

Opinnäytetyö (AMK)

Rakennustekniikan koulutusohjelma

Infratekniikka

2017

Eija Rantala

**LIEDON
VESIJOHTOVERKOSTON
TOIMINNAN TARKASTELU
HÄIRIÖTILANTEISSA
VERKOSTOMALLINNUKSEN
AVULLA**

TURKU AMK 
TURKU UNIVERSITY OF
APPLIED SCIENCES

Eija Rantala

LIEDON VESIJOHTOVERKOSTON TOIMINNAN TARKASTELU HÄIRIÖTILANTEISSA VERKOSTOMALLINNUKSEN AVULLA

Koska talousvesi on merkittävässä asemassa ihmisten jokapäiväistä elämää, on vesijohtoverkoston toimintavarmuudella suuri merkitys. Verkoston toimintavarmuuden parantamiseksi on kartoitettava ensin riskit, jotka vaikuttavat verkoston toimintaan. Vesijohtoverkoston toiminnalliseen tarkasteluun on kehitetty sovelluksia, joilla vesijohtoverkostosta voidaan rakentaa verkostomalli.

Verkostomalli on työkalu, jonka avulla voidaan tarkastella järjestelmän toimintaa ilman, että varsinaisella järjestelmällä tehdään kokeita. Vesijohtoverkostosta rakennetun mallin avulla voidaan esimerkiksi tehdä häiriötilanteiden analysointia, jossa tarkastellaan vesijohtoverkoston toimintaa, kun jokin verkoston osa rikkoutuu.

Opinnäytetyössä tarkastellaan Liedon kunnan vesijohtoverkoston toimintavarmuutta häiriötilanteissa. Häiriötilanteilla tarkoitetaan vesijohdon vaurioitumista. Mallinnuksen avulla simuloitujen häiriötilanteiden kohdistettu vesijohtoverkoston runkolinjoihin, sillä näiden vaurioitumisella voidaan olettaa olevan merkittäviäkin vaikutuksia verkoston toimintaan. Työn tavoitteena on selvittää häiriötilanteiden vaikutukset sekä kehittää tapoja, joilla näissä tilanteissa voidaan parantaa verkoston toimintavarmuutta. Erityisesti haluttiin tarkastella syksyllä 2017 suunniteltujen uusien vesijohtolinjojen merkitystä verkoston toimintavarmuuden kannalta.

Mallinnuksessa havaittiin, että nykytilanteessa verkoston runkolinjojen vaurioitumisella on merkittävä vaikutus verkoston toimintaan. Mallinnuksen tuloksien avulla voidaan todeta, että suunnitellut uudet vesijohtolinjat parantaisivat vesijohtoverkoston toimintaa merkittävästi häiriötilanteissa.

ASIASANAT:

vesijohtoverkosto, verkostomalli, toimintavarmuus

BACHELOR'S THESIS | ABSTRACT

TURKU UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Civil Engineering | Community Infrastructure Engineering

2017 | 48

Instructor : Pirjo Oksanen, M.Sc (Eng)

Eija Rantala

AN OPERATIONAL REVIEW OF LIETO MUNICIPALITY WATER DISTRIBUTION NETWORK DURING FAULT SITUATIONS, USING DISTRIBUTION SYSTEM MODELLING

Domestic water has a major impact on people's everyday lives. Therefore, the reliability of the water distribution network has great significance. Determining the risks affecting the distribution network is necessary for improving the reliability of the network. Many applications have been developed to review the operation of water distribution networks and with them a distribution system model can be created.

A distribution system model is a tool for reviewing the system operation without having to perform tests with the actual system. With a model created from a water distribution network one can, for example, analyze how the network operates when a part of it breaks or in other fault situations.

This thesis examines the reliability of Lieto municipality water distribution network in fault situations. All fault situations in this thesis picture a damaged water pipe. The simulated fault situations target the main lines of the distribution system because faulty main lines can cause significant issues to the operation of the network. The goal of this thesis was to determine effects of the faults and develop means for improving the water distribution network reliability in such situations. The focus was especially on the significance of new pipelines, planned in the fall of 2017 on the overall reliability of the entire network.

With the modelling it became clear that damage to the current main lines has a major impact on the operation of the network. The planned pipelines will improve the reliability of the water distribution system significantly as can be seen in the results of the modelling.

KEYWORDS:

water distribution system, distribution system model, reliability

SISÄLTÖ

1 JOHDANTO	7
2 VESIJOHTOVERKOSTO	9
2.1 Vesijohtoverkoston toiminta ja rakenne	9
2.2 Hydrauliiikka	10
2.3 Vesijohtoverkoston toimintahäiriöt	14
3 VERKOSTOMALLINUS	18
3.1 Verkostomallin rakentaminen	18
3.2 Simulointi	21
4 LIEDON KUNNAN VESIJOHTOVERKOSTO JA VERKOSTOMALLI	22
4.1 Vesijohtoverkosto	22
4.2 Verkostomalli	25
5 LIEDON KUNNAN VESIJOHTOVERKOSTON TOIMINNALLINEN TARKASTELU	27
5.1 Häiriötilanteiden simulointi	27
5.2 Liedon vesijohtoverkoston nykytila	29
5.3 Häiriötilanne 1	33
5.4 Häiriötilanne 2	36
5.5 Häiriötilanne 3	38
5.6 Laakkari–Liedon keskustan vesijohdon vaikutus häiriötilanteisiin	41
6 JOHTOPÄÄTÖKSET	46
LÄHTEET	48

KAAVAT

Kaava 1. Reynoldsin luku.	11
Kaava 2. Virtausnopeus.	11
Kaava 3. Jatkuvuuden yhtälö.	11
Kaava 4. Energiakorkeus.	12
Kaava 5. Bernoullin yhtälö.	12
Kaava 6. Bernoullin yhtälö, kun virtaushäviö huomioidaan.	12
Kaava 7. Hazen-Williamsin yhtälö.	13

Kaava 8. Manningin yhtälö.	13
Kaava 9. Darcy-Weisbachin yhtälö.	13
Kaava 10. Kitkakerroin laminaarisessa virtauksessa.	13
Kaava 11. Colebrook-Whiten yhtälö.	14
Kaava 12. Paikallishäviö.	14
Kaava 13. Painevaatimus kiinteistön kohdalla katujohdossa.	14

KUVAT

Kuva 1. Reynoldsin luonnokset laminaarisesti ja turbulentsesti virtaustilasta.	10
Kuva 2. Tarvittavan painetasen määräytyminen kiinteistössä.	15
Kuva 3. Esimerkki verkostomallista.	18
Kuva 4. Rakennevaihtoehdot verkostomallille.	19
Kuva 5. Vesijohtoverkoston päävirtausreitit Laakkarin sekä Mustavuoren alavesisäiliöiltä.	23
Kuva 6. Suunniteltu yhdysvesijohto Laakkarilta Liedon asemalle sekä vesijohto Laakkarin alavesisäiliöltä Liedon keskustaan.	24
Kuva 7. Liedon verkostomallinnukseen käytetyt vedenkulutusjakaumat.	26
Kuva 8. Painemittareiden sijainnit.	28
Kuva 9. Tarkasteltavat häiriötilanteet.	29
Kuva 10. Nykytilanne. Keisvuoren ylävesisäiliön vedenpinnan korkeus.	30
Kuva 11. Nykytilanne. Virtaama Laakkarilta.	30
Kuva 12. Nykytilanne. Tarvasjoen ylävesisäiliön vedenpinnan korkeus.	31
Kuva 13. Nykytila. Alimmat verkostopaineet.	32
Kuva 14. Nykytila. Korkeimmat verkostopaineet.	33
Kuva 15. Häiriötilanne 1.	33
Kuva 16. Häiriötilanne 1. Keisvuoren ylävesisäiliön vedenpinnan korkeus.	34
Kuva 17. Häiriötilanne 1. Virtaama Laakkarilta.	35
Kuva 18. Häiriötilanne 1. Paine Liedon keskustan mittauspisteessä.	35
Kuva 19. Häiriötilanne 2.	36
Kuva 20. Häiriötilanne 2. Keisvuoren ylävesisäiliön vedenpinnan korkeus.	36
Kuva 21. Häiriötilanne 2. Alimmat verkostopaineet.	37
Kuva 22. Häiriötilanne 2. Virtaama Laakkarilta.	37
Kuva 23. Häiriötilanne 2. Paine Littoisten mittauspisteessä.	38
Kuva 24. Häiriötilanne 3.	38
Kuva 25. Häiriötilanne 3. Keisvuoren ylävesisäiliön vedenpinnan korkeus.	39
Kuva 26. Häiriötilanne 3. Alimmat verkostopaineet.	39
Kuva 27. Häiriötilanne 3. Virtaama Laakkarilta.	40
Kuva 28. Häiriötilanne 3. Paine Littoisten mittauspisteessä.	41
Kuva 29. Häiriötilanne 2. Keisvuoren ylävesisäiliön vedenpinnan korkeus, kun uusi yhdysvesijohto on käytössä.	42
Kuva 30. Häiriötilanne 2. Virtaama Laakkarilta, kun uusi vesijohto on käytössä.	42
Kuva 31. Alimmat paineet häiriötilanteessa 2, kun a) uusi vesijohto on käytössä ja b) ilman vesijohtoa.	43
Kuva 32. Häiriötilanne 3. Keisvuoren ylävesisäiliön vedenpinnan korkeus, kun uusi vesijohto on käytössä.	44
Kuva 33. Häiriötilanne 3. Virtaama Laakkarilta, kun uusi vesijohto on käytössä.	44
Kuva 34. Alimmat paineet häiriötilanteessa 3, kun a) uusi vesijohto on käytössä ja b) ilman vesijohtoa.	45

TAULUKOT

Taulukko 1. Vuotoreiästä virrannut vesimäärä, kun paine putkessa on 500 kPa.	16
Taulukko 2. Mallintamisen tulosten luotettavuuteen vaikuttavia tekijöitä.	20

1 JOHDANTO

Veden saanti on välttämätön edellytys ihmisille sekä lukuisille muille yhteiskunnan toiminnolle, esimerkiksi teollisuudelle. Toimivalla vesihuollolla onkin merkittävä rooli yhteiskunnassa, mutta sen merkitys usein korostuu vasta tilanteissa, joissa vedenjakelu ei toimi häiriöttä.

Suomessa vesijohtoverkoston toimintavarmuus on yleisesti hyvällä tasolla, mutta vesijohtoverkoston ikääntyessä riski vesijohtoverkoston vaurioitumiseen kasvaa. Vaurioiden kestoja sekä alueellisten vaikutusten merkitystä on vaikea arvioida, sillä ne riippuvat vesijohtoverkoston rakenteesta sekä laitoksen valmiudesta. (Vikman & Arosilta 2006, 31.) Vesijohtoverkostot ovat laajoja kokonaisuuksia, jotka saattavat sisältää jopa tuhansia putkia ja laitteita, joten niiden toiminnallinen tarkastelu on usein käsin laskemalla mahdotonta (Hyde 2004, 1).

Vesijohtoverkoston toiminnalliseen tarkasteluun voidaan hyödyntää verkostomallia. Verkostomalli on työkalu, jonka avulla vesijohtoverkoston toimintaa voidaan tarkastella ilman, että varsinaisella vesijohtoverkostolla tehdään kokeita. Järjestelmästä rakennettua mallia tarvitaan, kun itse järjestelmällä tehtävät kokeet on mahdoton toteuttaa. Tällaisia tilanteita ovat sellaiset, joissa kokeiden tekeminen varsinaisella järjestelmällä on liian kallista, vaarallista tai järjestelmää ei ole olemassa. (Ljung & Glad 1994, 14.)

Vesijohtoverkostosta rakennettua mallia voidaan hyödyntää esimerkiksi uuden verkoston rakenteen ja putkikokojen määrittelyyn, veden laadun tarkasteluun sekä olemassa olevan verkoston häiriötilanteiden analysointiin. Häiriötilanteiden analysoinnissa tarkastellaan verkoston toimintaa, kun jokin verkoston osa tai laite rikkoutuu. (Hyde 2004, 5–6) Nykyaikaisten mallintamisohjelmien avulla voidaan tutkia hyvin monimutkaisia, ajan ja paikan funktiona tapahtuvia tilanteita. Kaikki järjestelmän komponentit pystytään mallintamaan huomioiden lähes kaikki laitteisiin liittyvät toimintaparametrit ja funktiot. (Pulli 2009, 144.)

Tämän opinnäytetyön tavoitteena on tarkastella Liedon kunnan vesijohtoverkoston toimintaa häiriötilanteissa verkostomallinnussovelluksen avulla. Työn tilaajana on Liedon Vesi, joka vastaa Liedon kunnan vesihuollosta. Tässä työssä häiriötilanteilla tarkoitetaan putkirikkojen seurauksena syntyviä vuotoja. Työ on rajattu siten, että häiriötilanteiden

tarkastelu tehdään verkoston suurimmissa runkolinjoissa. Työn tavoitteena on myös esittää mahdollisia toimenpiteitä, joilla verkoston toimintavarmuutta voitaisiin parantaa. Eri-tyisesti kiinnitetään huomioita syksyllä 2017 suunniteltujen uusien vesijohtolinjojen vaikutuksiin verkoston toimintavarmuuden kannalta.

2 VESIJOHTOVERKOSTO

2.1 Vesijohtoverkoston toiminta ja rakenne

Vesijohtoverkoston kuuluvat kaikki rakenteet ja laitteet, joiden avulla saadaan toimitettua vettä käyttäjille. Vesijohtoverkosto varusteineen muodostaa yhdessä paineenkorotusosiemien, vesisäiliöiden sekä painesäiliöiden kanssa vedenjakelujärjestelmän. (RIL 2003, 41.)

Vedenjakelujärjestelmän toiminta perustuu painetasoon, jonka tulee olla jatkuvasti kaikkien käyttöpisteiden yläpuolella. Tällöin verkoston kaikissa osissa vedenpaine on riittävä nostamaan veden jokaiseen käyttöpisteeseen. (RIL 2010, 109.) Vedenkäyttäjien kannalta paine on yksi tärkeä asia veden riittävyden ja laadun lisäksi (RIL 2003, 27).

Painetaso verkostossa vaihtelee vedenkulutuksesta riippuen. Öisin painetaso on jakelujärjestelmään liitetyn ylävesisäiliön pinnan korkeudella, koska veden käyttö on hyvin pientä. Kun veden käyttömäärät lisääntyvät päivisin, painetaso laskee painehäviöiden vuoksi. Painetason lasku on siis sitä suurempaa, mitä enemmän veden käyttö kasvaa. Runkojohtojen painetta säädellään paineenkorotusosiemien avulla, jotka ovat toiminnassa, kun runkojohtojen paine laskee määritellyn tason alapuolelle. (RIL 2003, 45.)

Joissakin tilanteissa jakelualueen korkeuserot voivat olla suuria, jolloin verkko joudutaan jakamaan erillisiin painevyöhykkeisiin. Näillä painevyöhykkeillä on oma painetasonsa, joka ei riipu muiden vyöhykkeiden painetasoista. (RIL 2010, 109.)

Yksi vesijohtoverkoston toimintavarmuuteen merkittävästi vaikuttava tekijä on verkoston rakenne. Vesijohtoverkosto voidaan rakentaa joko kierto- tai haarajärjestelmänä. Kiertojärjestelmässä verkosto muodostaa silmukoita, jolloin vesi johdetaan tiettyyn pisteeseen vähintään kahdesta suunnasta. Kiertojärjestelmässä veden jakelu pystytään turvaamaan helpommin putkirikko-tilanteissa. Haarajärjestelmässä verkosto muodostuu puumaisista osista, ja verkostossa on umpiperiä. Näihin umpiperiin ei pystytä turvaamaan veden jakelua vikatilanteissa, sillä vesi kulkee käyttäjille vain yhtä linjaa pitkin. (RIL 2004, 296.)

Verkosto pyritään kustannukset huomioiden rakentamaan kiertojärjestelmänä, mutta todellisuudessa vesijohtoverkosto on yhdistelmä kierto- ja haarajärjestelmästä. Varsinkin haja-asutusalueilla verkosto usein rakennetaan haarajärjestelmänä, sillä kustannusten

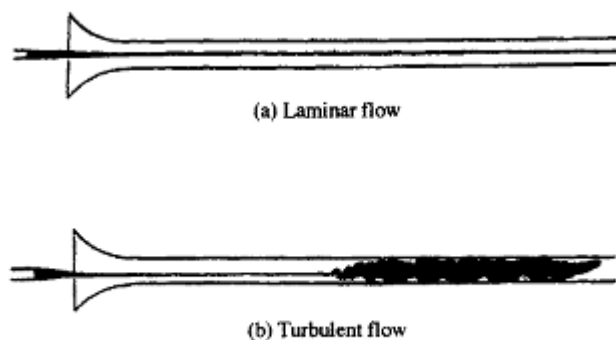
ja maankäytön kannalta silmukkamaisen verkoston rakentaminen on haastavaa. (RIL 2004, 296.)

2.2 Hydraulikka

Virtaustiloja voidaan jaotella esimerkiksi laminaarisiiin ja turbulentiin virtaustiloihin, tasaisiin ja epätasaisiin sekä vakaisiin ja epävakaaisiin. Nämä tilat voivat olla voimassa yhtä aikaa, joten ne eivät ole välttämättä erillisiä tiloja. (Pulli 2009, 19.)

Vakaassa virtaustilassa virtauksen nopeus, paine ja tiheys pysyvät vakioina jokaisessa pisteessä. Jos jokin edellä mainituista tekijöistä virtauksessa muuttuu jollakin ajanhetkellä, on kyseessä epävakaata virtaustila. Esimerkiksi kun hana avataan ja siitä alkaa virtata vettä, on virtaus epävakaata. Kun hana jätetään hetkeksi auki ja vesi virtaa siitä tasaisesti, on virtaus vakaata. (Nakayma & Boucher 1999, 43.)

Laminaarisen ja turbulentin virtauksen määrittely perustuu Osborne Reynoldsin tutkimuksiin (1883). Reynolds käytti tutkimuksissaan laitetta, jossa lasiputkessa virtaavaan veteen sekoitettiin väriainetta. Kun veteen lisättiin väriainetta, virtasi se putkessa nauhana (kuva 1a), mutta virtausnopeuden noustessa tiettyyn pisteeseen alkoi väriaine sekoittua ympäröivään veteen (kuva 1b). Ensimmäistä tilannetta, jossa väriaine virtasi nauhana, kutsutaan *laminaariseksi virtaustilaksi*, ja toista tilannetta, jossa väriaine alkoi sekoittua ympäröivän veden kanssa, kutsutaan *turbulenttiseksi virtaustilaksi*. (Nakayma & Boucher 1999, 45.)



Kuva 1. Reynoldsin luonnokset laminaarisesti ja turbulentiin virtaustilasta (Nakayma & Boucher 1999, 45).

Tutkimuksissaan Reynolds havaitsi, että virtauksen muuttumiseen laminaarisesta turbulenttiseen vaikuttivat virtausnopeus sekä putken halkaisija ja virtaavan aineen viskositeetti (Nakayma & Boucher 1999, 45). Näiden havaintojen perusteella Reynolds kehitti seuraavan kaavan:

$$Re = \frac{dv}{\nu}$$

Kaava 1. Reynoldsin luku (Nakayma & Boucher 1999, 45).

Lukua Re kutsutaan Reynoldsin luvuksi, ja se kuvaa virtausnopeuden v [m/s], putken halkaisijan d [m] sekä veden viskositeetin ν [m²/s] yhteyttä putkelle. Reynoldsin luvun avulla voidaan määrittää, onko virtaus laminaarista vai turbulenttista. Kun Reynoldsin luku saa tietyn arvon, virtaus muuttuu laminaarisesta turbulenttiseksi. Tähän raja-arvoon vaikuttavat esimerkiksi veden lämpötila sekä putken poikkileikkauksen muoto, joten se ei ole vakio. Reynoldsin lukua tarvitaan myös, kun lasketaan kitkahäviökerrointa, joka esitetään myöhemmin tässä luvussa. (RIL 2003, 133–135.)

Virtausnopeus voidaan määrittää putkessa virtaavan veden keskimääräisenä nopeutena (kaava 2). Putken virtausta laskettaessa oletetaan, että putkessa on painetta ja se on täynnä vettä. (RIL 2003, 139.)

$$v = \frac{Q}{A}$$

Kaava 2. Virtausnopeus (RIL 2003, 139).

Kaavassa 2 Q on virtaama [m³/s] ja A on tarkasteltavan poikkileikkauksen pinta-ala [m²] (RIL 2003, 139).

Kun veden ajatellaan olevan kokoonpuristumatonta, on jokaisessa leikkauksessa voimassa jatkuvuuden yhtälö (RIL 2003, 140):

$$Q = Av = A_1v_1 = A_2v_2$$

Kaava 3. Jatkuvuuden yhtälö (RIL 2003, 140).

Oletuksena kaavalle 3 on, että vettä ei oteta missään välissä pois (RIL 2003, 140).

Putkessa virtaavan veden energia koostuu kineettisestä energiasta, paine-energiasta ja potentiaalienergiasta. Kokonaisenergia eli energiakorkeus H (kaava 3) on näiden energioiden summa. (RIL 2003, 138.)

$$H = h + \frac{p}{\gamma} + \frac{v^2}{2g}$$

Kaava 4. Energiakorkeus (RIL 2003, 138).

Kaavassa h on putken korkeusasema [m], γ veden tilavuuspaino [kN/m^3], p putkessa oleva paine [kN/m^2] ja g putoamiskiihtyvyyys [m/s^2]. Energiakorkeuden yksikkö on metriä vesipatsasta [mvp]. (RIL 2003, 138.)

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

Kaava 5. Bernoullin yhtälö (RIL 2003, 138).

Bernoullin yhtälö (kaava 5) kuvaa energioiden summaa kahdessa leikkauksessa, kun virtaushäviöitä ei oteta huomioon (RIL 2003, 138). Jos putkessa tapahtuva virtaushäviö huomioidaan, saa kaava muodon:

$$h_1 + \frac{p_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g} = h_2 + \frac{p_2}{\gamma} + \frac{v_2^2}{2g} + h_f$$

Kaava 6. Bernoullin yhtälö, kun virtaushäviö huomioidaan RIL 2003, 138).

Kaavassa h_f on putkessa tapahtuva virtaushäviö [mvp] tarkastelupisteiden välillä (RIL 2004, 138).

Putkessa tapahtuu putken ja veden välisen kitkan seurauksena energiahäviöitä h_f , jota kutsutaan myös *painehäviöksi*. Painehäviön laskemiseen on useita eri kaavoja: Hazen-Williamsin yhtälö (kaava 7), Manningin yhtälö (kaava 8) sekä Darcy-Weisbachin yhtälö (kaava 9). Näistä yhtälöistä yleisimmin käytetty on Hazen-Williamsin yhtälö, kun laskeaan painehäviöitä vesijohtoverkoissa ja paineviemäreissä. Manningin yhtälöä käytetään yleensä avouomavirtauksissa, mutta se soveltuu myös putkivirtauksille. (RIL 2003, 140.)

Hazen-Williamsin yhtälö on empiirinen, ja se voidaan esittää muodossa (Hyde 2004, 33):

$$h_f = \frac{10,65Q^{1,852}L}{C^{1,852}D^{4,87}}$$

Kaava 7. Hazen-Williamsin yhtälö (Hyde 2004, 33).

Kaavassa C on yksikötön kerroin, Hazen-Williamsin kerroin, joka kuvaa putken välityskykyä ja L putken pituus [m]. Mitä suurempi kertoimen C arvo on, sitä sileämpi putki on kyseessä. Putken välityskyky on myös sitä suurempi, mitä suurempi C kerroin on. (Hyde 2004, 33.)

Manningin yhtälössä (kaava 8) häviökerroin on vain karkeuden funktio, eikä Reynoldsin luku vaikuta lainkaan virtaushäviötä laskettaessa. Manningin yhtälöä käytetään yleisesti viemäreiden mitoituksessa, mutta se soveltuu myös putkivirtauksien laskemiseen. (RIL 2003, 145.)

$$h_f = \frac{Lv^2}{M^2R^{2/3}}$$

Kaava 8. Manningin yhtälö (RIL 2003, 145).

Manningin yhtälössä R on hydraulinen säde ja M Manningin kerroin (RIL 2003, 145).

$$h_f = f \frac{l v^2}{d 2g}$$

Kaava 9. Darcy-Weisbachin yhtälö (RIL 2003, 140).

Darcy-Weisbachin yhtälössä (kaava 9) f on kitkakerroin. Yhtälöstä voidaan myös havaita, että virtaushäviö on riippuvainen nopeuskorkeudesta. Tässä yhtälössä kitkakertoimen määrittäminen on kaikkein hankalinta. (RIL 2003, 140.)

Kitkakerroin voidaan määrittellä laminaarisessa virtauksessa Reynoldsin luvun (Re) avulla seuraavasti (RIL 2003, 140):

$$f = \frac{64}{Re}$$

Kaava 10. Kitkakerroin laminaarisessa virtauksessa.

Turbulenttisessa virtauksessa kitkakerroin voidaan määrittää Colebrook-Whiten yhtälön (kaava 11) avulla (RIL 2003, 141).

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

Kaava 11. Colebrook-Whiten yhtälö (RIL 2003, 141).

Colebrook-Whiten yhtälössä (kaava 11) k on karkeuskerroin. Karkeuskertoimen arvot riippuvat putkimateriaalista sekä putken iästä. (RIL 2003, 142.)

Pitkissä jakelujohdoissa ja jakeluverkossa paikallishäviöt ovat hyvin pieniä, joten käytännössä niitä ei yleensä oteta huomioon. Käsittelylaitoksien ja pumppaamoiden kohdalla on kuitenkin syytä pyrkiä tarkempaan tarkkuuteen niin suunnittelussa kuin niiden toimintaa tarkasteltaessa, joten paikallishäviöt on syytä laskea mukaan. (RIL 2003, 151-152.) Paikallishäviö voidaan laskea seuraavasti:

$$h_p = \xi \frac{v^2}{2g}$$

Kaava 12. Paikallishäviö (RIL 2003, 151).

Kaavassa 12 ξ on vastuskerroin, jonka arvo riippuu häviön tyypistä (RIL 2003, 152).

2.3 Vesijohtoverkoston toimintahäiriöt

Vesijohtoverkostolle asetetut toiminnalliset vaatimukset määrittelevät, että vedenjakeluverkoston tulee taata kaikissa tilanteissa riittävä ja laatuvaatimukset täyttävä veden saanti. Lisäksi verkoston paineen tulee olla kaikissa tilanteissa riittävä. (RIL 2010, 100.)

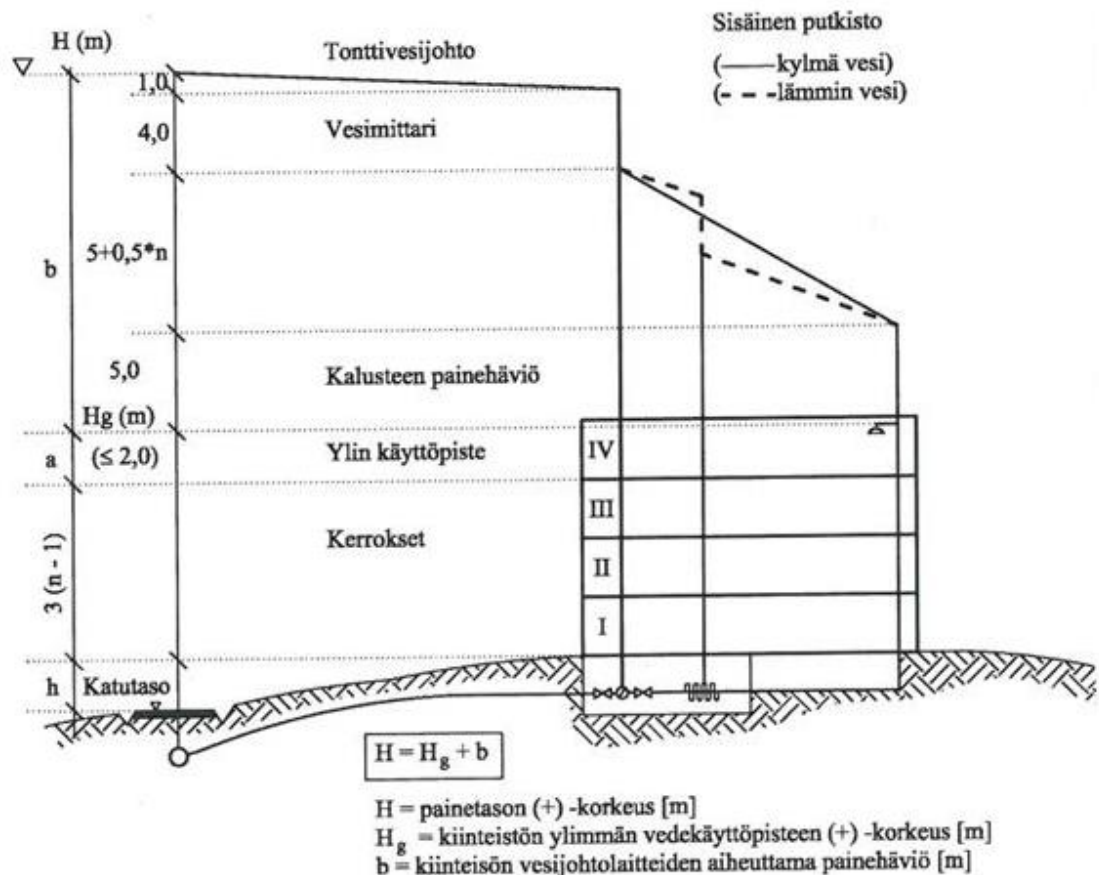
Painevaatimus kiinteistön kohdalla katujohdossa voidaan laskea seuraavasti (RIL 2004, 298):

$$p = 3(n - 1) + 22$$

Kaava 13. Painevaatimus kiinteistön kohdalla katujohdossa.

Kaavassa p on vaadittava paine [mvp] ja n on rakennuksen kerrosluku. Kuvassa 2 on esitetty osatekijät, joista asuinkiinteistön painevaatimus muodostuu.

Sammutusvedellä painevaatimus on 20 mvp maanpinnan tasossa vedenottoaikalla (RIL 2004, 298). Veden käyttö normaalioloissa kotitalouksilla on noin 100–150 l/as/d. Ihminen voi kuitenkin tulla toimeen hyvinkin pienellä vesimäärällä. Hygieniatason sekä nestetasapainon säilyttäminen vaatii noin 5 l/as/d. Pitkässä vedenjakelukatossa henkilön vuorokaudessa tarvitsema vesimäärä on noin 12–15 litraa vuorokaudessa. (Vikman & Arosilta 2006, 36.)



Kuva 2. Tarvittavan painetason määräytyminen kiinteistössä (RIL 2004, 299).

Vedenjakelun varmuus on Suomessa keskimäärin hyvä, jakelukatosten kesto on alle puoli tuntia asiakasta kohti vuodessa. Vedenjakelun keskeytyminen joksikin aikaa ei yleensä ole vaarallista, mutta jakelun keskeytyessä on selvitettävä tilanteen kesto sekä mahdollinen vaihtoehtoinen tapa vedenjakelulle. Vaikka kotitalouksille ei suurta haittaa aiheutuisikaan muutamien tuntien vesikatkoista, on muistettava muut vedenkäyttäjät, kuten sairaalat sekä esimerkiksi lypsykarjatilat, joille vedenjakelun katkeaminen useiksi tunneiksi voi olla kohtalokasta. (Vikman & Arosilta 2006, 30–36.)

Vesijohtoverkoston vuodot ovat yksi syy jakeluhäiriöille. Vuotojen aiheuttaman jakeluhäiriön laajuus riippuu hyvin paljon vuodon suuruudesta. Mitä suurempi vuoto on, sitä todennäköisemmin se aiheuttaa laajempia häiriöitä vedenjakeluun. Taulukossa 1 on esitetty reiän koon vaikutus vuotoveden määrään. (RIL 2010, 124–128.)

Taulukko 1. Vuotoreiästä virrannut vesimäärä, kun paine putkessa on 500 kPa (RIL 2004, 238).

Reiän läpimitta mm	Vuotoveden määrä			
	l/s	l/h	m ³ /d	m ³ /a
1,0	0,016	58	1,39	510
2,0	0,053	190	4,56	1 660
3,0	0,136	490	11,75	4 300
4,0	0,246	890	21,40	7 800
5,0	0,372	1 340	32,00	11 600
6,0	0,500	1 800	43,20	15 800
7,0	0,660	2 360	56,80	20 700
8,0	0,870	3 130	75,00	27 300
9,0	1,110	4 030	95,80	35 000
10,0	1,360	4 910	117,50	42 800

Lievimmillään vuodon aiheuttama jakeluhäiriö näkyy paineen laskemisena verkostossa. Vuotojen korjaus kuitenkin saattaa aiheuttaa verkoston rakenteesta riippuen jakeluhäiriöitä, sillä korjauksen ajaksi vuotava putken osa joudutaan eristämään jakeluverkostosta. Vuotojen korjaukset tulisikin pyrkiä tekemään aikana, jolloin haitta on mahdollisimman pieni. (RIL 2010, 124–128.)

Vesijohtoverkostoon voi syntyä vuotoja putkien murtumisen, syöpymisen tai asennusvirheen seurauksena. Murtumien aiheuttamia vuotoja voi esiintyä minkä ikäisissä putkissa tahansa. Usein murtumia esiintyy kuitenkin putkissa, joiden materiaali kestää heikosti suuria taivutusjännityksiä. Tällaisia materiaaleja ovat valurauta sekä asbestisementti. Murtumien aiheuttaman vuodot ovat usein suuria sekä helposti paikallistettavissa. (RIL 2004, 637.)

Syöpymisvuodot sekä liitosvuodot ovat murtumien aiheuttamia vuotoja pienempiä ja niiden paikallistaminen on vaikeampaa, eikä niillä välttämättä ole näkyvää vaikutusta verkoston toimintaan. Syöpymisvuotoja esiintyy teräs- ja valurautaputkissa, kun taas liitos-

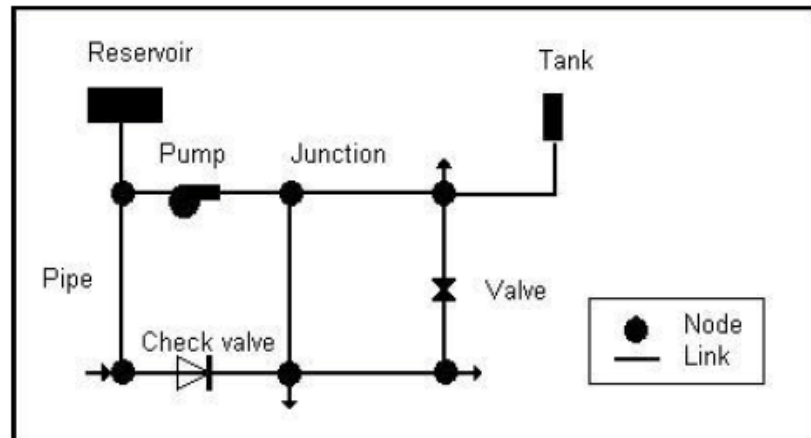
vuotoja voi olla kaiken tyyppisissä putkissa. (RIL 2010, 126.) Liitosvuotojen todennäköisyyteen vaikuttavat liitostyyppi ja työn huolellisuus, esimerkiksi painekokeet asennuksen yhteydessä (RIL 2004, 637).

3 VERKOSTOMALLINNUS

3.1 Verkostomallin rakentaminen

Vesijohtoverkoston malli rakentuu solmuista ja linkeistä. Solmuilla kuvataan verkostossa olevia putkien risteyskohtia, putkien materiaalin tai koon muutoskohtia sekä vesisäiliöitä. Verkostosta poistuvan ja sinne saapuvan veden määrä kuvataan verkostomallissa solmuille määriteltävän käytön avulla. Linkit kuvaavat verkoston putkia, venttiilejä tai pumppuja. (Hyde 2004, 30.) Kuvassa 3 on esitetty yksinkertainen verkostomalli.

Ennen kuin verkostomallia aloitetaan rakentaa, on syytä määrittellä rakennettavan mallin käyttötarkoitus sekä vaatimukset, sillä nämä tekijät vaikuttavat mallilta vaadittavaan tarkkuuteen (Hyde 2004, 17). Aina ei ole tarpeellista rakentaa verkostomallia samalla tarkkuudella kuin se on todellisuudessa (Hyde 2004, 21). Kuvassa 4 esitetään neljä rakennevaihtoehtoa verkostomallille.

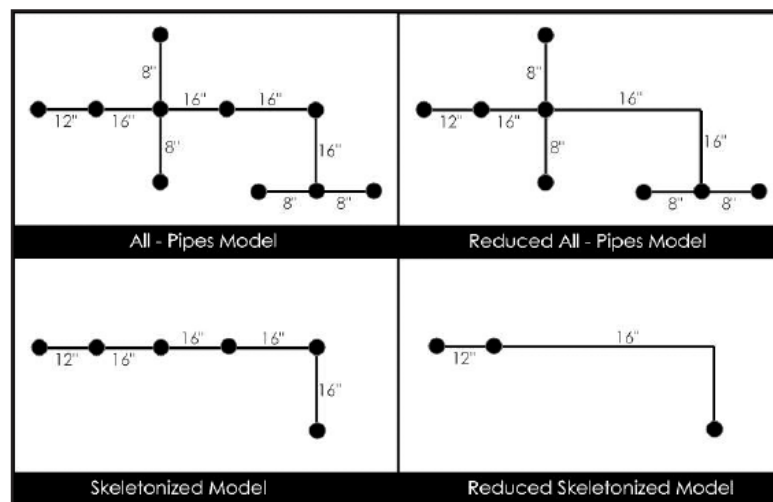


Kuva 3. Esimerkki verkostomallista.

Verkostomalli, joka sisältää kaikki mallinnettavan järjestelmän putket (*All-pipes model*) on rakenteeltaan täsmälleen samanlainen kuin mallinnettava verkosto. Tällainen malli saattaa kuitenkin vaatia pidempää laskenta-aikaa, viedä enemmän tallennustilaa sekä vaatia kalliimpaa ohjelmistolisenssiä. Näiden asioiden vuoksi kaikki putket sisältävää

mallia voidaan pelkistää (*All-pipes reduced model*) jättämällä siitä pois hydraulisesti turhat solmut. Jos putken materiaali, koko tai rakennusvuosi ei muutu, ei mallissa tarvitse olla solmua. (Hyde 2004, 21.)

Verkostosta voidaan rakentaa myös luurankomalli (*skeletonized model*), joka ei sisällä verkoston pienimpiä putkia, tyypillisesti alle 32 mm:n tai 40 mm:n. Luurankomalliakin voidaan vielä pelkistää jättämällä siitä turhat solmut pois. Järjestelmä käsittelee luurankomalleja nopeammin, mutta on muistettava, ettei niiden avulla saada niin yksityiskohtaista tietoa kuin malleilla, jotka sisältävät verkoston kaikki putket. (Hyde 2004, 21.)



Kuva 4. Rakennevaihtoehdot verkostomallille (Hyde 2004, 21).

Verkostomallin tarkkuuteen sen rakenteen lisäksi vaikuttaa saatavilla olevan lähtöaineiston tarkkuus ja laatu. Kaikkia lähtötietoja ei välttämättä ole saatavalla, jolloin on usein turvauduttava tilastollisiin menetelmiin. (Pulli 2009, 171.) Mallin rakentamista varten tarvitaan tietoa järjestelmän rakenteesta, käytöstä sekä ohjauksista.

Järjestelmän rakenteesta saadaan tietoa esimerkiksi johtokartoista, jotka kuvaavat putkien halkaisijat, sijainnit, materiaalit ja liitokset sekä mahdollisesti rakennusvuodet. Putkien materiaalitiedot ovat tärkeä tekijä mallia rakennettaessa, sillä materiaalin avulla saadaan putkelle karheus, jota mallinnussovelluksen käyttävät painehäviöiden laskennassa. Mallia rakennettaessa on jokaiselle solmulle annettava korkeustieto, joten laitteiden korkeusasema tulee olla tiedossa. (Hyde 2004, 91.) Usein korkeustietoa ei ole saatavilla, jolloin voidaan käyttää maanpinnan korkoa. Maanpinnan koron määrittämisessä voidaan käyttää esimerkiksi Maanmittauslaitoksen laserkeilausaineistoa.

Jotta malli voidaan rakentaa, tarvitaan tietoa verkoston käyttäjien vedenkulutuksesta sekä mahdollisten vuotovesien määrästä. Kulutustietojen lisäksi tarvitaan myös tieto vedenkulutuksen vaihtelusta vuorokaudessa, sillä vedenkulutus ei jakaannu todellisuudessa tasaisesti koko vuorokaudelle. (Hyde 2004, 92–93.)

Mallinnuksen avulla tehtyjen tarkasteluiden luotettavuuteen vaikuttaa järjestelmästä tehdyn mallin laatu. Mallin rakentaminen vaatii tuntemusta järjestelmien mallintamisesta sekä mallinnettavan järjestelmän toiminnasta. (Ljung & Glad 1994, 15-16.) Mallinnuksen tuloksien luotettavuuteen vaikuttavia tekijöitä ovat mm. käytetyn ohjelmiston taso, mallintajan asiantuntemus, lähtötietojen luotettavuus, käyttökäytännön ammattitaito ja motivaatio. Mallinnuksen tulosten luotettavuuteen vaikuttavia tekijöitä on esitelty tarkemmin taulukossa 2. (Pulli 2009, 145.) On myös ymmärrettävä, että kaikilla malleilla on rajoitettu toiminta-alue, jolla mallit ovat valideja (Ljung & Glad 1994, 17) .

Taulukko 2. Mallintamisen tulosten luotettavuuteen vaikuttavia tekijöitä (Pulli 2009,145).

Ominaisuus/tekijä	Vaikutus tuloksiin
ohjelmiston taso	Mitä koetellumpi ja kehittyneempi ohjelmisto, sitä parempia ja luotettavampia tuloksia voidaan odottaa.
mallintajan asiantuntemus	Puutteellinen teoreettinen tietämys aiheeseen liittyvästä fysiikasta ja laitteiden ominaisuuksista ja teknisistä reunaehdoista voi johtaa vakaviin virhepäätelmiin.
lähtötiedot, täsmällisyys ja luotettavuus	Jos lähtötiedot ovat puutteellisia, ei malli vastaa todellista järjestelmää täysin ja tuloksien luotettavuus heikkenee.
toiminnallisen suunnittelijan tehtävänannon selkeys	Tehtävänannon tulee olla riittävän selkeä, jotta toiminnallisen suunnittelun lopputulos vastaa tavoitetta.
suunnitelman ja tehtävänannon yhdenmukaisuus	Jos suunnitelma ei vastaa tehtävänantoa, eivät tuloksetkaan vastaa tavoitetta.
mallissa käytettyjen teoreettisten komponenttien ja lopullisten asennettujen komponenttien ominaisuuksien yhdenmukaisuus	Jos mallintamisessa ei ole käytettävissä lopullisten komponenttien tietoja, voidaan harkiten käyttää tilastollisia tietoja. Tällöin on kuitenkin syytä mainita, että tiedot ovat alustavia ja että analyysi on syytä päivittää lopullisten tietojen mukaan.
fysikaaliset poikkeamat lähtötiedoissa	esim. vedessä oleva ilma

Lähtötietojen epätarkkuuden vuoksi verkostosta rakennettua mallia tulee kalibroida ennen kuin sitä voidaan käyttää verkoston toiminnan tarkasteluun. Kalibroinnissa mallinnuksen avulla saatuja tuloksia verrataan järjestelmästä mitattuihin tietoihin ja näiden pe-

rusteella tehdään korjauksia rakennettuun malliin. Tyypillisiä vertailukohteita ovat esimerkiksi painetasot, virtaamien arvot tai vesisäiliöiden vedenpinnantasot. (Hyde 2004, 85.)

3.2 Simulointi

Kun verkostomalli on rakennettu ja kalibroitu, voidaan sen avulla tarkastella verkoston toimintaa simuloinnilla. Verkostomallinnuksen avulla tehtävä simulointi voidaan jakaa kahteen eri tyyppiin, aikajatkuvaan simulointiin ja stationaarisimulointiin. Se, kumpaa menetelmää käytetään, vaikuttaa myös mallilta vaadittuun tarkkuuteen, joten tämä on huomioitava mallia rakennettaessa. (Hyde 2004, 103.)

Stationaarisimuloinnissa tarkastellaan verkoston tilaa tietyllä ajanhetkellä. Tämän menetelmän avulla saadaan tietoja virtauksista ja paineista järjestelmässä valitulla ajanhetkellä. Vesisäiliöiden pinnankorkeudet eivät kuitenkaan muutu simulaatiossa eikä vedenkulutuksen vaihtelulla ole merkitystä. Stationaarisimulointia voidaan käyttää esimerkiksi putkien, pumppujen tai säiliöiden mitoituksessa. (Hyde 2004, 103.)

Aikajatkuvassa simuloinnissa tarkastellaan verkoston toimintaa jollakin aikajaksolla. Aikajakso voi olla minkä pituinen tahansa, mutta tyypillisesti ajanjakso on jokin 24 tunnin monikerta, sillä vedenkulutuksen vaihtelut noudattavat yleensä vuorokauden mittaista sykliä. Aikajatkuva simulointi on hyödyllinen työkalu, kun halutaan tarkastella, kuinka kulutusvaihtelut tai häiriötilanteet vaikuttavat järjestelmän toimintaan. (Hyde 2004, 125.)

4 LIEDON KUNNAN VESIJOHTOVERKOSTO JA VERKOSTOMALLI

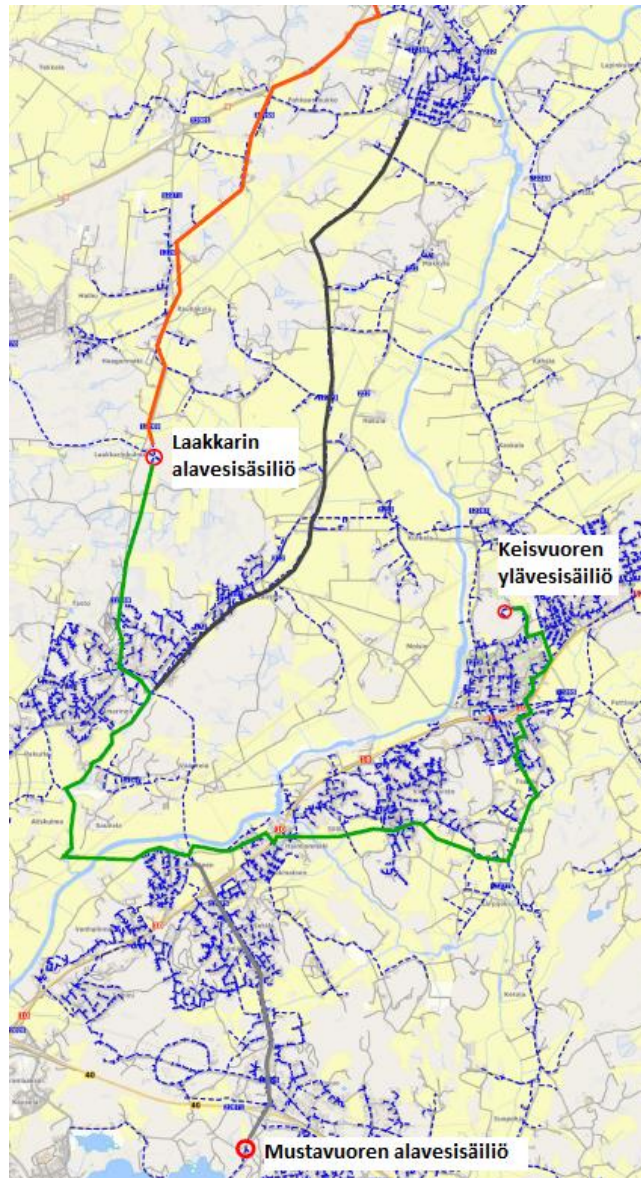
4.1 Vesijohtoverkosto

Liedon kunta on Turun Seudun Vesi Oy:n osakas. Turun Seudun Vesi Oy toimittaa verkostoon tekopohjavettä Virttaan kankaalta. Liedon vesivara on 4 000 m³ vuorokaudessa.

Vesijohtoverkostoon on liittynyt Liedon kunnan asukkaista noin 96 %. Vedenkäyttäjistä sairaalat, terveyskeskukset, palvelutalot, vanhainkodit, suurkeittiöt, keskuskeittiöt, koulut, päiväkodit, elintarvikeyritykset sekä suuret eläintilat voivat olla kriittisiä asiakkaita. Tällaisia kriittisiä asiakkaita on Liedon kunnan alueella useita, erityisesti voidaan mainita eläintilat sekä elintarviketeollisuuden osalta Kronfågel, joiden toimintaan pitkät katkokset vedenjakelussa vaikuttavat merkittävästi.

Talousvesi johdetaan verkostoon Laakkarin sekä Mustavuoren alavesisäiliöistä. Laakkarin alavesisäiliöltä johdetaan noin 75 % verkostoon johdettavasta vedestä. Laakkarin alavesisäiliön tilavuus on 10 000 m³. Vesijohtoverkoston eteläisimmässä osassa sijaitsevan Mustavuoren alavesisäiliön tilavuus on 2 000 m³. (Riihinen 2010, 12.) Mustavuoresta johdetaan verkostoon vettä noin 600 m³ vuorokaudessa (A. Teini, henkilökohtainen tiedonanto 17.11.2017).

Liedon keskustassa sijaitsee Keisvuoren ylavesisäiliö, jonka säiliötilavuus on 1 500 m³. Vedenpinnan korkeus on keskimäärin tasossa +80 mmp. (Riihinen 2010, 12.) Toinen Liedon kunnan alueella sijaitseva ylavesisäiliö on Tarvasjoella. Tarvasjoen ylavesisäiliön korkeus on keskimäärin + 90 mmp. Tarvasjoen alueelle johdetaan vettä Pöytyältä (A. Teini, henkilökohtainen tiedonanto 7.12.2017).

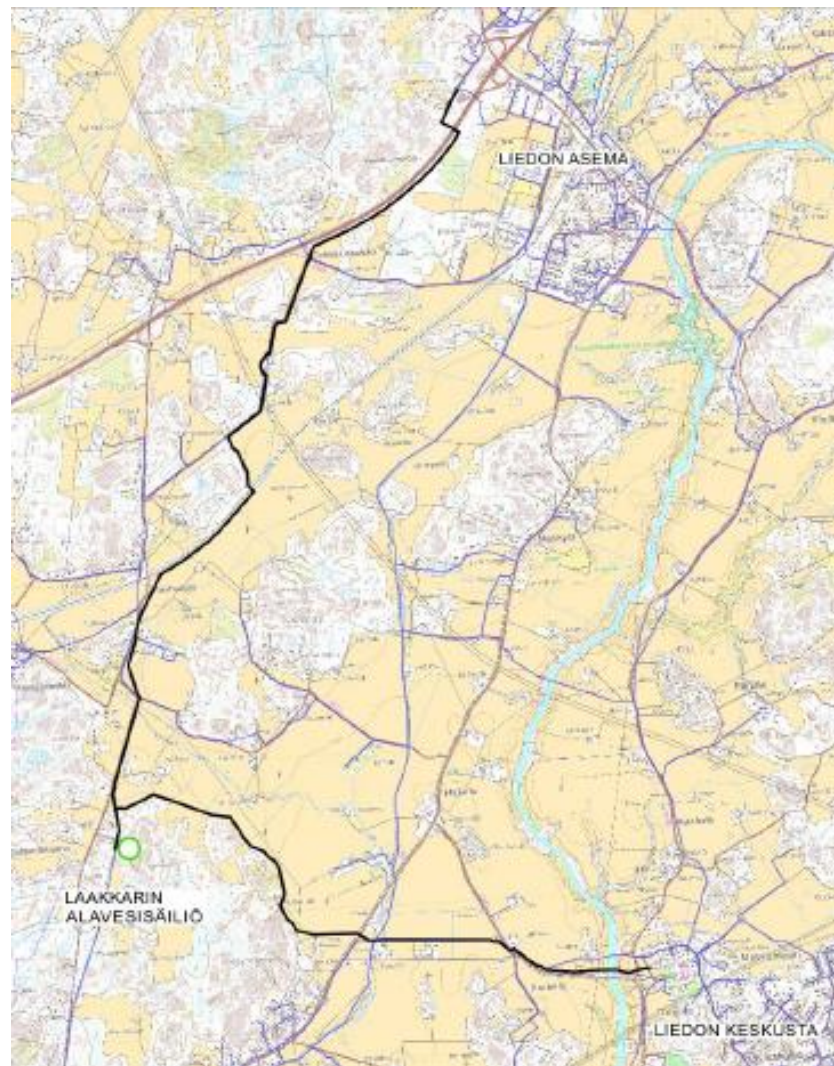


Kuva 5. Vesijohtoverkoston päävirtausreitit Laakkarin sekä Mustavuoren alavesisäiliöiltä.

Vesijohtoverkoston pituus on noin 350 km (Riihinen 2010, 12). Päävirtausreitit Laakkarilta sekä Mustavuoresta Keisvuoren ylävesisäiliöön on esitetty kuvassa 5. Nykytilanteessa verkostoon johdetaan vettä Laakkarin alavesisäiliöltä etelään halkaisijaltaan 280 mm:n syöttövesijohtoa pitkin. Liedon aseman suuntaan päävirtausreittinä toimii halkaisijaltaan 160 mm:n vesijohto Lausteelta Pahkamäentielle.

Liedon Veden verkostoa ja laitoksia valvotaan automaattisella hälytysjärjestelmällä. Laitoksella on ympärivuorokautinen päivystys. Laakkarin alavesisäiliön pumppuja ei ohjata automaatiolla, vaan käsin vedenkulutuksen sekä Keisvuoren ylävesisäiliön pinnan mukaan. Verkoston kulutuksen kasvaessa esimerkiksi maksimikulutuksen aikana lähtevää painetta siis kasvatetaan.

Syksyllä 2017 valmistui yleissuunnitelma, joka sisältää Laakkarin alavesisäiliöltä Liedon asemalla rakennettavan yhdysvesijohdon sekä Laakkarin alavesisäiliöltä Liedon keskustaan rakennettavan vesijohdon (kuva 6). Yhdysvesijohto on suunniteltu, koska Liedon aseman kaavoituksen myötä alueen vedentarve kasvaa. Laakkarilta Liedon keskustaan kulkevan yhdysvesijohdon avulla parannettaisiin myös vesijohtoverkoston vedensiirtokapasiteettia Laakkarin alavesisäiliöltä Keisvuoren ylävesisäiliölle.



Kuva 6. Suunniteltu yhdysvesijohto Laakkarilta Liedon asemalle sekä vesijohto Laakkarin alavesisäiliöltä Liedon keskustaan.

Yleissuunnitelman yhteydessä on tehty vesijohtoverkoston toiminnallinen tarkastelu, jonka tavoitteena oli selvittää, kuinka Liedon Vesi pystyy parhaiten varautumaan kasva-vaan vedenkulutukseen Liedon asemalla. Tarkastelussa selvitettiin myös, miten suunnitellut vesijohdot toimivat Laakkarin alavesisäiliön nykyisen syöttövesijohdon varavesiyh-teytenä. Tarkastelussa todettiin uuden yhdysvesijohdon olevan tarpeellinen Liedon ase-man vedenkulutuksen kasvaessa. Lisäksi todettiin, että yhdysvesijohtoa voidaan käyttää olemassa olevan, Laakkarilta etelään kulkevan syöttövesijohdon varavesiyhteytenä.

Tehtävässä mallinnuksessa uusi yhdysvesijohto on sisällytetty verkostomalliin, sillä yleissuunnitelman perusteella yhdysvesijohto tulisi rakentaa. Työssä haluttiin kuitenkin tarkastella tarkemmin uuden Laakkarilta Liedon keskustaan suunnitellun vesijohdon vai-kutuksia verkoston toimintavarmuuden parantamiseksi, joten sitä ei tarkastelussa sisäl-lytetty vielä nykytilanteeseen.

4.2 Verkostomalli

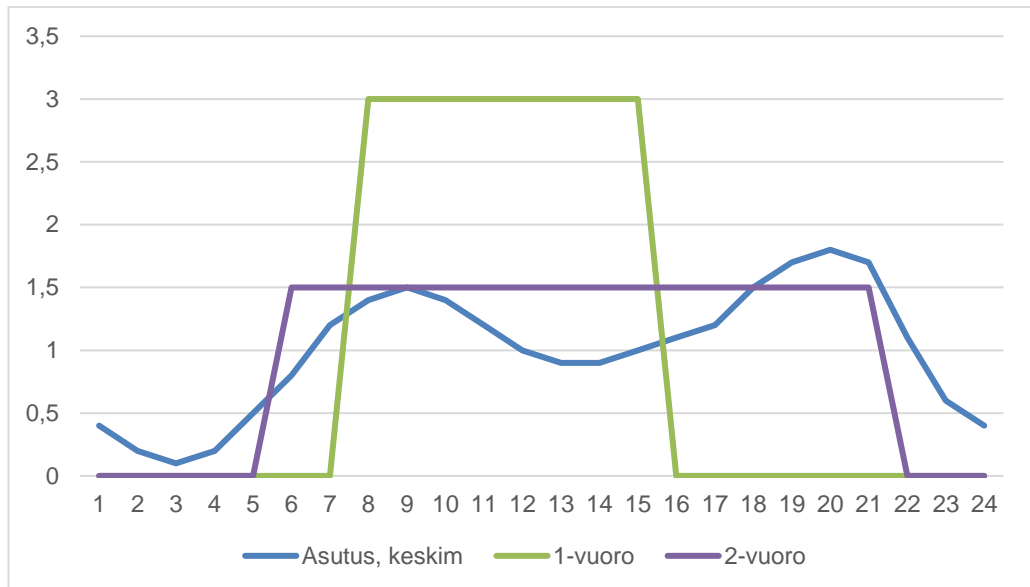
Simulointiin käytettävä verkostomalli on saatu käyttöön Sweco Ympäristö Oy:ltä. Ver-kostomalli on rakennettu Liedon Veden tilaamana muita tarkasteluja varten, mutta sa-maa mallia pystytään hyödyntämään myös opinnäytetyössä tehtävässä verkoston toi-mintavarmuuden tarkastelussa. Verkostomalli kattaa koko Liedon kunnan vesijohtover-koston. Mallissa vesijohtoverkostoa on pelkistetty vain hieman; pienimpiä putkia on jä-tetty pois, mutta tämä ei vaikuta tässä työssä tehtävään tarkasteluun.

Verkostomallin rakentamiseen on käytetty DHI Groupin kehittämää Mike Urban -sovel-lusta, jolla myös toiminnan tarkastelu tehdään. Simulointilaskelmiin sovellus käyttää Yh-dysvaltain ympäristöhallinnon (EPA), kehittämää Epanet-simulaattoria, joka on tällä het-kellä käytetyin vesijohtoverkoston simulointimalli.

Mike Urban mahdollistaa putkien ja solmujen lisäksi suurien vesialtaiden, vesitornien ja muiden vesisäiliöiden, pumppujen sekä useiden venttiilityyppien mallintamisen. Simu-lointi on mahdollista tehdä stationaarisimulointina tai aikajatkuvana simulointina.

Painehäviöiden laskemiseen sovelluksessa voidaan käyttää joko Manningin, Darcy-Weisbachin tai Hazen-Williamsin yhtälöä. Putkille ja venttiileille on myös mahdollista määritellä paikallishäviökertoimia, jos paikallishäviöt halutaan mallintaa. Liedon verkos-tomallissa painehäviöiden laskuun on valittu Hazen-Williamsin yhtälö.

Verkostomallilla tehtävä simulointi tapahtuu aikajatkuvana simulointina. Jotta tämä voidaan toteuttaa, vaatii järjestelmä, että vedenkulutuksen vaihtelut sekä pumppujen ja venttiilien ohjaukset on määritelty. Mallinnukseen käytetty sovellus mahdollistaa vedenkäyttökäyrien määrittelyn. Pumppujen ja venttiilien ohjaukset voidaan määrittellä yksinkertaisilla ohjaussäännöillä tai ajan funktioina. Kuvassa 7 on esitetty Liedon verkostomallin rakentamiseen käytetyt vedenkulutusjakaumat. Työssä verkostomallin avulla tehdyissä simuloinneissa on mukana vain keskikulutus.



Kuva 7. Liedon verkostomallinnukseen käytetyt vedenkulutusjakaumat.

Liedon kunnan verkostomalli on rakennettu jo olemassa olevasta järjestelmästä, jolloin yksi tarkkuuteen merkittävästi vaikuttava tekijä on mallinnettavasta järjestelmästä saatavilla olevat lähtötiedot sekä tietojen tarkkuus.

Liedon vesijohtoverkoston dokumentointi on paikoin puutteellinen, sillä johtokarttatiedoista ei löydy kaikkia vesijohtoja. Voidaan kuitenkin todeta näiden puutteiden koskevan yksittäisiä, hyvin lyhyitä ja pieniä vesijohtoja, joilla ei mallinnuksen kannalta ole suurtaakaan merkitystä. Verkostosta rakennettu malli rakennetaan aina tekemällä tiettyjä yksinkertaistuksia ja päätelmiä mallinnettavasta järjestelmästä (Ljung & Glad 1994, 5).

5 LIEDON KUNNAN VESIJOHTOVERKOSTON TOIMINNALLINEN TARKASTELU

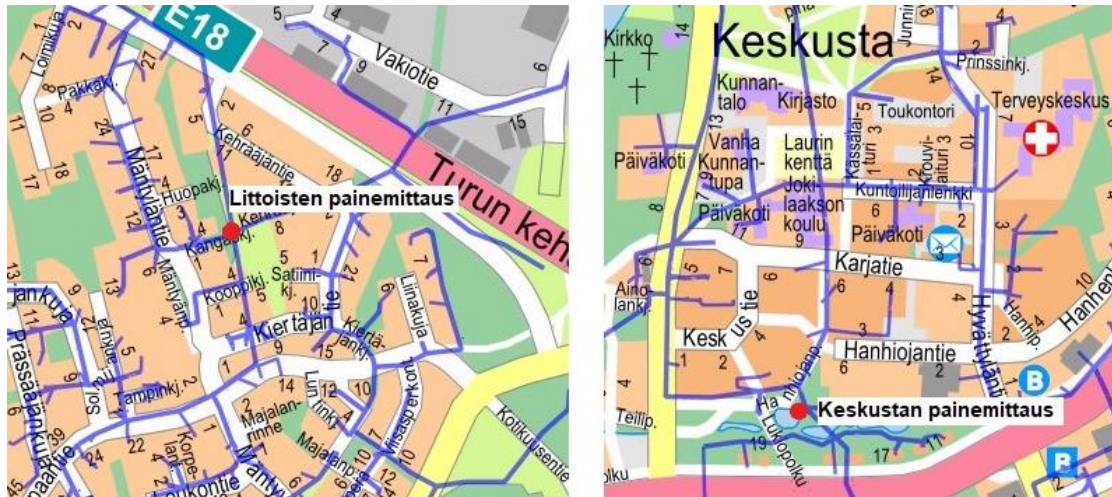
5.1 Häiriötilanteiden simulointi

Liedon kunnan alueella suurimmat putkirikot runkolinjoissa ovat olleet halkaisijaltaan 225 mm:n PVC-putkissa. Putkirikkojen yleisimpiä syitä ovat olleet kivien aiheuttamat vauriot sekä painuminen, joista on aiheutunut putken halkeaminen tai muhvin rikkoutuminen. (A. Teini, henkilökohtainen tiedonanto 31.10.2017)

Häiriötilanteiden mallinnus toteutetaan tarkastelemalla 48 tunnin ajanjaksoa, jossa ensimmäiset 8 tuntia verkosto toimii normaalisti. Tämän jälkeen verkostoon haluttuun solmuun simuloidaan vuoto kasvattamalla vedenkulutusta solmussa vuotomäärän verran. Tilanne, jossa solmussa on vuoto, kestää 4 tuntia, jonka jälkeen putki suljetaan. Putken sulkemisella kuvataan tilannetta, jossa vuotokohta on eristetty verkostosta ja vuotoa korjataan. Simulaatiossa vuodon korjaus kestää 12 tuntia, jonka jälkeen verkosto palautuu normaalitilaan.

Vuodon simulointiin käytetty kulutusmäärän arvo saatiin aiemmin verkostossa tapahtuneiden vuotojen aiheuttamista kulutusmäärien kasvusta. Liedossa tapahtuneissa putkirikoissa vesimäärä on ollut yli 100 m³/h. Esimerkiksi Littoisten alueella tapahtuneessa putkirikossa vuotomäärä yhden yön aikana oli 1 000 m³ ja Kahlojan alueella vastaavantisessa tilanteessa 800 m³. (A. Teini, henkilökohtainen tiedonanto 31.10.2017.)

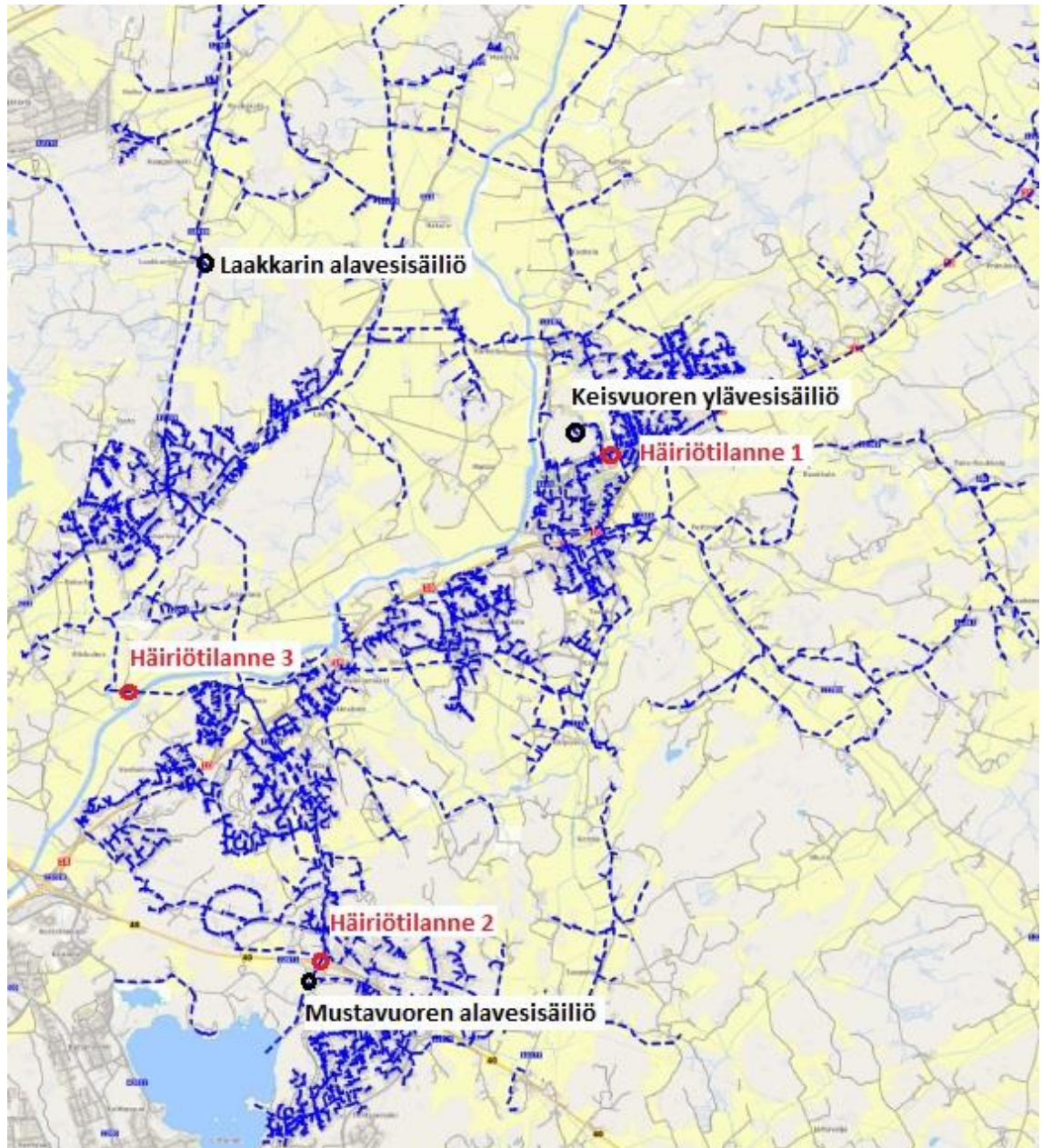
Mallinnuksesta saaduista tuloksista esitetään pääasiassa verkostopaineet ja virtaamat putkistoissa sekä tilanteesta riippuen Keisvuoren ja Tarvasjoen ylävesisäiliöiden veden korkeus. Lisäksi tarkastellaan painetta vesijohtoverkostossa olevien painemittareiden kohdalla, jolloin nähdään, pystyykö vuodon havaitsemaan painemittareiden avulla. Liedon keskustassa painemittari sijaitsee jätevedenpumppaamon yhteydessä Hanhiojanpolulla. Littoisissa painemittari sijaitsee Kangaskujalla jätevedenpumppaamon yhteydessä. Painemittauspisteiden sijainnit esitetään kuvassa 8.



Kuva 8. Painemittareiden sijainnit.

Virtaamien ja paineiden osalta tarkastellaan, pysyvätkö arvot suositusarvojen sisällä. Suositusarvo suurimmalle virtausnopeudelle vesijohtoverkostossa on 0,6–1,2 m/s (RIL 2010, 29). Painevaatimuksena on käytetty 25 mvp, joka vastaa katujohdossa vaadittavaa painetta 2-kerroksisen kiinteistön kohdalla. Painevaatimus saadaan laskettua kaavalla 13.

Mallinnuksen avulla simuloitavat häiriötilanteet kohdistetaan verkoston runkolinjoihin. Tarkasteltavia tilanteita on yhteensä kolme, ja niiden sijainnit on esitetty kuvassa 9.

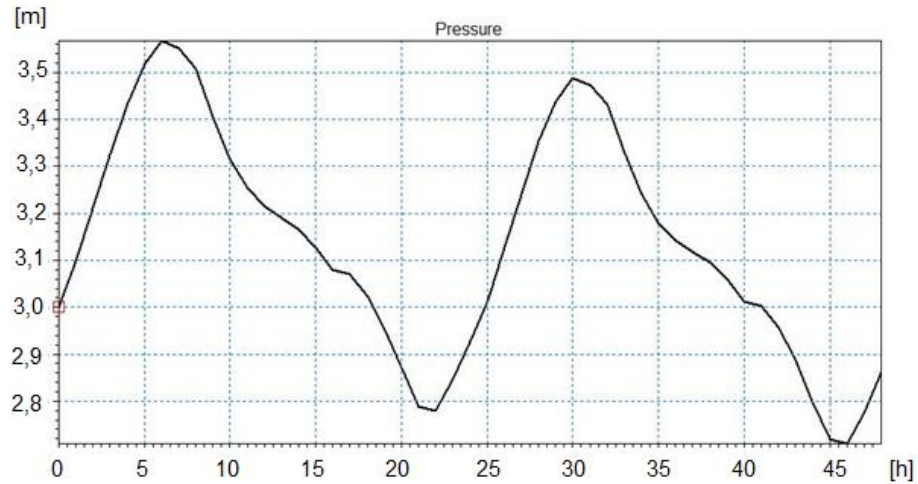


Kuva 9. Tarkasteltavat häiriötilanteet.

5.2 Liedon vesijohtoverkoston nykytila

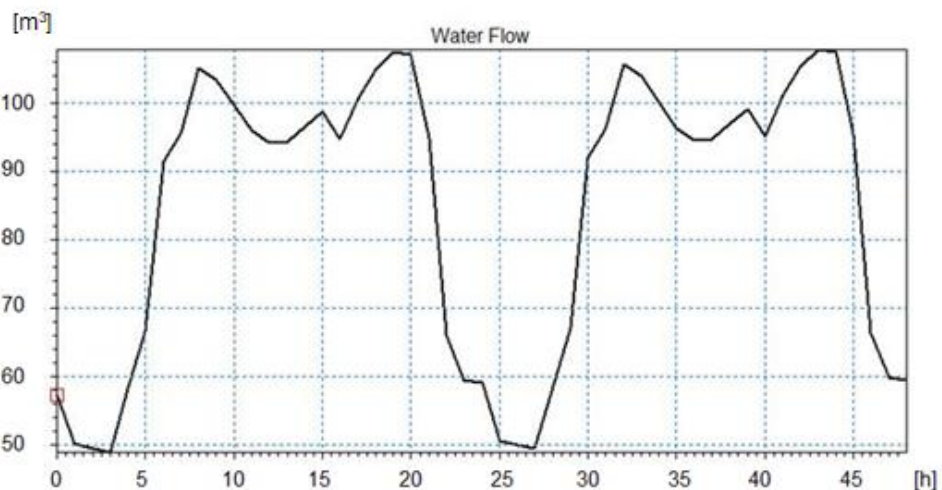
Ennen häiriötilanteiden simulointia tarkasteltiin verkostomallin avulla Liedon vesijohtoverkoston nykytilannetta. Verkostomalliin on sisällytetty Laakkarilta Liedon asemalle suunniteltu uusi syöttövesijohto.

Mallinnustulosten perusteella nykytilassa Keisvuoren ylävesisäiliön vedenpinnan korkeus vaihtelee vuorokaudessa noin 2,8–3 metrin välillä (kuva 10). Ylävesisäiliön vedenpinta laskee päivän aikana ja on illalla klo 21–22 välisenä aikana alimmillaan. Yön aikana, kun vedenkulutus on vähäisempää, ylävesisäiliö täyttyy.



Kuva 10. Nykytilanne. Keisvuoren ylävesisäiliön vedenpinnan korkeus.

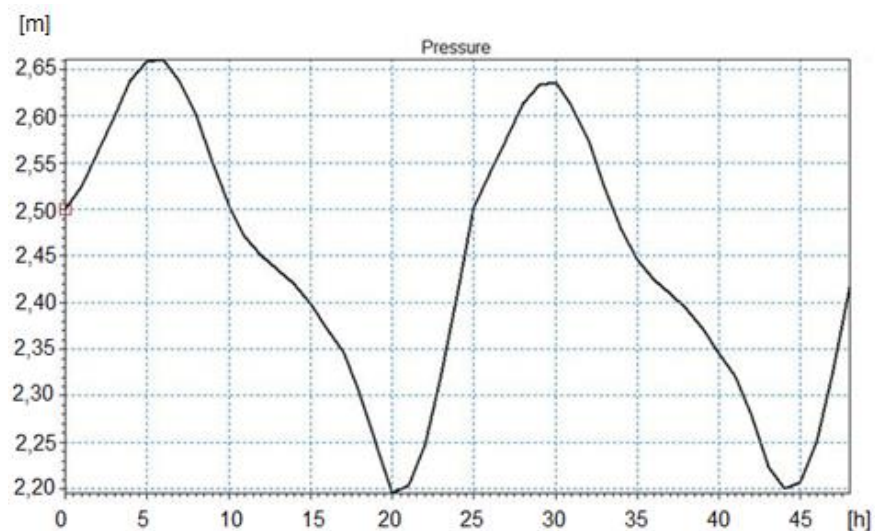
Laakkarin alavesisäiliöltä virtaavan veden määrän vaihtelu on esitetty kuvassa 11. Virtaaman arvot vaihtelevat 50–120 m³/h välillä vuorokaudessa. Virtaama on pienimmillään yöaikaan ja lähtee kasvamaan aamua kohti. Päivällä virtaaman arvot vaihtelevat 90–120 m³/h välillä.



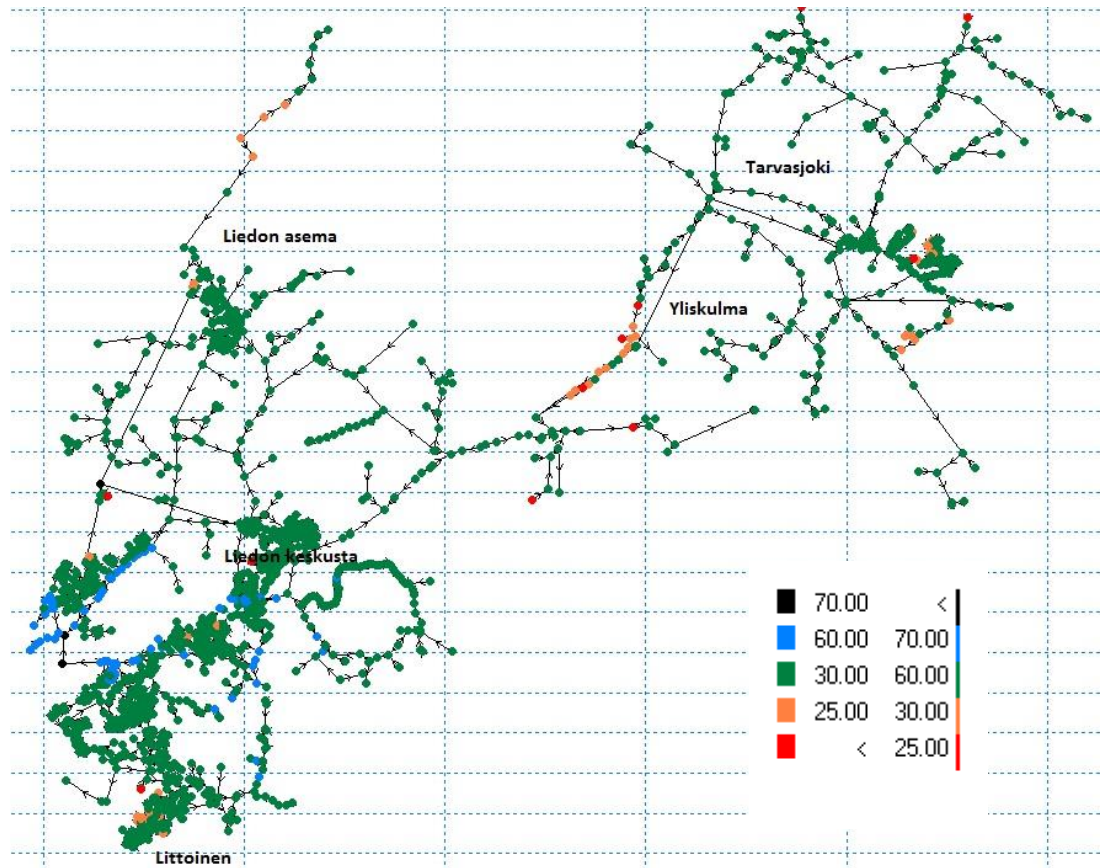
Kuva 11. Nykytilanne. Virtaama Laakkarilta.

Tarvasjoen ylävesisäiliön vedenpinnan korkeuden muutokset ovat hyvin samanlaiset kuin Keisvuoren ylävesisäiliön. Tarvasjoella ylävesisäiliön vedenpinnan korkeus vaihtelee välillä 2,7–2,2 metriä vuorokaudessa (kuva 12). Tarvasjoen ylävesisäiliöstä johdetaan vettä Tarvasjoen alueen käyttöön. Muille alueille vesi johdetaan Mustavuoresta sekä Laakkarilta.

Mallissa Tarvasjoen verkoston pohjoisosa on jaettu kahteen painepiiriin. Pohjoiseen painepiiriin johdetaan verkostomallissa vettä Pöytyältä eikä Tarvasjoen ylävesisäiliöltä. Todellisuudessa Tarvasjoen verkostoa ei kuitenkaan vielä ole jaettu erillisiin painepiireihin ja kaikki vesi johdetaan verkostoon Tarvasjoen ylävesisäiliöstä.

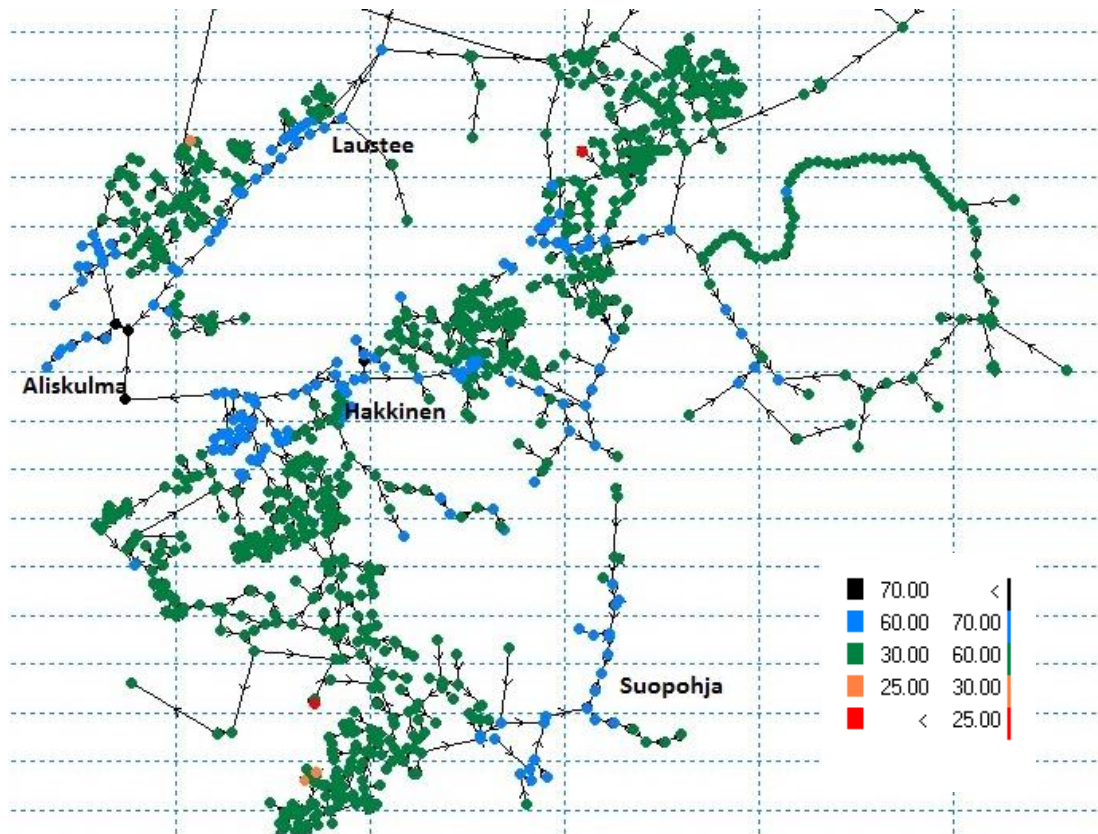


Kuva 12. Nykytilanne. Tarvasjoen ylävesisäiliön vedenpinnan korkeus.



Kuva 13. Nykytila. Alimmat verkostopaineet.

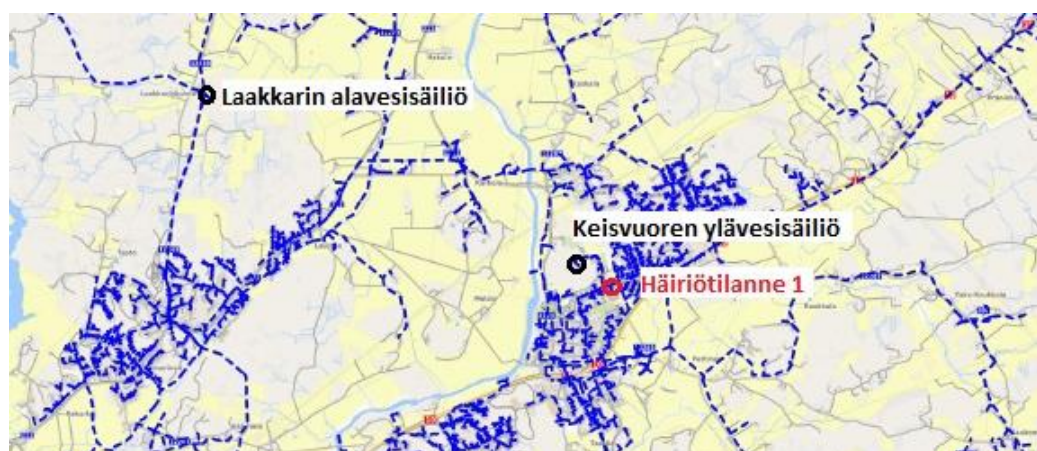
Verkoston paineet ovat nykytilanteessa alimmillaan Yliskulmalla sekä Littoisissa tehtaanmäen alueella (kuva 13). Kuitenkaan alle 25 mpv:n paineita ei esiinny kuin Yliskulmalla hetkellisesti. Korkeimmat paineet verkostossa on esitetty kuvassa 14. Korkeimmat paineet esiintyvät Aliskulman, Lausteen, Hakkisen sekä Suopohjan alueilla. Verkostossa ei esiinny yli 70 mpv:n paineita kuin Aurajoen alittavan putken kohdalla. Korkeat verkostopaineet johtuvat alueiden sijainnista alavilla paikoilla.



Kuva 14. Nykytila. Korkeimmat verkostopaineet.

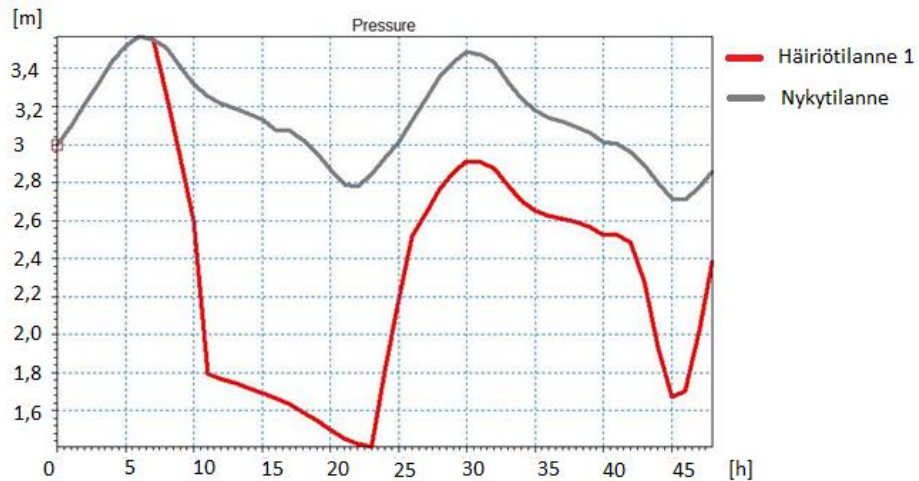
5.3 Häiriötilanne 1

Ensimmäisessä häiriötilanteessa tarkasteltiin verkoston toimintaa tilanteessa, jossa Nuolemontien vesijohdossa on vuoto (kuva 15). Vesijohto on halkaisijaltaan 225 mm, ja se on osa päävirtausreittiä Laakkarin alavesisäiliöltä Keisvuoreen ylävesisäiliölle.



Kuva 15. Häiriötilanne 1.

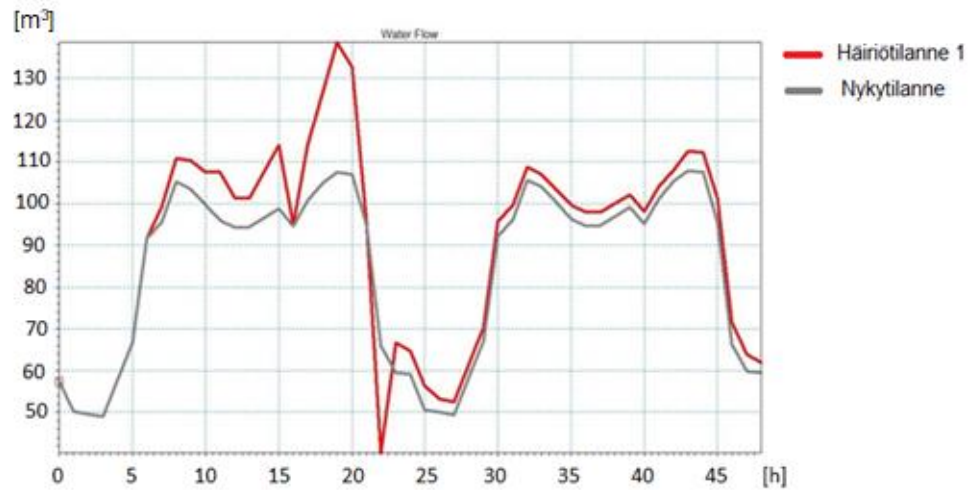
Kuvassa 16 on esitetty Keisvuoren vedenpinnankorkeus häiriötilanteessa. Keisvuoren vedenpinnan vaihtelu nykytilassa harmaalla ja häiriötilanteessa punaisella. Kuvasta nähdään, että hetkellä, jolloin putkessa on vuoto, vesitornin pinta alkaa laskea tasaisesti siihen saakka, kunnes putki suljetaan huoltotöiden ajaksi. Kun putki on suljettuna, vedenpinta laskee edelleen, mutta hitaammin. Nykytilanteessa vedenpinnan vaihtelu on 2,8–3,5 m, mutta häiriötilanteessa vedenpinnan taso laskee 1,5 metriin.



Kuva 16. Häiriötilanne 1. Keisvuoren ylävesisäiliön vedenpinnan korkeus.

Kun vuoto saadaan korjattua ja putki avattua, alkaa ylävesisäiliön vedenpinta nousta samalla tavoin kuin nykytilanteessa. Vedenpinta ei kuitenkaan saavuta normaalia korkeutta vielä seuraavalla vuorokaudella tarkastelussa.

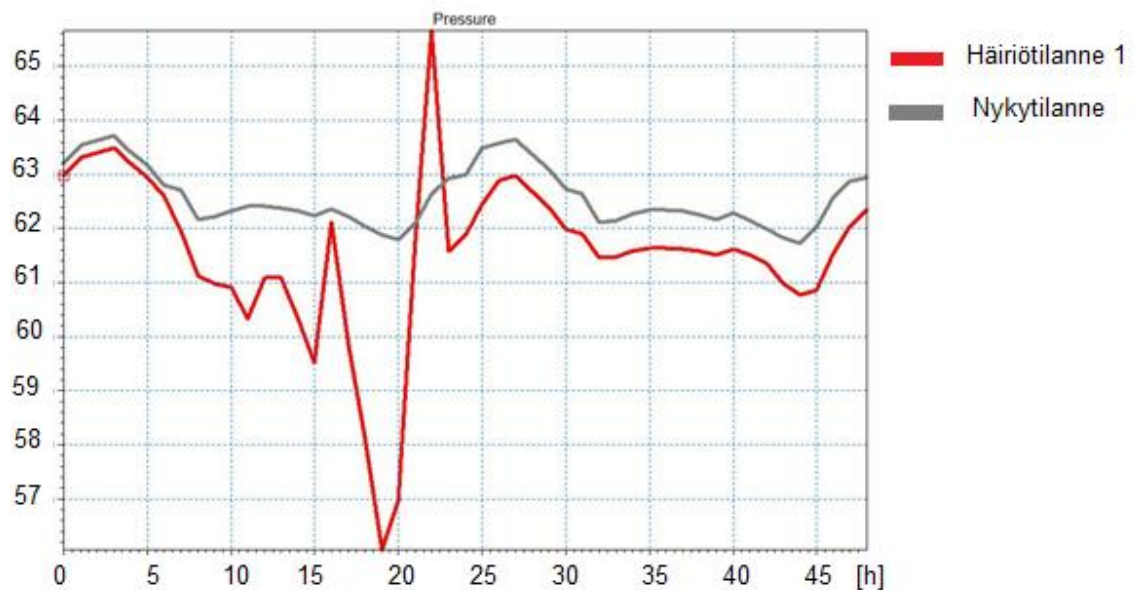
Laakkarin alavesisäiliöltä verkostoon johdettavan veden määrä kasvaa, kun Keisvuoren ylävesisäiliön vedenpinta laskee nykytilannetta alhaisemmaksi (kuva 17). Suurin kasvu virtaamissa tapahtuu klo 19:00–21:00. Kun vuoto saadaan korjattua, virtaamien arvot alkavat palautua nykytilannetta vastaaviksi.



Kuva 17. Häiriötilanne 1. Virtaama Laakkarilta.

Verkoston paineisiin häiriötilanteella ei ole merkittävää vaikutusta. Verkostossa tapahtuu paineiden laskua, mutta alle 25 mpv:n paineita ei ilmene verkostossa nykytilannetta enempää.

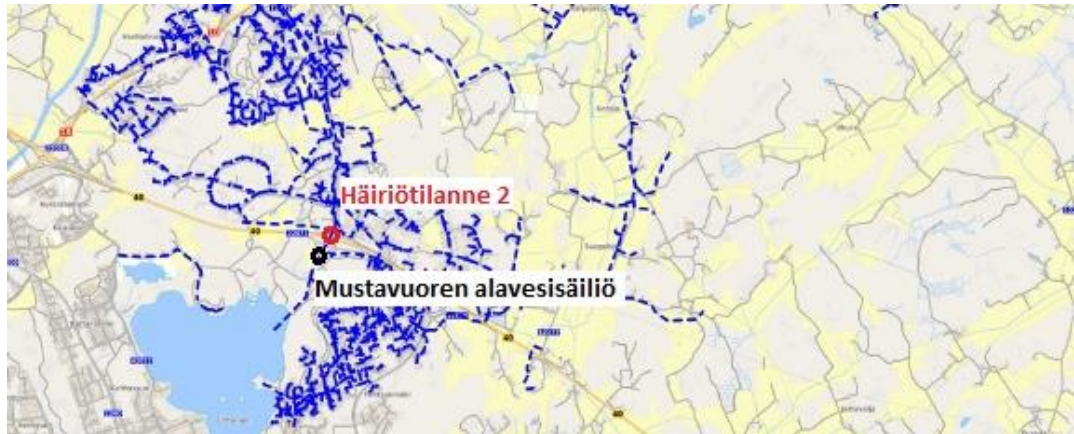
Vuoto voidaan havaita verkostossa olevien painemittauksien avulla. Kuvassa 18 esitetty paine Liedon keskustan jätevedenpumppaamon yhteydessä sijaitsevasta painemittarista. Kuvasta voidaan havaita paineen tippuvan vuodon alkaessa.



Kuva 18. Häiriötilanne 1. Paine Liedon keskustan mittauspisteessä.

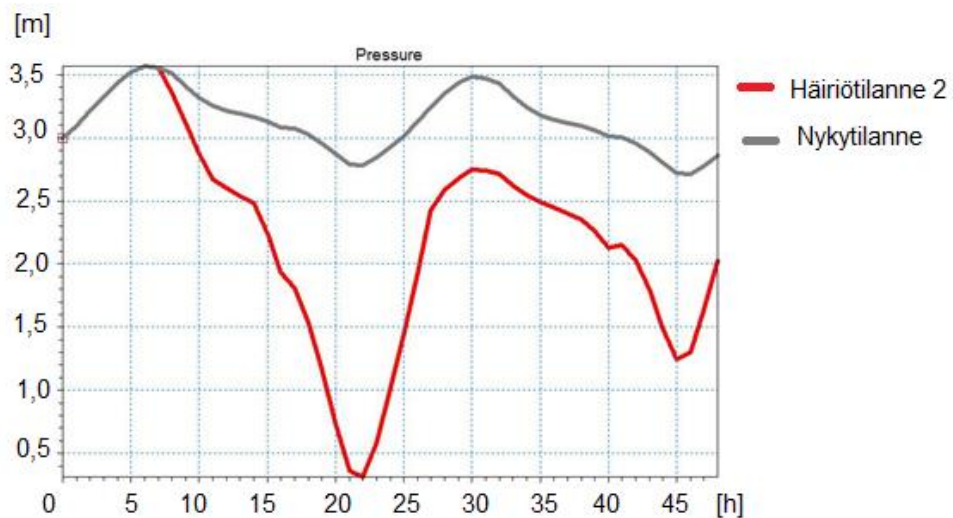
5.4 Häiriötilanne 2

Tässä häiriötilanteessa tarkasteltiin, kuinka verkosto käyttäytyy, kun Mustavuoren alavesisäiliöltä lähtevässä vesijohdossa on vuoto (kuva 19). Mustavuoren alavesisäiliöltä johdetaan Liedon kunnan käyttöön vettä noin 600 m³ vuorokaudessa.



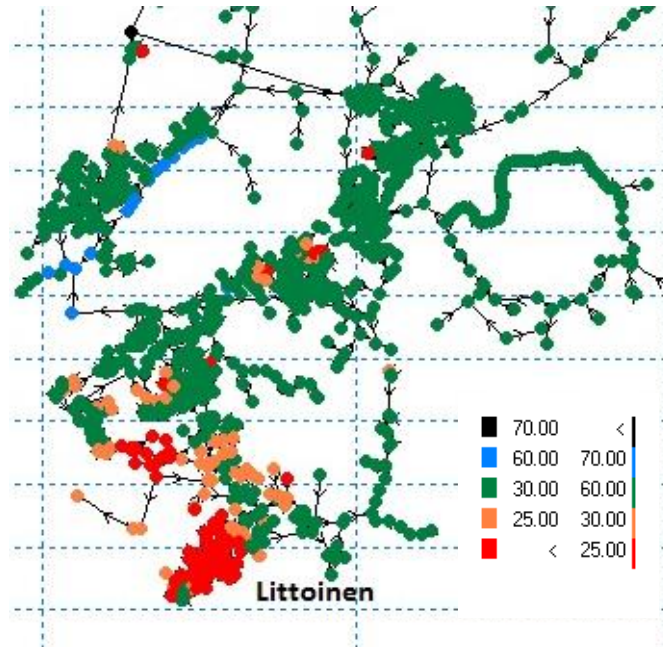
Kuva 19. Häiriötilanne 2.

Kuvassa 20 on esitetty, kuinka Keisvuoren ylävesisäiliön vedenpinnan korkeus muuttuu tässä häiriötilanteessa. Ylävesisäiliön vedenpinta laskee hetkestä, jolloin vuoto alkaa, siihen saakka, että putki saadaan korjattua ja jälleen auki. Ylävesisäiliö tyhjenee ajanhetkellä 21:00.



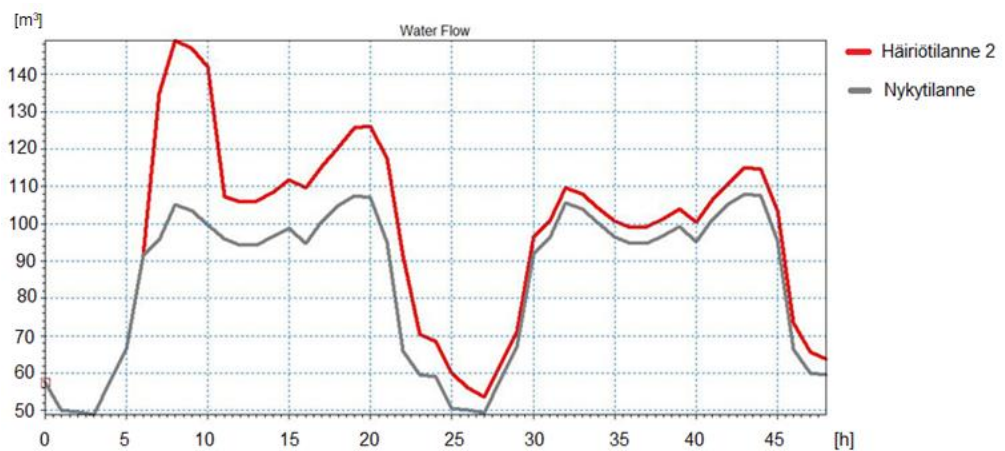
Kuva 20. Häiriötilanne 2. Keisvuoren ylävesisäiliön vedenpinnan korkeus.

Verkoston paineet laskevat Littoisissa vuodon alettua (kuva 21). Paineet ovat Littoisissa alle 25 mpv:n siihen saakka, että putki suljetaan. Tämän jälkeen verkoston paineet palautuvat nykytilannetta vastaaviksi.



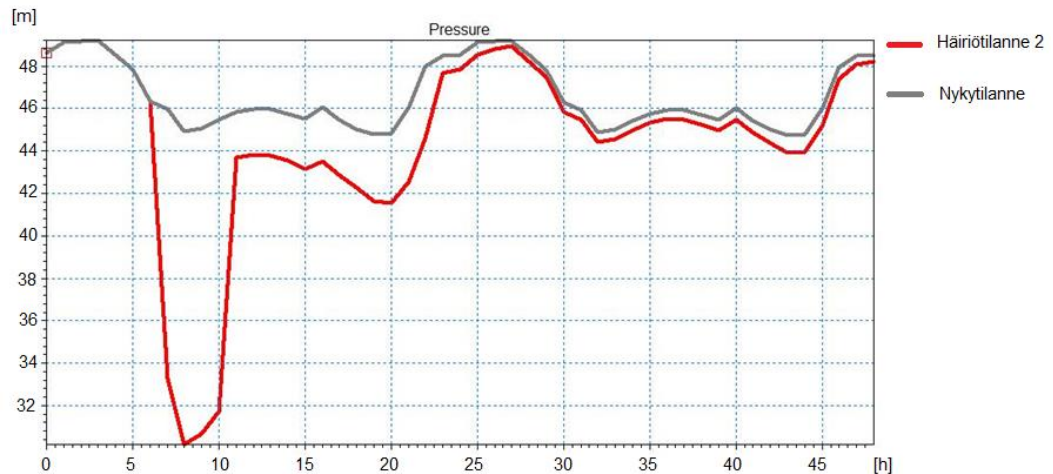
Kuva 21. Häiriötilanne 2. Alimmat verkostopaineet.

Mustavuoren alavesisäiliön ollessa pois käytöstä vesi johdetaan verkostoon Laakkarin alavesisäiliöltä ja Keisvuoren yläavesisäiliöstä. Kun Laakkarilta lähtevän vesijohdon virtaamaa tarkastellaan (kuva 22) havaitaan, että vuodon alkaessa virtaama kasvaa nykytilanteeseen verrattuna. Virtaaman kasvu vastaa vesimäärää, joka verkostoon tavallisesti johdetaan Mustavuoren alavesisäiliöstä.



Kuva 22. Häiriötilanne 2. Virtaama Laakkarilta.

Myös tässä häiriötilanteessa vuoto voidaan havaita painemittauspisteessä paineen laskuna. Kuvassa 23 on esitetty Littoisten painemittauspisteen paineen vaihtelu häiriötilanteessa. Kuvasta voidaan havaita, että paine putoaa arvosta 46 arvoon 31, kun verkostossa on vuoto.



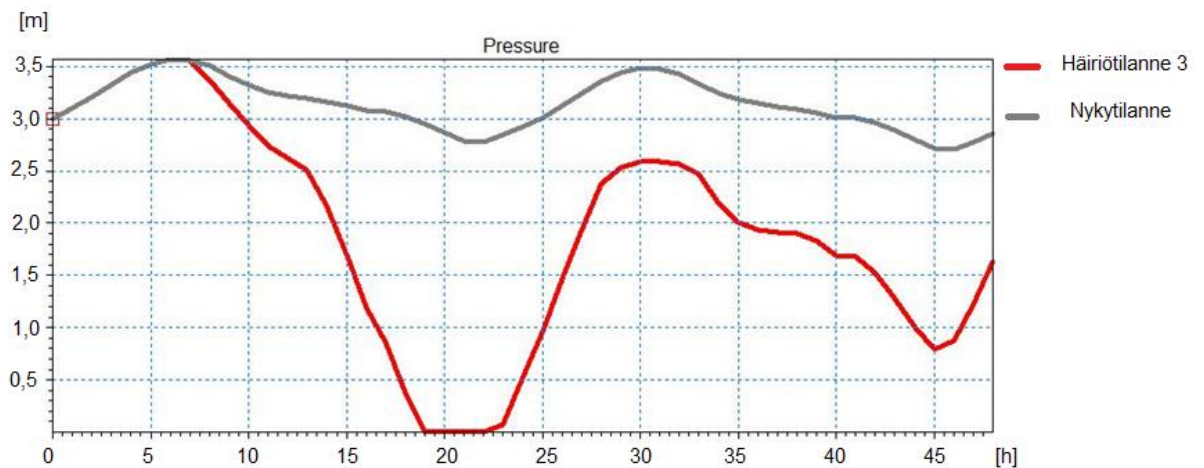
Kuva 23. Häiriötilanne 2. Paine Littoisten mittauspisteessä.

5.5 Häiriötilanne 3

Tässä häiriötilanteessa tarkastellaan, kun vuoto kohdistetaan Aurajoen alittavaan vesijohtoon (kuva 24). Vesijohton halkaisija on 225 mm, ja se on osa päävirtausreittiä Laakkarilta Keisvuoreen. Nykytilanteessa vesijohtoa pitkin virtaa vettä Laakkarilta pohjoiseen sekä Liedon keskustan alueelle.

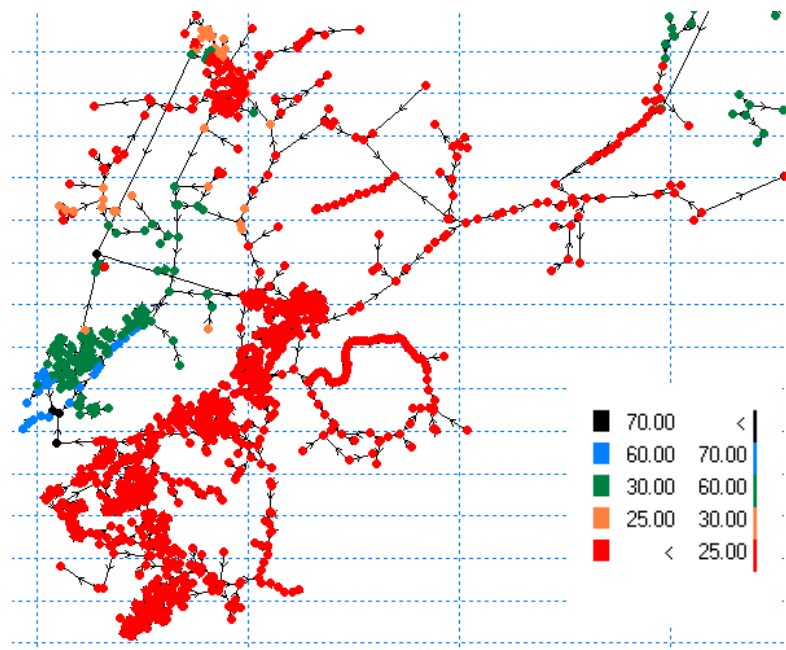


Kuva 24. Häiriötilanne 3.



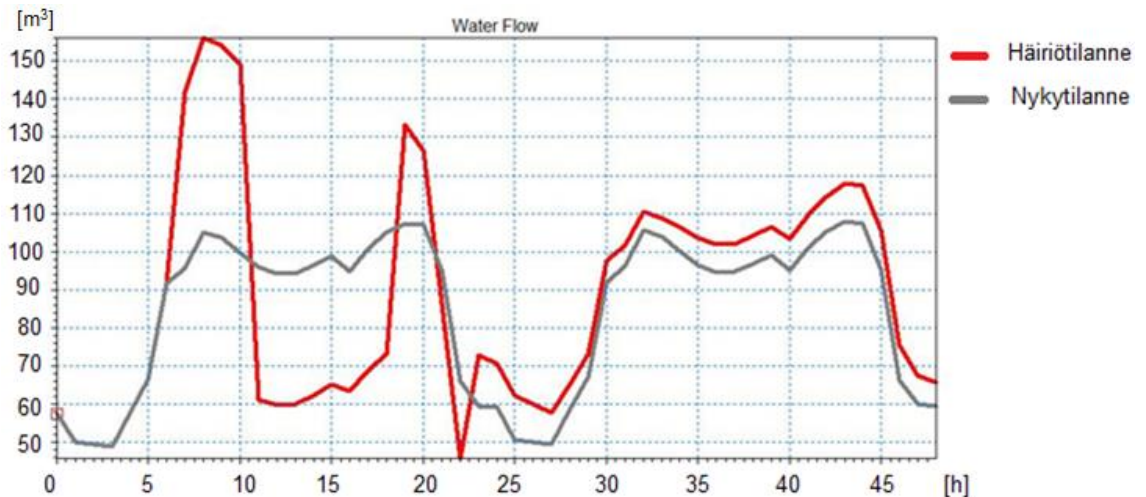
Kuva 25. Häiriötilanne 3. Keisvuoren ylävesisäiliön vedenpinnan korkeus.

Tässä häiriötilanteessa havaitaan, että Keisvuoren ylävesisäiliö tyhjenee klo 19:00, kun Aurajoen alittava putki on vielä suljettu (kuva 25). Samalla hetkellä myös verkoston paineet laskevat suurilta osin alle 25 mpv:n (kuva 26). Ylävesisäiliö on tyhjänä noin neljän tunnin ajan, kunnes se alkaa täyttyä jälleen. Ylävesisäiliön tyhjeneminen johtuu siitä, että Aurajoen alittavan putken ollessa pois käytöstä verkoston kapasiteetti ei riitä johtamaan verkostoon vettä nykytilannetta vastaavaa määrää.



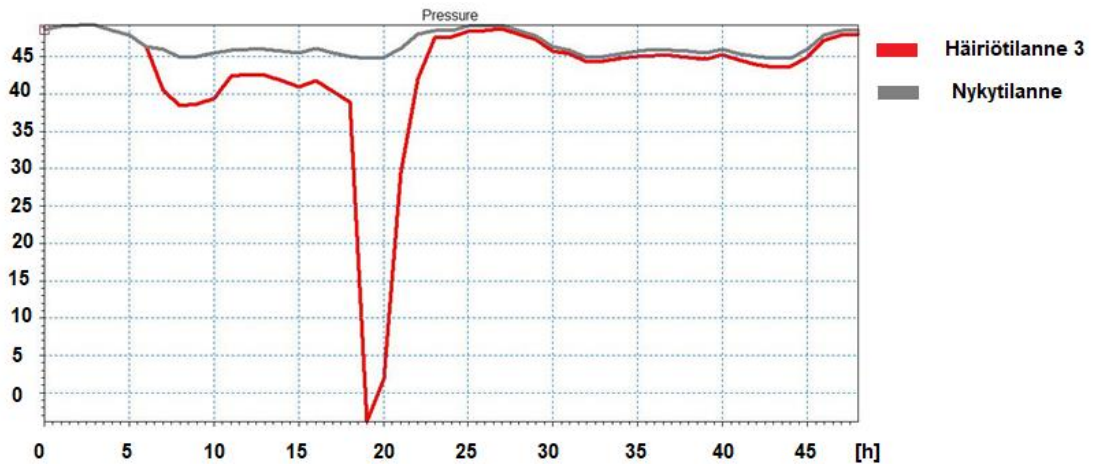
Kuva 26. Häiriötilanne 3. Alimmat verkostopaineet.

Kun tarkastellaan virtaamaa Laakkarilta vesijohtoverkoston, voidaan havaita, että hetkellä, jolloin Aurajoen alittava putki suljetaan, Laakkarilta lähtevän virtaaman arvo laskee nykytilannetta pienemmäksi (kuva 27). Kun Aurajoen alittava putki ei ole käytössä, vesi virtaa Laakkarilta pohjoiseen uutta syöttövesijohtoa ja Vanhan hämeentien kohdalla kulkevaa vesijohtoa pitkin. Virtaaman lasku johtuu siitä, että 225 mm:n syöttövesijohdon ollessa pois käytöstä vesijohtoverkoston kapasiteetti ei riitä välittämään nykytilannetta vastaavaa virtaamaa Laakkarilta.



Kuva 27. Häiriötilanne 3. Virtaama Laakkarilta.

Myös tässä häiriötilanteessa vuoto voidaan havaita verkostossa olevien painemittauksien avulla. Kuvassa 28 on esitetty paineet Littoisissa sijaitsevasta painemittauspisteestä. Kuvasta voidaan havaita, että vuodon alkaessa paine putoaa 5 mpv:n verran. Lisäksi kuvaajasta voidaan havaita Keisvuoren ylävesisäiliön tyhjentäessä, että paine tippuu nolnaan.



Kuva 28. Häiriötilanne 3. Paine Littoisten mittauspisteessä.

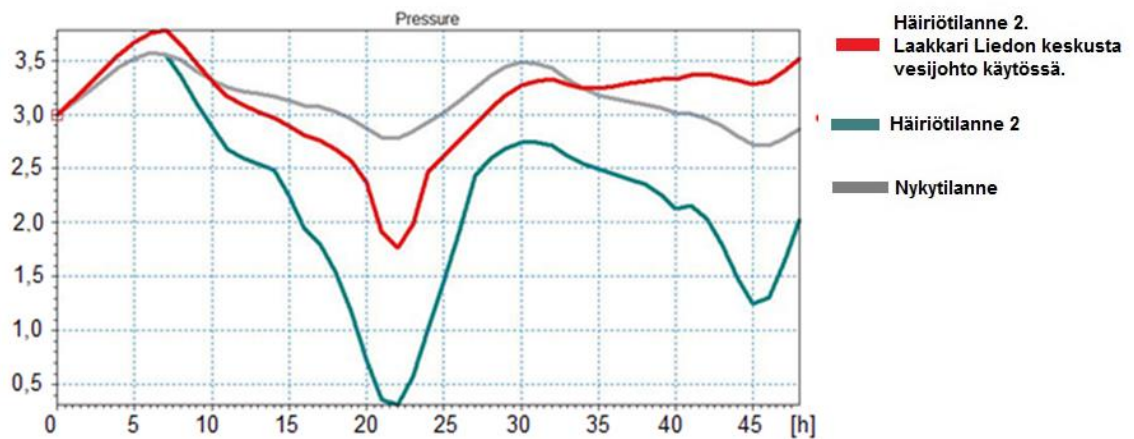
5.6 Laakkari–Liedon keskustan vesijohdon vaikutus häiriötilanteisiin

Syksyllä 2017 tehty yleissuunnitelma sisältää Laakkarilta Liedon aseman suuntaan suunnitellun uuden yhdysvesijohdon lisäksi vesijohdon Laakkarilta Liedon keskustaan. Verkostomallin avulla tarkasteltiin, millainen vaikutus uuden vesijohdon käyttöönotolla olisi edellä tarkasteltuihin häiriötilanteisiin.

Ensimmäisellä häiriötilanteella, jossa Nuolemontien vesijohdossa oli vuoto, ei ollut merkittäviä vaikutuksia verkoston toimintaan, joten tilannetta ei tarkastella uudelleen Laakkari Liedon keskusta vesijohdon kanssa.

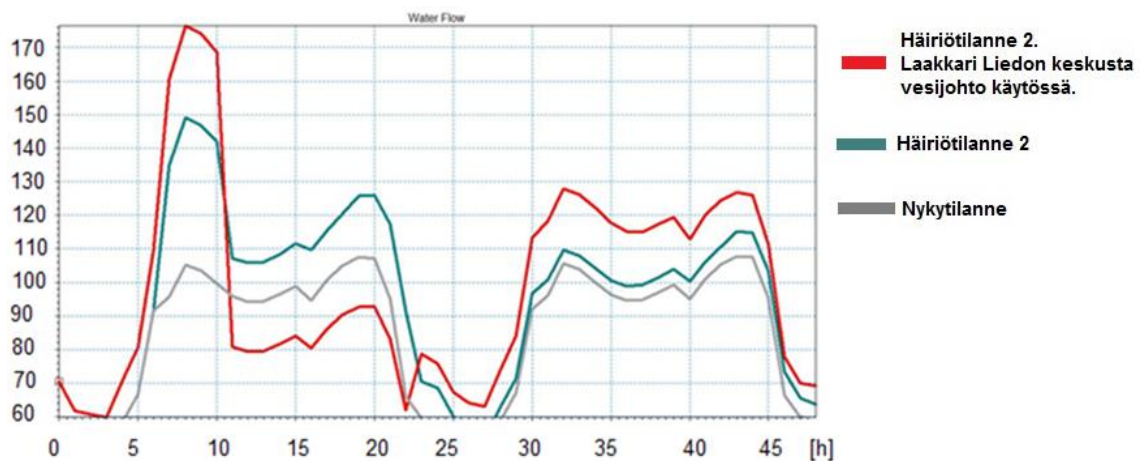
Häiriötilanne 2

Häiriötilanne 2, jossa vuoto on kohdistettu Mustavuoren alavesisäiliöstä lähtevään vesijohtoon, ei aiheuttanut merkittäviä vaikutuksia vesijohtoverkoston toimintaan. Kuitenkin häiriötilanteessa Keisvuoren ylavesisäiliö tyhjeni hetkellisesti melkein kokonaan. Jos otetaan käyttöön uusi vesijohto, havaitaan, että Keisvuoren vesitornin vedenpinta ei laske alle 1,8 metrin. Kuvassa 28 on esitetty Keisvuoren vedenpinnan korkeuden vaihtelut nykytilassa sekä häiriötilanteessa ilman vesijohtoa ja vesijohdon kanssa.



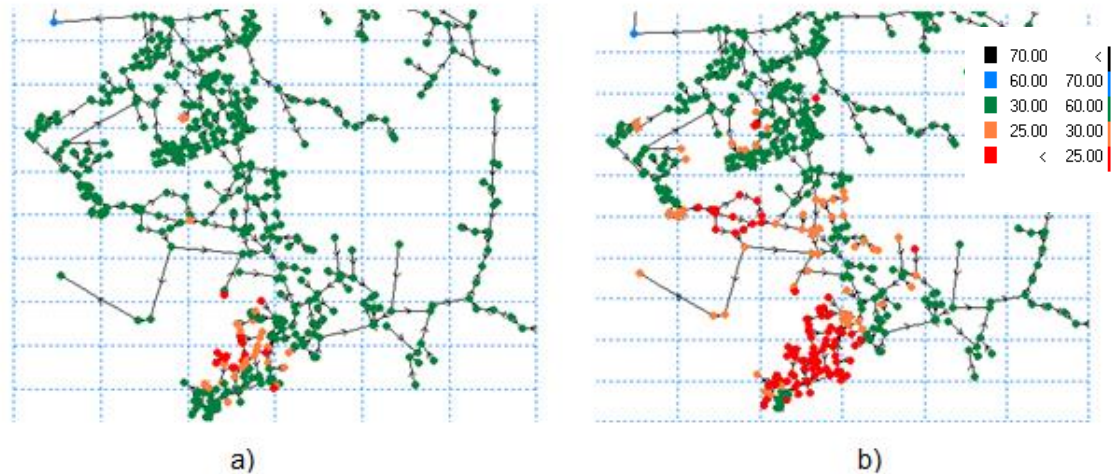
Kuva 29. Häiriötilanne 2. Keisvuoren ylävesisäiliön vedenpinnan korkeus, kun uusi yhdysvesijohto on käytössä.

Kun uusi vesijohto on käytössä, virtaamien arvot Laakkarilla kasvavat vuodon aikana verrattuna nykytilanteeseen sekä häiriötilanteeseen, jossa vesijohto ei ole käytössä (kuva 30). Kasvu johtuu siitä, että uuden vesijohdon myötä verkoston kapasiteetti kasvaa, jolloin verkostoon saadaan johdettua vettä enemmän. Kun putki suljetaan, virtaaman arvo laskee. Virtaaman lasku johtuu siitä, että Keisvuoren vedenpinta ei laske samalla nopeudella, kun vesijohto Laakkarilta Liedon keskusta on käytössä. Keisvuoresta saadaan siis johdettua verkostoon vettä enemmän, jolloin Laakkarilta ei tarvitse syöttää verkostoon niin paljon vettä kuin Keisvuoren tyhjentyessä.



Kuva 30. Häiriötilanne 2. Virtaama Laakkarilta, kun uusi vesijohto on käytössä.

Paineet laskivat häiriötilanteessa Littoisissa, kun uusi vesijohto ei ollut käytössä. Kun vesijohto otettiin käyttöön, alle 25 mvp:n paineita esiintyi pienemmällä alueella. Alimmat paineet verkostossa on esitetty kuvassa 31.

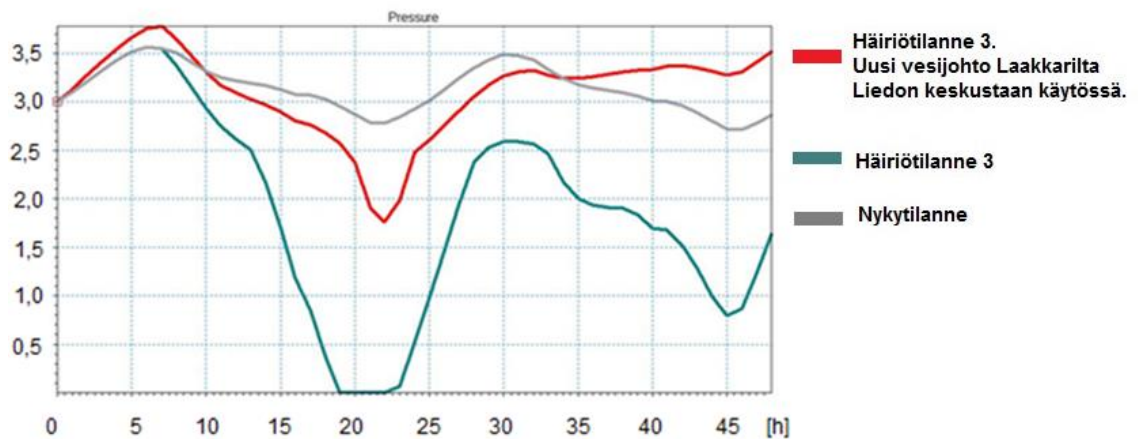


Kuva 31. Alimmat paineet häiriötilanteessa 2, kun a) uusi vesijohto on käytössä ja b) ilman vesijohtoa.

Häiriötilanne 3

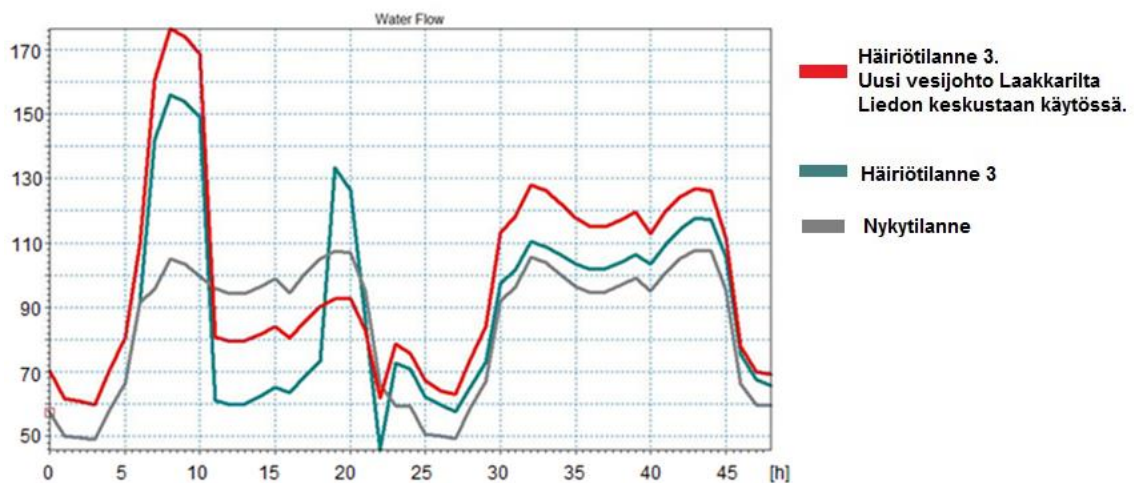
Häiriötilanne 3, jossa vuoto kohdistettiin Aurajoen alittavaan putkeen, aiheutti tarkastelluista häiriötilanteista kaikkein merkittävimmät vaikutukset vesijohtoverkoston. Kun tässä häiriötilanteessa verkostoon lisätään uusi vesijohto Laakkarilta Liedon keskusta, voidaan havaita, että se parantaa verkoston toimintaa häiriötilanteessa.

Kuvassa 33 on esitetty Keisvuoren vedenpinnan muutokset häiriötilanteen 3 aikana. Kuvasta voidaan nähdä, että uuden vesijohdon ollessa käytössä Keisvuoren ylävesisäiliö ei pääse tyhjenemään, vaan sen vedenpinta laskee alimmillaan 1,8 metriin. Ilman uutta vesijohtoa Keisvuoren ylävesisäiliö tyhjeni klo 19:00 ja alkoi täyttyä vasta hetkellä, jolloin Aurajoen alittava putki saatiin jälleen käyttöön.



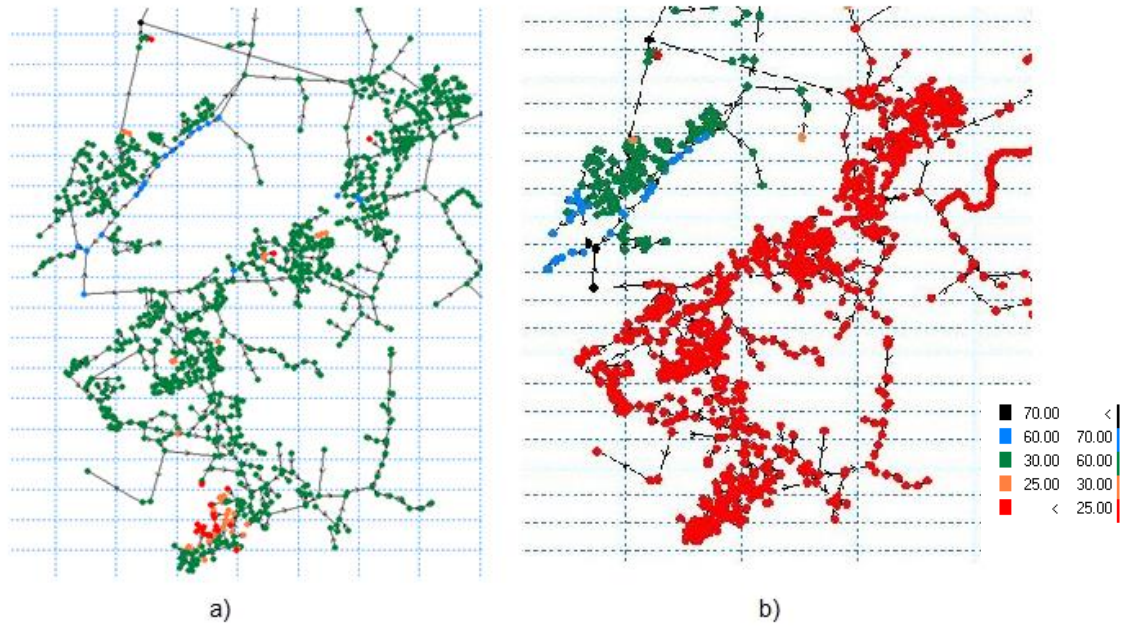
Kuva 32. Häiriötilanne 3. Keisvuoren ylävesisäiliön vedenpinnan korkeus, kun uusi vesijohto on käytössä.

Kun Laakkarilta verkostoon johdettava vesi pääsee kulkemaan Liedon keskustan suuntaan uutta vesijohtoa pitkin, havaitaan, että virtaama Laakkarilta kasvaa verrattuna häiriötilannetarkasteluun, joka tehtiin ilman uutta vesijohtoa (kuva 33). Verkoston kapasiteetti kasvaa uuden vesijohdon myötä, jolloin verkostoon saadaan johdettua enemmän vettä häiriötilanteessa.



Kuva 33. Häiriötilanne 3. Virtaama Laakkarilta, kun uusi vesijohto on käytössä.

Kun uusi vesijohto on käytössä, verkoston paineet eivät laske alle 25 mpv:n kuin Littoisten alueella. Paineiden arvot verkostossa vastaavat suurimmilta osin nykytilannetta. Kun uusi vesijohto ei ole käytössä, Keisvuoren ylävesisäiliön tyhjeneminen aiheutti paineiden laskua laajasti alle 25 mpv:n. Kuvassa 35 on esitetty verkoston alimmat paineet häiriötilanteessa ilman uutta vesijohtoa sekä vesijohdon kanssa.



Kuva 34. Alimmat paineet häiriötilanteessa 3, kun a) uusi vesijohto on käytössä ja b) ilman vesijohtoa.

6 JOHTOPÄÄTÖKSET

Häiriötilanteiden simuloinnin tuloksien perusteella voidaan todeta, että verkoston runkolinjoihin kohdistuvilla putkien murtumisella on merkittäväkin vaikutusta verkoston toimintaan. Vaikutuksia havaittiin erityisesti tilanteissa, joissa Laakkarin tai Mustavuoren alavesisäiliöltä ei pystytä johtamaan verkostoon vettä nykytilannetta vastaavaa määrää.

Mallinnuksen avulla tarkastelluista häiriötilanteissa vain Nuolemontien vesijohtoon kohdistettu vuoto ei aiheuttanut merkittäviä vaikutuksia verkoston toimintaan, sillä kyseisen vesijohdon ollessa pois käytöstä saadaan vettä johdettua verkostoon sekä Keisvuoren ylävesisäiliöön toista reittiä. Kun Mustavuoren alavesisäiliö on pois käytöstä, ei Laakkarin alavesisäiliöltä pystytä johtamaan verkostoon riittävästi vettä, jotta Keisvuoren ylävesisäiliö ei pääsisi tyhjenemään. Ylävesisäiliön tyhjeneminen häiriötilanteessa aiheutti myös paineiden laskua verkostossa. Aurajoen alittavan putken vaurioituminen aiheutti simuloituista tilanteista kaikkein merkittävimmät vaikutukset verkoston toimintaan. Jos Aurajoen alittava putki ei ole käytössä, Laakkarilta saadaan verkostoon johdettua vettä vain pohjoisen suuntaan lähteviä vesijohtoja pitkin, joiden kapasiteetti ei riitä johtamaan vettä verkostoon nykytilannetta vastaavaa määrää. Tämän seurauksena Keisvuoren vesitorni tyhjenee ja paineet laskevat laajalla alueella alle 25 mpv:n.

Vedenkulutuksen kasvaessa verkostossa Laakkarin alavesisäiliön pumppujen ohjauksia voidaan säätää ja painetasoa nostaa. Verkostomallin avulla tarkasteltiin, voidaanko häiriötilanteissa nostaa Laakkarin alavesisäiliöltä painetta sellaiseen tasoon, jossa alavesisäiliöltä saataisiin johdettua verkostoon nykytilannetta vastaava vesimäärä. Paineen nostaminen ei kuitenkaan ole kannattavaa, sillä verkoston paineet kasvavat tällöin laajasti yli 60 mpv:n.

Häiriötilanteissa verkoston toimintavarmuus parantui huomattavasti, kun suunniteltu vesijohto Laakkarin alavesisäiliöltä Liedon keskustaani oli käytössä. Mallinnuksella saatujen tuloksien perusteella voidaan todeta, että kyseinen vesijohto tulisi rakentaa, jotta verkoston toimintavarmuutta saadaan parannettua.

Mallinnuksen tuloksia tarkasteltaessa on hyvä muistaa, että verkostomalliin oli tässä työssä sisällytetty uusi yhdysvesijohto Laakkarin alavesisäiliöltä Liedon asemalle jo nykytilannetta sekä häiriötilanteita simuloitaessa. Yhdysvesijohdon yleissuunnitelmassa

todetaan, että uusi vesijohto toimii varavesiyhteytenä, kun Laakkarin alavesisäiliöltä etelään lähtevä syöttövesijohto on pois käytöstä. Voidaan olettaa, että ilman uutta yhdysvesijohtoa mallinnettujen häiriötilanteiden vaikutukset verkoston toimintaan olisivat olleet merkittävämmät. Ilman yhdysvesijohtoa, kun etelän suuntainen syöttövesijohto on pois käytöstä, ei Laakkarilta saada johdettua verkostoon vettä kuin Liedon aseman suuntaan kulkevan 160 M vesijohdon avulla, jonka kapasiteetti ei riitä turvaamaan riittävää veden saantia.

Häiriötilanteiden mallinnuksen avulla tehdyn tarkastelun perusteella voidaan todeta, että jo suunnitellut vesijohdot tulisi rakentaa verkoston toimintavarmuuden parantamiseksi. Lisäksi olisi tärkeää huomioida runkolinjojen ikä sekä saneeraustarve verkoston toimintavarmuuden turvaamiseksi, sillä verkoston ikääntyessä myös riski vaurioille kasvaa.

LÄHTEET

Hyde, N. 2004. Computer Modeling of Water Distribution. Denver, Colorado: American Waterworks Association.

Ljung, L. & Glad, T. 1994. Modeling of Dynamic systems. Upper Saddle River, New Jersey: Prentice Hall.

Nakayma, Y. & Boucher, R.F. 1999. Introduction to fluid mechanics. London: Arnold.

Pulli M. 2009. Virtaustekniikka. Tampere: Tammertekniikka.

Riihinen H. 2010. Liedon kunta. Kunnan vesihuollon kehittämissuunnitelma. Saatavilla sähköisesti osoitteessa <http://www.lieto.fi/download/noname/%7BA46ACA3E-13B6-4B54-9CAD-2FD91D52661F%7D/11116>.

RIL 2003. RIL 124-1 Vesihuolto I. Helsinki: Suomen rakennusinsinöörienliitto RIL ry.

RIL 2004. RIL 124-2 Vesihuolto II. Helsinki: Suomen rakennusinsinöörienliitto RIL ry.

RIL 2010. RIL 237-1 Vesihuoltoverkkojen suunnittelu, perusteet ja toiminnallisuus. Helsinki: Suomen rakennusinsinöörienliitto RIL ry.

Vikman, H. & Arosilta, A. 2006. Vesihuollon erityistilanteet ja niihin varautuminen. Helsinki: Suomen ympäristökeskus.