyttö	2159	100	380	100	4513	100	23824	100	2518	100	3320	100	4278	100	6265	100	4919	100
Hydraulinen koko- naishyötysuhde		57		76		75		31		63		53		48		52		80
Sähköhyötysuhde		116		101		152		41		153		401		90		59		76
Ominaisenergian- käyttö (laskutetulle vedenkäytölle)	0.42		0.37		0.39		0.50		0.37		0.31		0.36		0.44		0.26	
Ominaisähkön- käyttö (laskutetulle vedenkäytölle)	0.21		0.28		0.19		0.38		0.15		0.04		0.19		0.39		0.27	
Ominaisenergia	0.33		0.32		0.36		0.44		0.33		0.24		0.31		0.36		0.26	
Ominaisähkön- käyttö	0.16		0.24		0.18		0.33		0.14		0.03		0.17		0.32		0.27	



	Hy-rylä	%	Jo-kela	%	Jär-venpää	%	Kello-koski	%	Ke-rava	%	Laak-so	%	Nik-kiä	%	Poh-jois-Sipoo	%	Söder-kulla	%	Tal-ma	%
Pumppujen moottori- ja taa-juusmuuttajahä-viöt	48	8	42	10	55	15	23	13	12	10	213	9	27	30	31	14	2	14	0	
Sähköenergia järjestelmään	620	10	412	10	380	10	172	10	125	10	2406	10	91	10	216	10	11	10	0	10
Laskutettu ve- denkäyttö	231	83	881	96	5024	89	617	89	8344	95	581	62	660	92	135	83	1656	90	128	82
Vuotovesimäärä	475	17	40	4	599	11	80	11	398	5	350	38	54	8	28	17	182	10	29	18
Kokonaisveden- käyttö	278	10	921	10	5623	10	697	10	8742	10	931	10	714	10	163	10	1838	10	156	10
Hydraulinen kokonaishyö- tysuhde		74		72		66		50		56		4		17		11		62		7
Sähköhyötysuh- de		99		61		32		96		13		8		10		14		21		96
Ominaisenergia (laskutettu)	0.36		0.40		0.38		0.53		0.36		8.19		0.84		2.09		0.24		3.22	
Ominaisähkön- käyttö (laskutet- tu)	0.27		0.47		0.08		0.28		0.02		4.14		0.14		1.61		0.01		0.00	
Ominaisenergia	0.30		0.38		0.34		0.47		0.35		5.11		0.78		1.72		0.22		2.63	
Ominaisähkön- käyttö	0.22		0.45		0.07		0.25		0.01		2.58		0.13		1.33		0.01		0.00	

## LIITE C: JOENSUUN PAINAPIIRIEN ENERGIATASEEN TULOKSET

	Heinä- nä- vaara	%	Kes- kusta itä	%	Kes- kusta länsi	%	Kiihte- lysvaara	%	Kukko- la	%	Mar- jala	%	Nap- pikuja	%	Nol- jakka	%
Vaadittu energia	26	22	367	37	444	39	38	86	109	55	20	56	6	54	82	18
Ylijäämäenergia	13	11	228	23	356	31	5	12	64	32	15	44	5	45	51	11
Vuotoenergia	0	0	103	11	101	9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Kitkaenergia	19	16	42	4	18	2	1	1	15	8	0	0	0	1	3	1
Varastoenergia	0	0	31	3	0	0	0	0	2	1	0	0	0	0	0	0
Lähtävä potentiaa- lienergia	60	51	208	21	217	19	0	0	8	4	0	0	0	0	312	70
Kokonaisenergian- käyttö	118	100	979	100	1135	100	44	100	199	100	35	100	12	100	448	100
Tuleva potentiaa- lienergia	50	42	758	88	549	43	38	87	144	72	38	100	8	71	52	12
Energiavajaus	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Pumppujen tuottama hydraulinen energia	68	58	100	12	715	57	6	13	57	28	0	0	3	29	390	88
Kokonaisenergia järjestelmään	118	100	858	100	1264	100	44	100	201	100	38	100	12	100	443	100
Pumppujen tuottama hydraulinen energia	68	34	100	51	715	53	6	29	57	31	0		3	20	390	37
Pumppujen hydrauliset häviöt	112	57	74	37	547	41	4	20	88	49	0		11	66	606	57
Pumppujen moottori- ja taajuusmuuttaja- häviöt	18	9	24	12	78	6	10	52	36	20	0		2	14	72	7

	Heinä- nä- vaara	%	Kes- kusta itä	%	Kes- kusta länsi	%	Kiihte- lysvaara	%	Kukko- la	%	Mar- jala	%	Nap- pikuja	%	Nol- jakka	%
Sähköenergia järjes- telmään	198	100	198	100	1340	100	19	100	182	100	0	100	17	100	1069	100
Laskutettu veden- käyttö	122	100	2944	83	4106	87	126	100	913	100	207	100	44	100	784	100
Vuotovesimäärä	0	0	600	17	590	13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Kokonaisvedenkäyt- tö	122	100	3544	100	4697	100	126	100	913	100	207	100	44	100	784	100
Hydraulinen koko- naishyötysuhde		22		43		35		86		54		52		54		19
Sähköhyötysuhde		13		185		33		678		60				37		8
Ominaisenergian- käyttö (laskutetulle vedenkäytölle)	26	22	367	37	444	39	38	86	109	55	20	56	6	54	82	18
Ominaisähkönkäyt- tö (laskutetulle ve- denkäytölle)	13	11	228	23	356	31	5	12	64	32	15	44	5	45	51	11
Ominaisenergian- käyttö	0	0	103	11	101	9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Ominaisähkönkäyt- tö	19	16	42	4	18	2	1	1	15	8	0	0	0	1	3	1



	<b>Harjuniitty</b>	<b>%</b>	<b>Kankaantaka</b>	<b>%</b>	<b>Nokia keskusta</b>	<b>%</b>	<b>Siuro</b>	<b>%</b>	<b>Takalauttala</b>	<b>%</b>	<b>Vesitorninmäki</b>	<b>%</b>
Laskutettu vedenkäyttö	71	95	79	56	2696	76	413	100	283	100	13	79
Vuotovesimäärä	4	5	63	44	840	24	1	0	0	0	3	21
Kokonaisvedenkäyttö	75	100	141	100	3535	100	414	100	283	100	17	100
Hydraulinen kokonaishyötysuhde		77		60		52		10		89		76
Sähköhyötysuhde		74		229		74		7		44		101
Ominaisenergiankäyttö (laskutetulle vedenkäytölle)	0.40		0.78		0.51		1.38		0.33		0.52	
Ominais sähkönkäyttö (laskutetulle vedenkäytölle)	0.42		0.21		0.36		1.90		0.66		0.38	
Ominaisenergiankäyttö	0.38		0.44		0.39		1.37		0.33		0.41	
Ominais sähkönkäyttö	0.39		0.11		0.27		1.90		0.66		0.30	

## LIITE E: IMATRAN PAINAPIIRIEN ENERGIATASEEN TULOKSET

	Karhu- hu- mäki	%	Kurk- vuori	%	Saari- lampi	%	Tuuli- kallio	%
Vaadittu energia	56	59	55	60	129	62	544	55
Ylijäämäenergia	22	23	17	19	41	20	271	28
Vuotoenergia	17	18	15	17	37	18	156	16
Kitkaenergia	0	0	11	12	1	0	18	2
Varastoenergia	0	0	-7	-8	0	0	-88	-9
Lähtevä potentiaa- lienergia	0	0	0	0	0	0	77	8
Kokonaisenergian- käyttö	96	100	91	100	207	100	980	100
Tuleva potentiaa- lienergia	77	81	22	25	207	100	312	32
Energiavajaus	0	0	0	0	0	0	0	0
Pumppujen tuottama hydraulinen energia	19	19	68	75	0	0	668	68
Kokonaisenergia järjestelmään	96	100	91	100	207	100	980	100
Pumppujen tuottama hydraulinen energia	19	49	68	64	0		668	62
Pumppujen hydrauliset häviöt	10	25	28	26	0		312	29
Pumppujen moottori- ja taajuusmuuttaja- häviöt	10	26	11	10	0		93	9
Sähköenergia järjes- telmään	38	100	107	100	0	100	1072	100
Laskutettu veden- käyttö	227	78	238	79	591	78	3051	81
Vuotovesimäärä	63	22	64	21	169	22	718	19
Kokonaisvedenkäyt- tö	290	100	302	100	760	100	3769	100
Hydraulinen koko- naishyötysuhde		59		60		62		55
Sähköhyötysuhde		147		51				51
Ominaisenergian- käyttö (laskutetulle vedenkäytölle)	0.42		0.38		0.35		0.32	
Ominais sähkönkäyt- tö (laskutetulle ve- denkäytölle)	0.17		0.45		0.00		0.35	
Ominaisenergian- käyttö	0.33		0.30		0.27		0.26	
Ominais sähkönkäyt- tö	0.13		0.35		0.00		0.28	

