



Osaamista
ja oivallusta
tulevaisuuden
tekemiseen

Viivi Magi

Vesijohtoverkon kuntotutkimus- ja vuodonpaikannusmenetelmät

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Energia- ja ympäristötekniikka

Insinöörityö

2.12.2020

Tekijä Otsikko Sivumäärä Aika	Viivi Magi Vesijohtoverkon kuntotutkimus- ja vuodonpaikannusmenetelmät 33 sivua 2.12.2020
Tutkinto	Insinööri (AMK)
Tutkinto-ohjelma	energia- ja ympäristötekniikka
Ammatillinen pääaine	ympäristötekniikka
Ohjaajat	vastaava piirimestari Anssi Yrjölä lehtori Kaj Lindedahl
<p>Insinööriyössä oli tavoitteena käydä läpi HSY:n vesihuollon verkko-osastolla päivittäisessä käytössä olevia vesijohtoverkon vuodonpaikannusmenetelmiä ja vuosien aikana pilotoituja eri vesijohtoverkon kuntotutkimusmenetelmiä. Työssä selvitettiin vuodonpaikannusmenetelmien toimintaperiaatteet soveltuvuuksineen sekä viime vuosien aikana pilotoitujen kuntotutkimusmenetelmien osalta menetelmien toimintaperiaatteet, tutkimusten suorittaminen ja keskeisimmät tulokset.</p> <p>HSY:n vesijohtoverkon vuotavuus on hieman laskenut vuodesta 2010–2012, ja putkirikkoja on keskimäärin 300 vuodessa. Uusia toimintamalleja ja menetelmiä tarvitaan verkoston vuotojen paikantamiseen sekä sen kunnon määrittämiseen. Päivittäisessä käytössä olevia vuodonetsintämenetelmiä ovat tällä hetkellä kuuntelupiikki, korrelaattori, maamikrofoni sekä ääni- ja paineloggerit. Näiden pitkään käytössä olleiden ja luotettavien menetelmien lisäksi HSY on pilotoinut 2010-luvulla muun muassa veden laatuun, akustisiin ilmiöihin, magneettikentän muutoksien mittaamiseen, merkkikaasuun sekä tutkatekniikkaan perustuvia menetelmiä. Pilotoiduilla kuntotutkimusmenetelmillä on saatu vuosien aikana erityyppistä tietoa, jota on pystytty monipuolisesti hyödyntämään. Näiden pilotoitujen menetelmien pohjalta selvitettiin myös muita kuntotutkimusmenetelmiä sen mukaan, minkä tyyppisille menetelmille tulevaisuudessa saattaisi olla tarvetta.</p> <p>Työhön haastateltiin menetelmien soveltuvuuksista ja vaatimuksista eri palveluiden tarjoajia sekä HSY:n asiantuntijoiden ja operatiivisen puolen työntekijöiden kokemuksia suoritetuista tutkimuksista. Selvitystyössä hyödynnettiin myös pilotoitujen menetelmien osalta tutkimusraportteja sekä tutustuttiin HSY:n vuodonetsintätiimien päivittäiseen työhön. Pilotoitujen menetelmien sekä valikoidusti muutaman muun menetelmän pohjalta kerätyt tiedot koottiin ja tiivistettiin taulukkoon, joka toimii apuna sopivan menetelmän löytämiseksi.</p>	
Avainsanat	vesijohtoverkosto, kuntotutkimus, vuodonpaikannus

Author Title	Viivi Magi Water Network Condition Survey and Leak Detection Methods
Number of Pages Date	33 pages 2 December 2020
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Energy and Environmental Technology
Professional Major	Environmental Engineering
Instructors	Anssi Yrjölä, Senior District Supervisor Kaj Lindedahl, Senior Lecturer
<p>The aim of this Bachelor's thesis was to introduce the different water network leak detection methods that are in daily use and different water network condition survey methods that has been piloted over the years in HSY Water Services Network Department. The operating principles and suitability for different leak detection methods as well as operating principles, investigations and essential results in different condition survey pilot projects were studied in this thesis.</p> <p>Water loss in HSY's water network has slightly decreased from the years 2010–2012. Currently there are about 300 pipe breaks in a year. There is a need for new procedures and methods for leak detection and networks condition assessment. Different kinds of leak detection methods have been in use for several years and they have proven to be sufficient and reliable. In addition to methods in continuous use, in the 2010s HSY has piloted different condition survey methods based on different phenomena. Over the years, piloted condition survey methods have provided different types of information that have been able to be used in various ways. On the basis of piloted methods, other condition survey methods were also examined, depending on what types of methods might be needed in the future.</p> <p>Different condition survey providers, HSY's experts and operative staff were interviewed in the thesis. Research reports were also utilized for the piloted methods, and the daily work of HSY's leak detection teams was examined. The data collected was compiled and summarized in a table to assist in finding a suitable method amongst the piloted methods as well as amongst a few other selected methods.</p>	
Keywords	water network, condition survey, leak detection

Sisällys

Lyhenteet

1	Johdanto	1
2	Vesijohtoverkon kuntotutkimuksien tarve	3
3	HSY:n vesijohtoverkoston nykytilanne	4
3.1	Vesijohtoverkoston kunto	4
3.2	Vesijohtoverkoston kuntoluokitukset	6
3.3	Käytössä olevat vuodonpaikannusmenetelmät	8
3.3.1	Elektroninen kuuntelupiikki	8
3.3.2	Korrelaattori	9
3.3.3	Maamikrofoni	10
3.3.4	Akustiset ääni- ja paineloggerit	11
4	HSY:llä pilotoidut vesijohtoverkoston kuntotutkimusmenetelmät	12
4.1	Veden laatuun perustuva menetelmä	13
4.2	Akustisiin ilmiöihin perustuvat menetelmät	14
4.2.1	ePulse	14
4.2.2	SmartBall	15
4.2.3	PipeScanner	16
4.3	Sähkömagneettinen menetelmä	17
4.4	Tutkatekniikkaan perustuva menetelmä	18
4.5	Merkkikaasuun perustuva menetelmä	19
5	Pilotoitujen kuntotutkimusmenetelmien tutkimukset ja tulokset	21
5.1	Veden laatuun perustuva menetelmä	21
5.2	Akustisiin ilmiöihin perustuvat menetelmät	22
5.3	Sähkömagneettinen menetelmä	23
5.4	Tutkatekniikkaan perustuva menetelmä	23
5.5	Merkkikaasuun perustuva menetelmä	24
6	Kuntotutkimusmenetelmien soveltuvuudet ja vaatimukset	25
6.1	Menetelmien yhteenvetotaulukko	25

6.2	Menetelmätaulukon hyödyntäminen	27
6.3	Muita menetelmävaihtoehtoja	28
7	Yhteenveto	30
	Lähteet	32

Lyhenteet

HSY	Helsingin seudun ympäristöpalvelut -kuntayhtymä.
POI	Point of interest. Kiinnostava tai erityinen kohta. Tässä työssä point of interestit ovat 100 metrin säteellä määriteltäviä mahdollisia vuodon sijaintialueita.
SAR	Synthetic Aperture Radar. Suuren laskennallisen läpimitan tutka, joka on mikroaaltoalueella toimiva kaukokartoitukseen ja tiedusteluun tarkoitettu instrumentti.

1 Johdanto

Vesijohtoverkoston ikääntyessä myös niiden saneeraustarve kasvaa. Saneeraustarpeen arviointiin tarvitaan monipuolisia työkaluja ja tietoa, jotta saneeraus pystytään kohdentamaan oikeaan aikaan ja oikeaan kohteeseen. Vesijohtoverkon kuntotutkimukset ovat yksi olennainen osa verkoston kunnon määrittämiseen. Kuntotutkimusprosessi lähtee tarpeesta, joka voi olla suunniteltu tai akuutti.

HSY:llä on vesijohtoverkosta yhteensä noin 3 000 kilometriä ja verkosto on iältään ja kunnoltaan hyvin vaihtelevaa eri alueiden välillä. Yleisin putkimateriaali verkostossa on erilaiset valuraudat ja toiseksi yleisin materiaali on erilaiset muovit. Vesijohtoverkon vuototaso on hieman laskenut vuodesta 2010–2012. Vesijohtoverkoston pumpatusta vedestä noin 18 % arvioitiin olevan vuotovesiä vuonna 2018. Suuri osa vuotovesistä syntyy niin sanottuina piilovuotoina, jolloin vuoto saattaa olla hyvinkin pitkään havaitsematta.

HSY:llä vuodonetsintätiimit etsivät ja paikallistavat vuotoja päivittäin ja järjestelmällisesti verkostoa läpikäyden. Päivittäinen vuodonetsintä toteutetaan pitkään käytössä olleilla ja hyviksi todetuilla menetelmillä, joilla vuodot pystytään varmistamaan ja paikallistamaan usein heti paikan päällä. Päivittäisessä vuodonetsinnässä käytetyt menetelmät ovat luotettavia ja hyvin soveltuvia suurimpaan osaan vesijohtoverkosta, mutta on kokemuksia myös kohteista, joihin voisi soveltaa myös muita menetelmiä. Päivittäisen vuodonetsinnän lisäksi HSY:llä pilotoidaan myös vuosittain erityyppisiä vesijohtoverkoston kuntotutkimusmenetelmiä, joilla on pystytty tutkimaan ja paikantamaan vuotoja sellaisista kohteista, joihin käytössä olevilla menetelmillä on ollut haasteellisempaa päästä käsiksi.

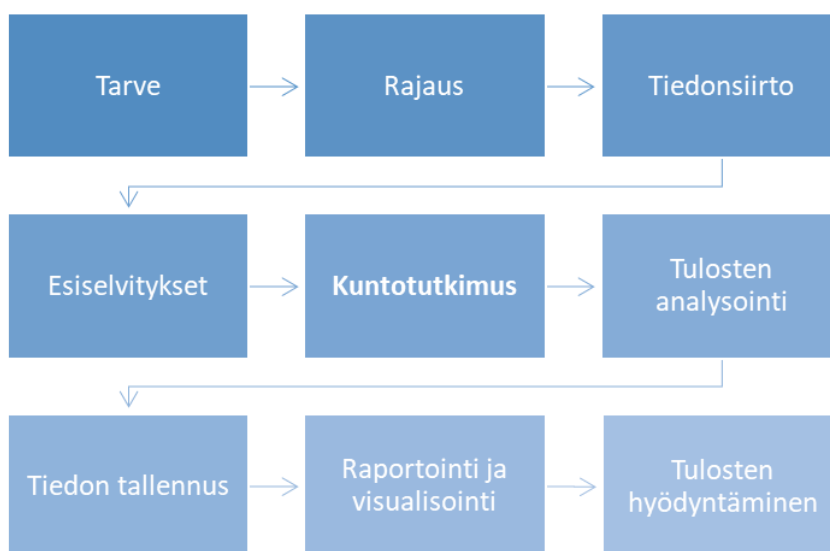
Vuosien aikana on pilotoitu monipuolisesti erityyppisille verkosto-osuuksille eri ilmiöihin perustuvia menetelmiä ja saatu arvokasta tietoa tutkitusta verkostosta. Kuntotutkimusmenetelmät ovat usein riippuvaisia putken materiaalista ja koosta, sekä verkoston rakenteesta ja käyttöolosuhteista. Tutkimusmenetelmää valittaessa onkin tärkeää selvittää mahdollisimman tarkasti tutkittavan kohteen eri ominaisuudet, jotta pystytään valitsemaan oikean tyyppinen tutkimusmenetelmä ja tutkimukset pystytään suorittamaan onnistuneesti. Kuntotutkimusmenetelmästä riippuen voidaan tutkimuksissa saada selville esimerkiksi putken seinämänpaksuus, sisä- ja ulkopuolinen korroosio, vuodot ja ilmatasut. Vertailemalla eri menetelmien soveltuvuuksia ja vaatimuksia tutkimusten

toteutukselle pystytään myös arvioimaan, minkälaiseen tarpeeseen mikäkin menetelmä soveltuu. Tässä työssä on jo entuudestaan pilotoitujen kuntotutkimusmenetelmien lisäksi perehdytty muutamiin muihin markkinoilla oleviin kuntotutkimus- ja vuodonpaikannusmenetelmiin sen mukaan, minkä tyyppisille menetelmille on työn edetessä arvioitu olevan sovelluskohteita tulevaisuudessa.

2 Vesijohtoverkon kuntotutkimuksien tarve

Suomessa monet vesilaitokset ovat tilanteessa, jossa vesihuoltoverkoston ikääntyminen näkyy kasvavana saneeraustarpeena. Saneeraustarpeen arviointia hankaloittaa vesihuoltoverkoston pääasiallinen sijaitseminen maan alla, jolloin arvioinnin tueksi tarvitaan paljon erityyppistä tietoa verkostosta. Myös vesihuoltolaki velvoittaa vesilaitokset olemaan selvillä laitteistonsa kunnosta, tarkkailemaan sitä sekä vuotovesien määrää. Saneeraustarpeen arviointiin on verkoston kunnosta erilaisia malleja, joiden avulla voidaan arvioida sekä ylläpidon että kuntotutkimuksien osalta resurssien tarvetta ja kohdentamista. Verkoston oikea-aikaisen saneeraamisen kohteiden valintaan on yhtenä apuna verkoston kuntotutkimukset. Kuntotutkimuksilla pystytään selvittämään verkoston kuntoa paikallisesti, mutta saaduilla tuloksilla pystytään päivittämään olemassa olevia verkoston kunto- ja elinkaarimalleja niin, että tiedot palvelevat siltä osin myös koko verkostoa. (1.)

Kuntotutkimusprosessi lähtee tarpeesta, joka voi olla suunniteltu tai äkillinen. Kuvassa 1 on esitetty vesihuoltoverkkojen kuntotutkimusprosessin päävaiheet. Itse kuntotutkimuksen suorittaminen on prosessin keskiössä, mutta on tärkeää huomioida prosessin jokaisen osa-alueen merkitys tutkimusten onnistumisen ja siitä saatavan tiedon luotettavuuden kannalta. (2.)



Kuva 1. Vesihuoltoverkkojen kuntotutkimusprosessin päävaiheet (2).

Riippuen siitä minkä tyyppistä kuntotutkimusmenetelmää käytetään, tutkimusten suorittaminen saattaa vaatia usein paljon esiselvitystyötä ja erilaisia toimenpiteitä kentällä tutkimusten suorittamisen aikana. Tutkimuksista saatavaa tietoa voidaan hyödyntää monipuolisesti. Paikannetut vuodot pystytään korjaamaan ja vuotojen tyyppin ja määrän mukaan pystytään myös yleisellä tasolla arvioimaan putken kuntoa sekä estämään isompien vahinkojen syntyminen. Kuntotutkimuksissa, joissa saadaan selville putken rakenteellinen kunto, pystytään arvioimaan putken jäljellä olevaa käyttöikää ja käyttämään tietoa esimerkiksi suunnittelun ja päätöksenteon tukena. (2.)

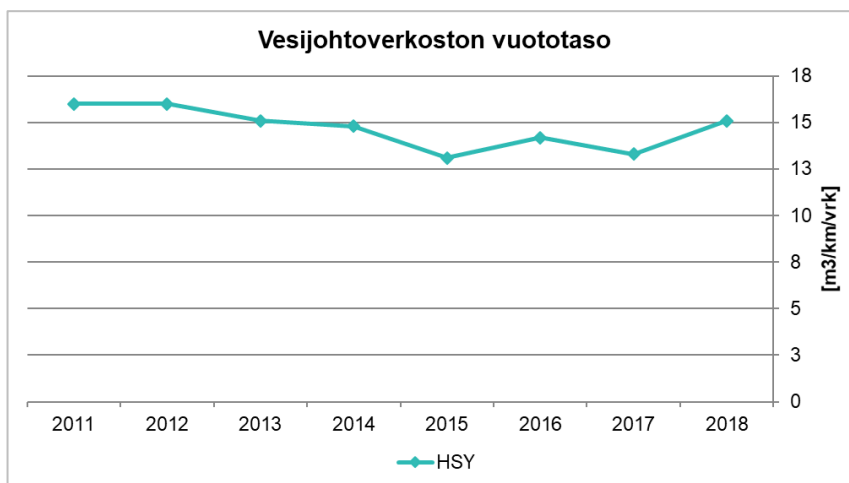
3 HSY:n vesijohtoverkoston nykytilanne

3.1 Vesijohtoverkoston kunto

HSY huolehtii pääkaupunkiseudun yli miljoonan asukkaan vesihuollosta toimittamalla puhdasta vettä, huolehtimalla jäteveden poisjohtamisesta ja puhdistuksesta sekä hulevesien johtamisesta vesistöihin. HSY:llä on tällä hetkellä vesi- ja viemäriverkostoa yhteensä noin 8 000 kilometriä. Tästä vesijohtoverkoston osuus on noin 3 000 kilometriä, josta noin 300 kilometriä on päävesijohtoa ja loput jakelujohtoa. Päävesijohtojen tarkoitus on kuljettaa vettä vedenpuhdistuslaitoksilta vesitorneihin ja kulutuskeskuksiin, joissa veden tarve on suuri. Päävesijohdoista haarautuvat jakelujohdot palvelevat kuluttajia, eli kiinteistöjä, jotka liittyvät niihin kiinteistökohtaisilla tonttivesijohdoilla. (3.)

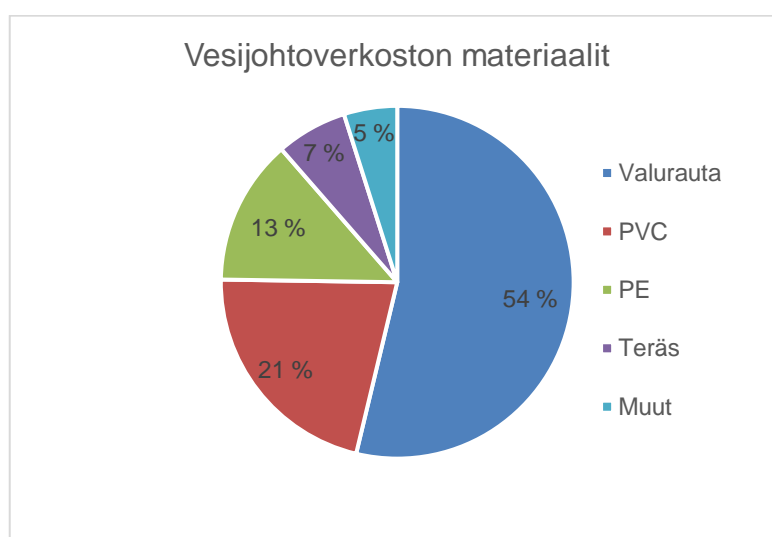
HSY:n vesijohtoverkon vuototaso 2010-luvulla on esitetty kuvassa 2. Vuototaso on hienan laskenut vuodesta 2010–2012. Putkirikkoja raportoidaan vuosittain noin 300 kappaletta. Vuonna 2018 vuotovesiä muodostui noin 17 miljoonaa kuutiometriä vuodessa, joka on noin 15 m³/vrk/verkosto-km. Tämä tarkoittaa sitä, että vuotovesien osuus oli noin 18 % vesijohtoverkoston pumpatusta vedestä. Vuotovesien osuuteen tulee kuitenkin huomioida myös esimerkiksi mahdolliset mittarivirheet ja veden luvaton käyttö. HSY:n toiminta-alueella vesijohtojen ikä, materiaali, koko ja tämänhetkinen kunto vaihtelevat merkittävästi, mikä vaikuttaa myös siihen, että vuototaso vaihtelee suuresti eri alueiden välillä. Suurin osa 2010-luvun jälkeen raportoiduista vuotokorjauksista on HSY:n omassa vesijohtoverkossa ja noin 10–20 % yksityisissä tonttijohdoissa. Raportoimattomien vuotokorjauksien osuus tonttijohdoista voi kuitenkin olla merkittäväkin, sillä tonttijohdot eivät

kuulu HSY:lle. Vastuu tonttijohtojen kunnossapidosta on niiden omistajalla, eikä niiden korjauksen raportoinnista ole velvollisuutta HSY:lle. (4.)



Kuva 2. HSY:n vesijohtoverkoston vuototaso 2010-luvulla (4).

HSY:n vesijohtoverkoston yleisin putkimateriaali on erilaiset valuraudat, jotka kattavat yli puolet koko verkostosta. Valurautojen jälkeen toiseksi yleisin putkimateriaali verkostossa on erilaiset muovit. Kuvassa 3 on esitetty putkimateriaalien prosentuaaliset osuudet vesijohtoverkostossa vuonna 2018. Valurautaputkien iäkkäys ja runsas määrä verkostossa tekee niistä myös putkirikkotiheydeltään suurimman putkimateriaalin. Putkirikkotiheys (kpl/km) on suuri erityisesti 1940–1960-luvuilla rakennetuissa valurautaputkissa. (4.)



Kuva 3. Putkimateriaalien osuudet HSY:n vesijohtoverkostossa vuonna 2018 (4).

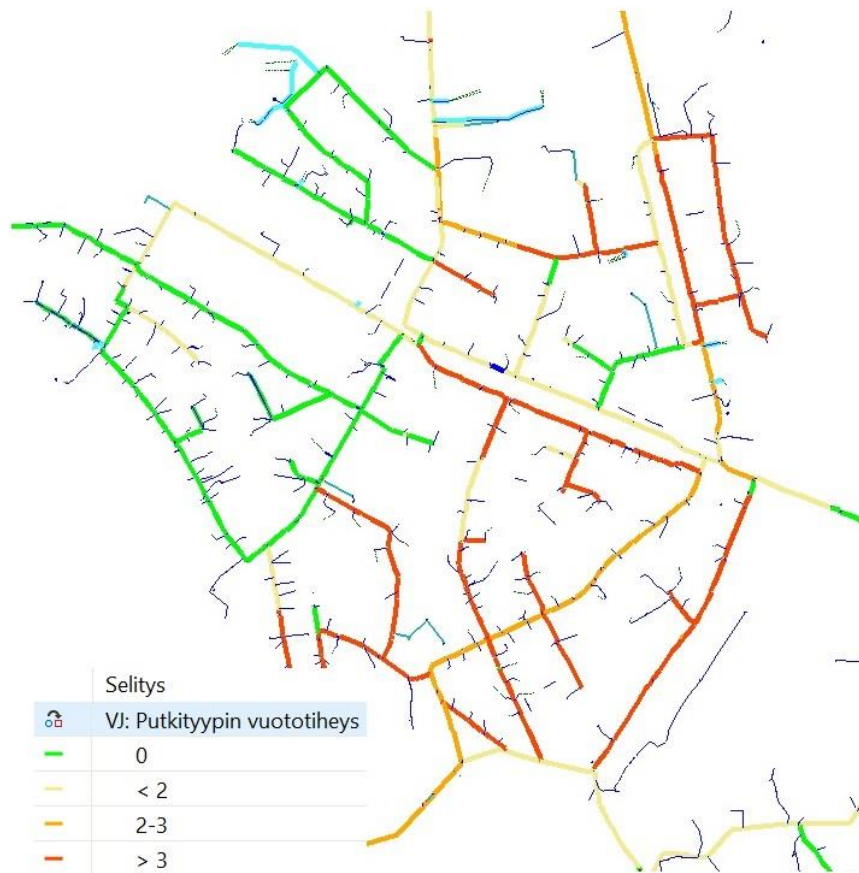
Täysin täsmällisiä lukuja vuotojen syistä ei ole, johtuen verkoston iäkkyudesta ja siitä, että aikoinaan vuotojen syntyperää on paikoitellen raportoitu epäsäännöllisesti. Eri kaupunkien välillä on myös käytetty erilaisia osia ja putkimateriaaleja, jolloin luotettavaa vertailua esimerkiksi verkostojen välillä ei voida tehdä. Putkirikot ovat tilastollisesti kuitenkin suurin vuotojen aiheuttaja ja toiseksi yleisin syy on liitoskappaleet. (4.)

Vuotoja syntyy putkimateriaalista riippuen usein putkien syöpyessä ja murtuessa sekä niiden asennusvirheistä. Vuodot jaetaan tyypillisesti ilmi- ja piilovuotoihin sen mukaan, miten vuoto on havaittavissa. Ilmivuodot tulevat lähes heti ilmi purkautuessaan maan pinnalle, viemäriin tai esimerkiksi talojen kellareihin valuessaan. Myös paineen aleneminen verkostossa ja ylävesisäiliön pinnan äkillinen aleneminen on usein merkki ilmivuodosta. Ilmivuotojen havaitseminen on siis kohtalaisen helppoa, etenkin jos vuoto on suuri. Vuodon täsmällinen paikallistaminen esimerkiksi olosuhteista johtuvista syistä saattaa joskus olla haastavaa, sillä vuotokohta ei aina sijaitse siinä kohdassa, jossa vuoto tulee näkyviin. Piilovuotojen havaitseminen ja paikallistaminen on haastavampaa, ja ne usein johtuvat putken syöpymistä sekä liitoskappaleiden ja muiden asennuskappaleiden vioista. Piilovuodot voivat vuotaa pitkiäkin aikoja, ennen kuin ne paikallistetaan eri vuodonetsintämenetelmien avulla. Ne eivät usein tule näkyviin maan pinnalle, vaan vesi purkautuessaan imeytyy maaperään tai valuu suoraan vuotaviin viemäriin. (5, s. 126–127.)

3.2 Vesijohtoverkoston kuntoluokitukset

HSY:llä on käytössä Trimble NIS -verkkotietojärjestelmä, joka sisältää koko HSY:n toiminta-alueen verkostomallin. Verkkotietojärjestelmä mahdollistaa muun muassa erityyppisten analyysien luomisen sinne vietyjen tietojen pohjalta. Vesijohtoverkostolle on HSY:llä luotu muun muassa analyysi putkien kuntoluokituksille, joka perustuu vesijohtoverkoston putkirikkotiheyksiin. Putkirikkotiheydet on laskettu HSY:n vesijohtojen perustietojen ja vuotoraporttien perusteella. Putket on ryhmitelty halkaisijan, materiaalin ja rakennusvuoden perusteella omiin ryhmiinsä, ja putkirikkotiheys on laskettu jokaisen ryhmän sisällä erikseen. Laskentaan on käytetty koko 2000-luvun vuotoraportteja. Putkirikkotiheyden perusteella putket on luokiteltu neljään kuntoluokkaan asiantuntija-arvion pohjalta. Kuvassa 4 on esimerkki vesijohtoverkoston osasta, jossa näkyy putkien

kuntoluokitukset putkirikkotiheyden (kpl/km) perusteella. Jokaiselle kuntoluokitukselle on määritelty väri kuntoluokan visualisointia varten.



Kuva 4. Kuvakaappaus verkkotietojärjestelmän kuntoluokituksista visualisoituna värien mukaan.

Vesijohtoverkoston tarkasteleminen verkkotietojärjestelmästä kuntoluokituksen avulla mahdollistaa yleisellä tasolla verkoston kunnon havainnoinnin. Kuntoluokitusten avulla voidaan myös havaita verkostoalueita ja osuuksia, joille kuntotutkimuksia on kannattavaa kohdentaa. Tutkimuksiin on järkevää ja perusteltua valita alueita ja osuuksia, joissa kuntoluokitus on heikoin. Näin saadaan kuntotutkimukset kohdistettua alueille, joissa on lähtökohtaisesti syytä epäillä vuotoja ja putken huonoa kuntoa. Kuntotutkimuksissa saaduilla tuloksilla pystytään myös arvioimaan sitä, kuinka hyvin kuntoluokitus vastasi tutkitun kohteen selvitettyä kuntoa (1).

3.3 Käytössä olevat vuodonpaikannusmenetelmät

Vuodonetsinnästä vastaa putkiasentajista koostuvat vuodonetsintätiimit, joiden päivittäisenä tehtävänä on käydä vesijohtoverkosta läpi paitsi järjestelmällisesti, mutta myös epäiltyjen ja todettujen vuotoalueiden ja -kohteiden osalta. Tällä hetkellä HSY:llä päivittäisessä käytössä olevia vesijohtoverkoston vuodonpaikannusmenetelmiä ovat elektroninen kuuntelupiikki, korrelaattori, maamikrofoni sekä akustiset ääni- ja paineloggerit.

3.3.1 Elektroninen kuuntelupiikki

Elektroninen kuuntelupiikki on usein ensimmäinen menetelmä, jota käytetään vuodon havaitsemiseen vesijohdossa. Kuuntelupiikin avulla voidaan varmistaa muilla menetelmillä saatu vuotoepäily ja suorittaa sekä säännöllistä että satunnaista vuodonetsintää. Laitteistoon kuuluu mikrofoni, vahvistin ja kuulokkeet. Kuuntelupiikki asetetaan kiinni venttiiliin karaan tai palopostiin, josta vuotoääni kulkeutuu vahvistimen kautta kuulokkeisiin (kuva 5). (6.)



Kuva 5. Kuuntelupiikin käyttö palopostin venttiilistä.

Vuotoäänien havaitseminen vaatii kuuntelupiikin käyttäjältä harjaantunutta kykyä erottaa vuotoäänit esimerkiksi taustakohinasta ja normaalista veden aiheuttamasta virtausäänestä. (6.)

3.3.2 Korrelaattori

Vuodon sijainnin tarkempaan paikallistamiseen putkessa voidaan käyttää korrelaattoria, jonka toiminta perustuu vuotoäänien kantautumiseen putken seinämässä. Sen avulla voidaan paikallistaa tarkempi vuotokohta esimerkiksi kuuntelupiikin avulla saadun vuotoäänien perusteella. Korrelaattorilaitteistoon kuuluu anturit, lähettimet ja keskusyksikkö. Korrelointi voidaan suorittaa venttiilin tai palopostin kautta asettamalla anturit vuotoepäillyn putkiosuuden molempiin päihin (kuva 6). (6.)



Kuva 6. Korrelaattorilaitteisto ja toinen anturi palopostin venttiilissä.

Korrelaattori laskee vuodon sijainnin antureille saapuvien vuotoäänien aikaerosta, laitteistolle syötetyn putken materiaalin ja koon sekä mitattavan putkiosuuden pituuden avulla. Korrelaattorilaitteiston keskusyksikkö esittää graafisesti korreloitavan putkiosuuden, jossa vuotokohta on grafiikassa korkeimpana piikkinä (kuva 7). Tarkimmillaan vuodon sijainti voidaan saada jopa muutaman senttimetrin tarkkuudella. (6.)



Kuva 7. Korrelaattorin graafisesti esittämä vuotokohdan sijainti.

Korrelaattorilaitteistoon on mahdollista myös yhdistää hydrofonianturit, jotka mittaavat vuotoäänien kantautumista vedessä putken sisällä. Hydrofonianturit asennetaan esimerkiksi palopostiin tai muuhun laitteeseen, jossa ne ovat suoraan kosketuksissa veteen. (6.)

3.3.3 Maamikrofoni

Maamikrofonia käytetään vuodon paikantamiseen kuuntelemalla vuotoääniä maan pinnalta, jolloin pääsyä putkeen, venttiiliin tai palopostiin ei vaadita. Maamikrofonilaitteistoon kuuluu mikrofoni, kuulokkeet ja vastaanotin. Kuuntelupiikin tavoin sen käyttäminen vaatii harjaantunutta kuuloa tunnistaa vuotoäänet. Maamikrofonia siirretään maanpinnalla kerrallaan lyhyen matkaa aina kuunneltavaa putkiosuutta seuraten (kuva 8). (6.)



Kuva 8. Maamikrofonin käyttö.

Maamikrofonin avulla pystytään paikantamaan vuoto syvemmällekin asennetuista putkista sekä varmistamaan vuodon tarkka sijainti esimerkiksi korrelaattorilla saadusta vuotoepäilyn sijainnista. Maamikrofoni on myös hyvä työkalu vuotokohdan tarkkaan määrittelyyn ennen vuodonkorjausta, jolloin kaivuutyöt osataan kohdistaa oikealle sijainnille. (6.)

3.3.4 Akustiset ääni- ja paineloggerit

Akustisia ääniloggereita (kuva 9) käytetään vuotoepäilyjen varmistamiseen erityisesti alueilla, joissa kannattavinta on kuunnella vuotoääniä yöaikaan, kuten vilkkaasti liikennöidyillä ja tiheästi asutuilla alueilla, joissa vedenkulutus ja liikenteen melu saattaa aiheuttaa häiriötä vuotoäänien kuunteluun. Ääniloggerit sijoitetaan niissä olevan magneettin avulla venttiilin karaan tai palopostiin. Ääniloggereita voidaan sijoittaa tietylle tutkittavalle alueelle useita haluttuihin tarkastuspisteisiin ja näin rajata tutkittava alue. Ne ohjelmoidaan useimmiten kuuntelemaan vuotoääniä yöaikaan haluttuun kellonaikaan samanaikaisesti. Tyypillisesti ääniloggerit ohjelmoidaan tallentamaan ääntä sekunnin välein,

kahden tunnin ajan. Ääniloggerit tunnistavat vuotoäänien sen kulkeutuessa putken seinämää pitkin. HSY:llä käytössä olevat akustiset ääniloggerit käydään keräämässä mittauksien jälkeen ja tallennettu tieto ladataan ja tulkitaan erikseen siihen tarkoitettulla ohjelmistolla. Vuodon tarkkaa sijaintia ei akustisilla ääniloggereilla pystytä määrittelemään, mutta niillä on mahdollista varmistaa vuotoepäily tietylle alueelle ja suorittaa mittaukset joustavasti yöaikaankin. (6.)



Kuva 9. Akustiset ääniloggerit kuvassa vasemmalla ja paineloggeri kuvassa oikealla.

Paineloggereita (kuva 9) käytetään ääniloggereiden tavoin tietyille vuotoepäilylle alueelle asentamalla ne paloposteihin. Paineloggeri mittaa veden painetta, jonka avulla pystytään selvittämään, eroaako mitattavan alueen tai linjan painetaso kyseisen alueen tunnetusta painetasosta. Mikäli paineloggerilla saatu painetaso on eri kuin kyseisen alueen tiedossa oleva painetaso, voi olla syytä epäillä vuotoa. (6.)

4 HSY:llä pilotoidut vesijohtoverkoston kuntotutkimusmenetelmät

HSY:llä pilotoidaan vuosittain uusia vesijohtoverkoston kuntotutkimusmenetelmiä tunnistettujen tarpeiden mukaan. Tutkimusmenetelmästä riippuen voidaan saada selville hyvinkin tarkasti putken rakenteellinen kunto, vuotokohdat, ilmataskut, liitoskohdat ja kuntoarvio tutkitusta kohteesta. Kuntotutkimuksilla pystytään arvioimaan

saneeraustarvetta, putken jäljellä olevaa käyttöikää sekä paikantamaan ja korjaamaan vuodot. Vuosien aikana on pilotoitu eri ilmiöihin perustuvia menetelmiä, joita on tähän työhön sisällytetty saatavilla olleiden tutkimusraporttien ja kokemusten pohjalta. Pilotoituja kuntotutkimusmenetelmätyyppejä ovat olleet veden laatuun, akustisiin ilmiöihin, tutkatekniikkaan, merkkikaasuun ja sähkömagneettisiin ilmiöihin perustuvat menetelmät.

4.1 Veden laatuun perustuva menetelmä

AquaTrioscope-menetelmän toimintaperiaatteena on veden virtausominaisuuksien ja laatuarvojen mittaaminen verkostosta. Menetelmä soveltuu metallisille putkille, putken halkaisijasta riippumatta. Mittauksissa käytettävänä laitteistona toimii palopostiin tai palovesiasemaan asennettava vesitrioskooppi (kuva 10). Menetelmällä saadaan selville sekä putken hydrodynaaminen kunto että veden laatu. Mittauksista saatujen tuloksien perusteella analysoidaan tutkittavan alueen vesijohtoverkoston tekninen kunto. (7; 8.)

Virtausvastuksen avulla arvioidaan putken kunto sen perusteella, kuinka paljon putken sisäpintaan on muodostunut kertymää mangaanista, raudasta, kalkista ja korroosiosta. Veden laatua mitataan muuttuvan virtauksen avulla, kuinka paljon tai helposti hiukkasia irtoaa putken seinämiin kertyneistä sakkaumista. Menetelmän oletuksena on, että putken sisäpinnalle kertyvä aine lisää korroosiota ja kertyneen aineksen irtoaminen veteen lisää hygieenistä ja esteettistä riskiä. Veden laatua mitataan sähkönjohtavuuden, redox-potentiaalin, pH:n ja lämpötilan suhteen. Lisäksi mitataan sameus mittauksen alussa sekä veden kirkastumisaika. (7; 8.)



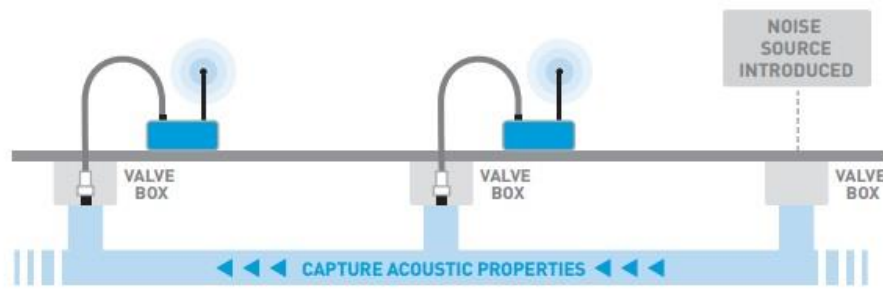
Kuva 10. Vesitrioskooppi (7).

Vesitrioskooppi asennetaan tutkimuksen ajaksi palopostiin tai palovesiasemaan, jolloin pääsyä putken sisälle ei vaadita. Menetelmän käyttö ei vaikuta myöskään vedenjake- luun, jolloin tutkittava linja voi olla normaalesti käytössä tutkimusten suorittamisen aikana. Tutkimuksessa saatu lopullinen tutkitun verkoston kuntoluokka perustuu virtaama- ja laa- tummittausten yhteistuloksiin, jossa painotetaan laatumittauksessa saatuja tuloksia enem- män, johtuen virtausmittauksen suuntaa antavista tarkkuuksista. (7; 8.)

4.2 Akustisiin ilmiöihin perustuvat menetelmät

4.2.1 ePulse

ePulse-menetelmässä mitataan ääniaallon kulkeutumista putkimateriaalissa ja vedessä putken sisällä. Menetelmän soveltuvuus on metalli- ja asbestiputkille kooltaan lähes kai- kille halkaisijoille. Menetelmässä ääniaalto syntyy putkeen kevyesti koputtamalla venttii- lin karaan tai suoraan putken pintaan. Ääniaalto pystytään synnyttämään myös laske- malla palopostista vettä. Ääniaalto kulkeutuu putkimateriaalia ja vettä pitkin, jolloin put- ken ulkopintaan tai venttiileiden karoihin asennetut sensorit havaitsevat äänen (kuva 11). (9.)



Kuva 11. ePulse-menetelmän toimintaperiaate (9).

Sensorit mittaavat ääniaallon kulkeman matkan sensoreiden välillä. Menetelmässä tulee tietää tarkasti tutkittavan putken eri ominaisuudet, kuten kimmokerroin. Ääniaallon etenemisnopeudesta saadaan putkiosuudelle keskimääräinen seinämäpaksuus, jota verrataan ennalta selvitettyyn putken alkuperäiseen seinämäpaksuuteen. Vertaamalla saatua seinämäpaksuutta putken alkuperäiseen seinämäpaksuuteen saadaan selville, kuinka monta prosenttia putken seinämä on ohentunut alkuperäisestä. Tuloksien pohjalta pystytään arvioimaan tutkitun putkiosuuden jäljellä oleva käyttöikä ja saneeraustarve sekä havaitaan vuotokohdat. (9.)

Sensoreita tulisi olla mitattavalla osuudella noin 100–200 metrin välein. Tutkimusten suoritusohjelmalla tutkittavassa putkessa ei saa olla ilmataskuja ja verkostossa tulee olla vähintään 1 baarin paine. Tutkittavalla putkiosuudella putken seinämän ja halkaisijan suhde voi olla korkeintaan 1:30. Tutkimusten suorittaminen ei vaikuta tutkittavan verkosto-osuuden vedenjakeluun. (9.)

4.2.2 SmartBall

SmartBall-menetelmä perustuu putkessa vapaana virtauksen mukana uivaan palloon, joka akustisen anturin avulla havaitsee vedestä vuotoäänit ja ilmataskut (kuva 12). Menetelmä soveltuu kaikille putkimateriaaleille. Muoviputkissa putken halkaisijan tulee olla yli 150 mm ja metalliputkissa yli 250 mm. Menetelmän avulla vuotojen ja ilmataskujen sijainnit paikallistetaan tyypillisesti alle kahden metrin tarkkuudella. Myös vuodon koko saadaan menetelmällä selville, ja jopa neulanreiän kokoiset vuodot pystytään havaitsemaan. (10.)



Kuva 12. SmartBall putkessa (11).

SmartBall syötetään linjaan esimerkiksi pysty-yhteen kautta, joka voidaan asentaa erikseen putkeen sopivaan kohtaan tai muuhun helppopääsyiseen paikkaan, kuten esimerkiksi mittarikaivoon. SmartBall on halkaisijaltaan 6,6 cm, ja sen ympärille laitetaan tutkimusten ajaksi vaahtomuovipehmuste, joka parantaa sen liikkuvuutta virtauksen mukana ja vaimentaa iskuja. Pallo pystyy toimimaan yhtäjaksoisesti 21 tuntia ja putkessa olevan virtauksen tulee olla 0,5–0,9 m/s. Virtausnopeus ja pallon toiminta-aika määrittelevät sen, kuinka pitkän putkiosuuden sillä pystyy maksimissaan tutkimaan kerralla. Pallon reittiä tutkittavalla putkiosuudella seurataan sensoreilla, joita tulee asentaa tietyn matkan välein. Tutkimuksissa on tärkeää tuntea tutkittava verkosto-osuus, sillä kaikki 100 mm halkaisijaltaan olevat ja sitä suuremmat haarat tutkittavalla osuudella tulee sulkea, jotta vältetään pallon karkaamiselta tutkittavalta putkiosuudelta. Tutkimusten suorittaminen vaatii siis tarkkoja esivalmisteluja paitsi tutkimusten onnistumisen kannalta myös alueen vedenjakelun takaamiseksi tutkimusten aikana. Menetelmä itsessään ei vaikuta vedenjakeluun. (10.)

4.2.3 PipeScanner

PipeScanner on putkeen sisään vietävä akustiseen putken skannaukseen tarkoitettu työkalu, joka lukee putken seinän puolialtoresonanssin (kuva 13). Menetelmä soveltuu metallisille putkille, joiden halkaisija on 300–600 mm. Menetelmällä pystytään selvittämään tarkasti putken kunto sekä havaitsemaan vuoto- ja liitoskohdat putkessa. Menetelmä erottaa putken ulko- ja sisäpuolinen korroosio toisistaan ja mittaa putken seinämän paksuuden edetessään putkessa. Tutkimusten tuloksien perusteella saadaan suositus parhaan mahdollisen saneerausmenetelmän valintaan. (12.)

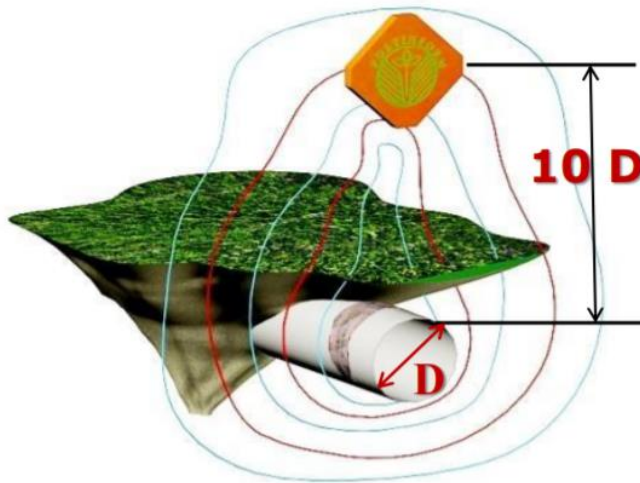


Kuva 13. PipeScanner (12).

PipeScanner syötetään tutkittavaan putkilinjaan siihen erikseen asennettavan Breivoll Entrance Pipen (BEP) kautta. Tutkittavan linjan tulee olla täynnä vettä, mutta sen ei tarvitse olla käytössä, joten virtausvaatimuksia menetelmälle ei ole. Linjassa saa tutkimusten suorittamisen aikaan olla maksimissaan 6 baarin paine. Putkea pystytään tutkimaan yhdellä kertaa maksimissaan 1500 m ja skannausnopeus on 300 m/h. (12.)

4.3 Sähkömagneettinen menetelmä

KMD-01M-menetelmä mittaa putkiverkon sähkökenttään aiheuttamia muutoksia. Menetelmä soveltuu metallisille putkille, ferromagneettisille materiaaleille, joiden halkaisija on 159 mm:stä ylöspäin. KMD-01M-menetelmän käyttö ei vaadi suoraa kontaktia tutkittavaan putkeen. Menetelmä mittaa magneettikentän muutoksia havaitsemalla korroosion ja erilaiset muutokset putken rakenteessa. Tutkimukset toteutetaan mittalaitteen avulla maan pinnalta seuraamalla tutkittavaa linjaosuutta, eikä tutkimusten suorittaminen aiheuta vedenjakelulle häiriötä. Tulosten saamiseksi mittausetäisyys mittalaitteen ja tutkitavan putken välillä tulisi enintään olla putkenhalkaisija kymmenkertaisena (kuva 14). (13.)

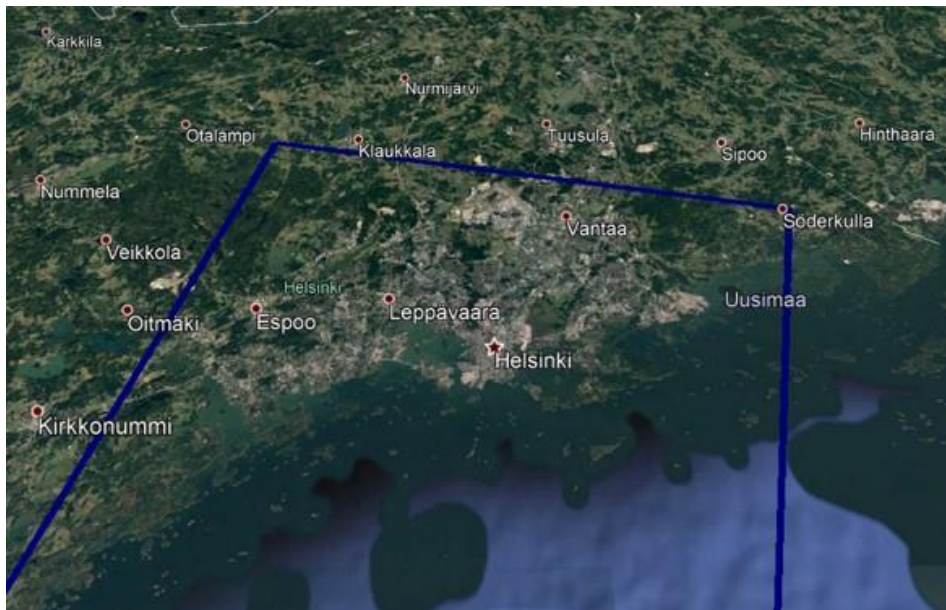


Kuva 14. KMD-01M-menetelmän toimintaperiaate (13).

Menetelmällä pystytään tutkimaan päivässä jopa kymmeniä kilometrejä riippuen tutkimuksiin osallistuvien henkilöiden määrästä. Tutkimusten suorittamisen kannalta on myös tärkeää tietää tutkittavan linjaosuuden tarkka reitti ja sijainti, jotta pystytään seuraamaan mahdollisimman tarkasti tutkittavaa osuutta. (13.)

4.4 Tutkatekniikkaan perustuva menetelmä

Satelliittitutkimusmenetelmä perustuu SAR-satelliittiin, joka lähettää L-taajuista noin 1 GHz:n mikroaaltota. Menetelmä pystyy tunnistamaan maaperästä putken ulkopuolelta vesijohtoveden sen ominaissähkönjohtavuuden perusteella. Menetelmä on riippumaton sääolosuhteista, vuorokauden ajasta ja vesijohdon materiaalista. Tekniikka tunnistaa sähköä johtavat materiaalit ja pystyy tunkeutumaan aina 2,5 metrin syvyyteen maaperässä. Menetelmän kehittäjä Utilis käyttää satelliittikuvan ottamiseen yhteistyökumppaninsa satelliittia ja rajaa sekä analysoi otetun satelliittikuvan kehittämiensä algoritmien pohjalta. Kuvassa 15 on satelliitin ottama kuva, josta rajataan erikseen tutkittava alue. (14.)



Kuva 15. Pilottikohteen satelliittikuva otettiin 16.7.2019 (15).

Analyysien pohjalta asiakkaalle toimitetaan vuotoraportti, jossa todetut mahdolliset vuotokohteet on esitetty kartalla 100 metrin säteellä olevina ympyröinä Point of interestinä (POI). POI:n sadan metrin säde on määritelty huomioimalla kuuden metrin pikselikoko satelliittikuvassa, 20 metrin geodeettinen vaihtelu ja 39 metrin tutkavirhe. Tähän 65 metrin keskimääräiseen vuotoetäisyyteen lisätään vielä 35 metrin keskihajonta, josta muodostuu yhdessä 100 metrin säde POI:hin. (14.)

4.5 Merkkikaasuun perustuva menetelmä

Merkkikaasun avulla pystytään havaitsemaan vuotokohdat täyttämällä putki kaasulla, jolloin kaasu tulee ulos vuotokohdasta. Vuotokohdasta ulostuleva kaasu havaitaan maan pinnalta kaasuntunnistimella (kuva 16). Merkkikaasun avulla pystytään paikantamaan vuodot erityisesti tonttijohdoista ja ei-metallisista putkista. Menetelmää voidaan soveltaa myös tapauksissa, joissa metallisessa putkiosuudessa on muovisia osuuksia esimerkiksi korjaustyön seurauksena. Näissä harvinaisissa kohteissa voi muiden perinteisten vuodonpaikannusmenetelmien soveltaminen olla toisinaan haastavaa johtuen eri materiaalien ominaisuuseroista. (16.)



Kuva 16. Vuotokohdasta ulostulevan kaasun havaitseminen kaasuntunnistimella (17).

HSY:llä merkkikaasuun perustuvaa vuodonetsintää on tehty muun muassa Formier 10 -tyypikaasulla, jossa on 10 % vetyä. Tutkimusten suorittamisen kannalta putkikoolla ei ole merkitystä, mutta mikäli tutkittavalla putkiosuudella on haaroja, tulee varmistaa, että jokaisen haaran sulkuventtiilit ovat kiinni tutkimusten ajan. Näin estetään kaasun leviäminen tutkittavalta putkiosuudelta. Tutkimusten ajaksi putkiosuus tulee tyhjentää vedestä, jolloin putken käyttö tutkimusten aikana ei ole mahdollista. Kaasu syötetään letkulla kaasupullosta linjaan esimerkiksi palopostin tai muun yhteen kautta. Kaasun syöttäminen onnistuu myös vesimittarin kautta, jos tutkittavana kohteena on tonttivesijohto. (16.)

Tutkittavalla osuudella tulisi olla venttiili tai paloposti toisessa päässä, jotta kaasu pääsee sitä kautta ulos. Kaasua syötetään tutkittavaan linjaan niin kauan, kunnes linjasta on tullut loput vedet ulos toisesta päästä. Samanaikaisesti myös haistellaan kaasuntunnistimella, että kaasu tulee ulos linjan toisesta päästä. Tämän jälkeen suljetaan kaasun ulostuloventtiili tai paloposti. Vuotokohdasta ulostuleva kaasu havaitaan maan pinnalta haistelemalla kaasuntunnistimella. Mikäli tutkittavalta osuudelta ei ole mahdollista avata

osuuden toista päätä, kaasun työntää linjaan jääneen veden ulos vuotokohdasta. Maan liiallinen kosteus tai jääkerros saattaa haitata kaasun nousemista maanpinnalle. (16.)

5 Pilotoitujen kuntotutkimusmenetelmien tutkimukset ja tulokset

5.1 Veden laatuun perustuva menetelmä

AquaTrioscope-menetelmää on HSY:llä pilotoitu kahdesti eri vuosina, ja ensimmäinen tutkimus suoritettiin Espoon Lintuvaarassa vuonna 2014. Lintuvaaran tutkimussuunnitelmaan oli valittu 14 palopostia, joista yhtä käytettiin tutkimuksissa referenssipisteenä. Tutkimusten aikana kävi ilmi, että viisi palopostia oli sepelin tai asfaltin alla, eikä niihin näin ollen tutkimuksissa ollut pääsyä. Virtausmittauksissa saatiin tulokset tutkituille kahdeksalle palopostin johto-osuudelle, mutta haasteena oli erityisesti virtausvastuksen tulkitseminen veden tullessa paloposteihin kahdesta tai jopa kolmesta eri suunnasta. Virtausominaisuuksien perusteella todettiin tutkituista johto-osuuksista ainoastaan yhden olevan selvästi muita osuuksia heikommassa kunnossa. Tämän perusteella voitiin olettaa, että kyseisellä osuudella on putken seinämässä todennäköisesti sakkakertymää, jonka arvioitiin syntyneen putken liian suuresta koosta suhteessa alueen vedenkulutukseen. Muut tutkitut osuudet olivat virtausominaisuuksiltaan tutkimuksen arviointiasteikolla hyvässä kunnossa, eikä niistä saatujen tulosten kesken ollut suuria eroja. Laatumittauksissa saatiin tulokset kahdeksan palopostin välisille johto-osuuksille, sekä arvioitiin niiden palopostien johto-osuudet, joihin ei tutkimuksissa ollut pääsyä. Arviot näiden osuuksien kunnosta pystyttiin tekemään niiltä osin, mikäli siihen oli välillisiä mahdollisuuksia. Laatuominaisuuksien mitta-asteikolla tutkituista johto-osuuksista neljä arvioitiin kunnoltaan välttäväksi, kolme tyydyttäväksi ja yksi osuus kunnoltaan huonoksi. (7.)

AquaTrioscope-menetelmän toinen tutkimus suoritettiin Vantaan Petikossa vuonna 2019. Tutkimuksiin valittiin 14 palopostia, yksi palovesiasema ja kolme tonttivesijohtoa. Virtausominaisuusmittaukset toteutettiin paloposteille sekä palovesiasemalle, kiinteistöjen tonttivesijohdot jätettiin virtaus- ja paineominaisuuksien mittauksista pois. Virtausmittauksissa suurimmat erot olivat kahdessa mittauspisteessä, joissa antoisuus todettiin verrattaen heikoiksi siihen nähden, että linjojen koko oli suurempi kuin muiden mittauspisteiden linjojen koko, joissa ainakin yhdessä antoisuus oli näihin suurempiin linjoihin jopa suurempi. Yhdestä mittauspisteestä ei tutkimusten suorittamisen aikana saatu

virtausominaisuusmittauksien osalta tuloksia teknisistä ongelmista johtuen. Laatumittaukset tehtiin kaikille tutkimukseen valituille mittauspisteille, ja tulokset niiden välillä olivat kohtalaisen pieniä. Tuloksissa erottuivat selkeästi mittauspisteet, jotka olivat verkostojen umpiperissä, mikä saattaa viitata veden heikompaan vaihtuvuuteen. Kokonaisuudessaan menetelmällä saadut tulokset verkoston teknisen kunnan osalta määräytyivät yhdistämällä virtaus- ja laatumittauksista saadut tulokset. Tuloksissa oli painotettu erityisesti laatumittauksista saatuja tuloksia, sillä menetelmässä käytettävää vesitrioskooppia ei ole varsinaisesti kehitetty virtausmittauksiin. Tutkimuksesta saatujen tulosten perusteella tutkittu verkosto arvioitiin olevan kohtalaisessa kunnossa ja siitä yksi osuus kunnoltaan heikoksi. Alueelle olevia verkoston umpiperiä suositeltiin edelleen huuhdeltavan ja kunnoltaan heikko johto-osuus lähivuosina saneerattavan. (18.)

5.2 Akustisiin ilmiöihin perustuvat menetelmät

SmartBall-tutkimukset toteutettiin vedenjakelun kannalta kriittiseksi arvioidulle teräksiselle 1000 mm halkaisijaltaan olevalle päävesijohdolle Helsingissä loppuvuodesta 2015. Tutkittavan linjaosuuden pituus oli noin 6 kilometriä. Tutkimukset suoritettiin kahden päivänä aikana niin, että molempina päivinä SmartBall syötettiin tutkittavaan linjaan kerran. Tulokset saatiin toisena tutkimuspäivänä. Tutkimuksissa löydettiin yhdeksän pientä vuotoa, joista suurin osa oli saumavuotoja. Ilmataskuja ei tutkimuksissa löydetty. Tuloksien perusteella pääteltiin, että tutkitussa putkilinjassa ei ole korroosion aiheuttamia vuotoja ja putken seinämä olisi näin ollen vähintäänkin kohtuullisessa kunnossa. (19.)

PipeScanner-menetelmää pilotoitiin HSY:llä halkaisijaltaan 300 mm valurautaiselle verkosto-osuudelle Helsingin Haagassa alkuvuodesta 2015. Tutkimukset saatiin suoritettua 17,5 metrin matkalta ennen vastaan tullutta umpeenkasvua, joka esti PipeScannerin etenemisen. Tutkitulta matkalta saatiin tuloksena putken seinämäpaksuus ja havaittiin putken sisä- ja ulkopuolista korroosiota. Tutkimuksissa löydettiin myös muutama ilmatasku ja ruostepaakkuja, jotka olivat aiheuttaneet putken umpeenkasvua. Tuloksien perusteella tutkitun putkiosuuden seinämäpaksuus ei ollut ollut ohentunut kriittisesti, mutta paikoin ohentumista oli kuitenkin havaittavissa. Pilotoinnin suorittamisen aikaan PipeScannerissa ei ollut vielä hydrofonia, jolloin mahdollisia vuotoääniä ei tutkimuksessa pystytty kuuntelemaan. (20.)

ePulse-menetelmää pilotoitiin HSY:llä syksyllä 2016 Helsingin Sörnäisissä noin 1,4 kilometrin matkalta ja Espoon Laajalahdessa noin 2 kilometrin matkalta. Helsingin Sörnäisissä tutkittava kohde oli halkaisijaltaan 600 mm valurautainen päävesijohto ja Espoon Laajalahdessa halkaisijaltaan 600 mm asbestinen päävesijohto. Molemmissa tutkimuksissa saatiin selville tutkittujen putkien kuntoluokitukset tutkimusraportin asteikon mukaisesti. Espoon Laajalahden tutkittu asbestisementtilinja osoittautui tutkimusten kuntoluokituksen mukaisesti pohjoispuolelta kohtalaiseksi ja eteläpuolelta hyväksi. Sörnäisten valurautalinja luokiteltiin kunnoltaan pääosin kohtalaiseksi, mutta linjassa oli lisäksi osuus, joka luokiteltiin huonokuntoiseksi. Vuotoja ei tutkituista linjoista löydetty. (21.)

5.3 Sähkömagneettinen menetelmä

KMD-01M-menetelmää pilotoitiin Helsingin Pitäjänmäessä alkuvuodesta 2013. Tutkimukset suoritettiin teräksiselle, halkaisijaltaan 600 mm linjaosuudelle. Tutkimukset suoritettiin talvella, jolloin oli runsaasti lunta maassa. Tämän lisäksi tutkittava linja sijaitsi osittain hankalakulkuisessa maastossa, jolloin tutkimusten suorittaminen oli hyvin haastavaa olosuhteiden takia. Tutkitun linjaosuuden tarkka sijainti ja sen seuraaminen maastossa tuotti myös hankaluuksia, sillä venttiileitä tai muita seurattavia merkkejä ei ollut tarpeeksi siihen, että olisi voitu riittävän luotettavasti tietää tutkittavan vesijohdon tarkka sijainti. Yhteensä linjaosuutta tutkittiin 500 metriä. Tutkimuksissa havaittiin 12 poikkeavuutta tutkitussa linjaosuudessa. Näitä havaittuja poikkeavuuksia ei voitu kuitenkaan todeta luotettaviksi, johtuen hyvin haasteellisista olosuhteista tutkimusten aikana sekä epävarmuudesta siitä kuinka läheltä linjaa tutkimukset käytännössä toteutettiin. (22.)

5.4 Tutkatekniikkaan perustuva menetelmä

Satelliittitutkimusmenetelmää pilotoitiin HSY:llä kesän ja syksyn 2019 aikana. Koska satelliittimenetelmä on riippumaton putken ominaisuuksista, valittiin tutkittavaksi alueeksi mahdollisimman monipuolinen verkoston osalta. Näin menetelmän soveltuvuutta vesijohtoverkostoon voitaisiin tarkastella useasta eri näkökulmasta. Tutkittavaksi alueeksi valittiin 400 kilometrin verkostoalue, joka on osittain Espoon ja osittain Vantaan puolella. Tällä alueella oli esiintynyt vuotoja, ja se kattaa paljon erilaista verkostoa putken iän, materiaalin ja kunnan puolesta. Utilikselle toimitettiin karttaote, kooltaan noin 50x70 kilometriä tutkimukseen valitulta alueelta. Tutkimukseen tuli rajata tutkittavaa

vesijohtoverkostoa noin 400–450 kilometriä, ja tähän valitun alueen verkostopituus täytti jo valmiiksi kriteerit. Johtokarttaa alueelta ei turvallisuussyistä toimitettu, jolloin analysointi tapahtuu teitä ja katuja apuna käyttäen. (15.)

Satelliittikuva otettiin heinäkuussa 2019, ja menetelmän kehittäjä Utilis analysoi satelliittikuvan käyttäen erilaisia patentoituja algoritmejaan. Suoritettujen analyysien perusteella kuvatulla alueella todettiin 41 mahdollista vuotokohdetta (POI). Satelliittitutkimuksen osoittamat 41 POI:ta tutkittiin eri vuodonpaikannusmenetelmin vuodonetsintätiimien toimesta kenttätutkimuksissa lokakuussa 2019. Kenttätutkimuksissa paikannettiin yhteensä kolme vuotoa. Näiden kolmen todennetun vuodon lisäksi yksi havainto oli jatkuvalla juoksutuksella oleva näytteenottoposti. (15.)

Satelliittitutkimuksissa löydetty vuodot olivat putkiosuuksilla, jotka ovat määritelty verkotietojärjestelmän analyysien perusteella heikoimman kuntoluokituksen putkien luokkaan. Vuodot olivat 1960–1970-luvuilta peräisin olevissa valurautaputkissa, joissa putkiriikkotiheys on jo lähtökohtaisesti kohtalaisen suuri. Vuodoista yksi oli pintaan noussut vuoto, joka oli myös silmin havaittavissa kenttätutkimuksissa. Pintaan noussut vuoto varmistettiin vesijohtovedeksi paikan päällä tehdyllä testillä. Kaksi muuta löydettyä vuotoa olivat piilovuotoja, jotka todennettiin kuuntelemalla linjaa venttiileistä ja paloposteista kuuntelupiikillä. Vuotokohtien tarkat sijainnit paikallistettiin korrelaattorin avulla. (15.)

5.5 Merkkikaasuun perustuva menetelmä

Merkkikaasulla on HSY:llä vuosien aikana paikannettu vuotoja ja vuoden 2020 aikana niitä on paikannettu Formier 10 -merkkikaasun avulla. Tutkimuksissa vuotoja paikannettiin linjoista, jotka olivat muovivia tai osittain muovivia. Toinen kohteista oli muovinen tonttivesijohto, josta vuoto paikannettiin tyhjentämällä vesijohto ja syöttämällä merkkikaasu tutkittavaan tonttivesijohtoon. Vuotokohta havaittiin kaasuntunnistimen avulla. Toinen merkkikaasulla löydetty vuoto oli jakeluvesijohdossa, joka oli materiaaliltaan valurautaa, mutta tiedossa oli, että siihen oli aikoinaan korjauksen tai muun työn yhteydessä asennettu myös muovinen johto-osuus. Vuoto paikannettiin linjan muovisesta osuudesta, josta kaasua tuli ulos vuotokohdasta. Eri materiaaleista koostuvat putkilinjat ovat harvinaisia, mutta vuodonpaikannuksen osalta haasteellisia materiaalien erilaisten ominaisuuksien takia. Tässä kohteessa merkkikaasu osoittautui toimivaksi menetelmäksi. (23.)

6 Kuntotutkimusmenetelmien soveltuvuudet ja vaatimukset

6.1 Menetelmien yhteenvetotaulukko

Taulukkoon 1 on koottu HSY:llä pilotoituja menetelmätyyppejä sekä vertailun vuoksi muutamia muita erityyppisiä menetelmiä, joita on tällä hetkellä markkinoilla. Muita markkinoilla olevia menetelmätyyppejä käsitellään tässä työssä tarkemmin kohdassa 6.3. Taulukossa on esitetty menetelmätyypeittäin vaatimuksia tutkimuksen toteutukselle, karkea arvio kustannusluokituksesta koko toteutukselle sekä tieto siitä, mitä tietoja tutkimusmenetelmätyyppi antaa. Taulukossa esitetyt tiedot perustuvat laitevalmistajien ja jälleenmyyjien antamiin tietoihin sekä HSY:n omiin sisäisiin raportteihin ja kokemuksiin pilotoitujen menetelmätyyppien osalta. Tutkimusten suorittamisen vaatimuksia on taulukkoon listattu valikoidusti. Vaatimuksia on valikoitu taulukkoon sen mukaan, mitkä ovat keskeisimpiä lähtötietoja tutkimuksen suorittamisen ja tutkittavan kohteen valinnan kannalta. Jokaisella menetelmällä on kuitenkin lähes poikkeuksetta verkoston rakenteen tai käyttöolosuhteiden puolesta myös muita rajoitteita ja vaatimuksia, joihin tulee perehtyä aina tarkemmin tutkimusmenetelmää valittaessa.

Taulukko 1. Menetelmätyyppien vaatimukset, arviot kustannusluokituksesta toteutuksille sekä menetelmillä saatavat tiedot.

Pilotoidut menetelmätyypit	Putkikoko										Mikä tietoa saadaan	Putken rakenteellinen kunto	Vuodot	Ilmataskut
	Putkikoko <300mm	Putkikoko >300mm	Metalli	Muovi	Asbesti	Kevyempi toteutus	Raskaampi toteutus	Linjan sulkeminen	Painetaso	Arvio kustannusluokituksista toteutuksille				
Veden laatu (AquaTriscope)	x	x	x			x		x	••	x*				
Akustinen (ePulse)	x	x	x		x		x	x	•••	x	x			
Akustinen (PipeScanner)		x	x			x	x	x*	•••	x	x	x		
Akustinen (SmartBall)	x	x	x	x	x		x	x	•••		x	x		
Sähkömagneettinen (KMD-01M)	x	x	x			x		x	••	x	x			
Tutkateknikka (Satelliitti)	x	x	x	x	x	x			••		x			
Merkkikaasu (Formier 10)	x	x	x	x	x	x	x		•		x			
Muita menetelmätyyppejä														
Akustinen/visuaalinen (vesijohtokamerat)	x	x	x	x	x	x		x	•/••	x*	x	x		
Akustinen (sensorit)	x	x	x	x	x	x			•/••		x			
Akustinen/visuaalinen (esim. APD Bullet: vapaasti ja vaijerin päässä)	x	x	x	x	x	x	x	?	••/•••	x*	x	x		
	x*	Saadaan kuntoluokitukset tutkituille osuuksille												
	x*	Tutkittava osuus tulee olla täynnä vettä, ei tarvitse olla käytössä												
	x*	Putken sisäpuolen kunnosta voidaan tehdä arvio visuaalisesti kuvan perusteella												

Taulukossa 1 on tutkimusten raskaammaksi toteutustavaksi arvioitu menetelmätyypit, joiden toteutus vaatii lähes poikkeuksetta suoran pääsyn tai kontaktin putken sisälle tai putken pintaan. Tämä tarkoittaa usein kaivuutöitä ja/tai erillisen instrumentin, kuten pysty-yhteen asentamista putkeen tutkimuksen suorittamista varten. Tutkimusten toteuttaminen vaatii myös suhteessa enemmän aikaa ja työvoimaa, jolloin myös kustannukset nousevat usein korkeammiksi. Tutkimusmenetelmässä käytettävä laitteisto ja henkilökunta voivat olla usein Suomen ulkopuolella, jolloin kustannuksia syntyy myös logistiikan osalta. Etuina kuitenkin näissä raskaamman toteutustavan menetelmissä on tutkimuksista saatava tarkempi tieto putken rakenteellisesta kunnosta ja mahdollisten vuotojen sijainnit. Kevyemmin toteuttavien menetelmätyyppien tutkimukset suoritetaan esimerkiksi palopostin kautta tai muulla tavoin olemassa olevien yhteyksien kautta ilman, että kaivuutöitä vaaditaan. Tutkimukset pystytään suorittamaan kohtalaisen nopeasti, mikä mahdollistaa useamman tutkimuksen suorittamisen lyhyemmässä ajassa ja tarvittaessa useammalle kohteelle. Kustannukset pysyvät myös alhaisempina, kun kaivuutöitä tai putkeen erikseen asennettavia instrumentteja ei tarvita.

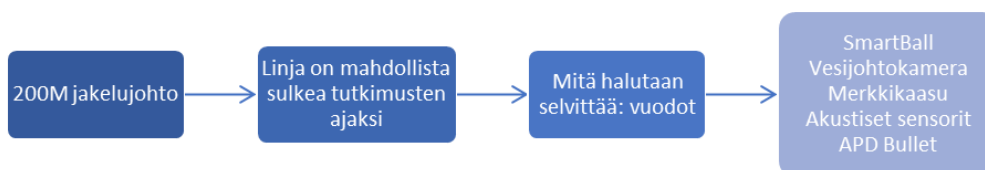
6.2 Menetelmätaulukon hyödyntäminen

Taulukossa 1 listattuja menetelmiä pystytään vaatimusten ja saatavien tietojen perusteella tarkastelemaan ja vertailemaan keskenään. Taulukossa olevia tietoja voidaan soveltaa kuvien 17 ja 18 esimerkkien mukaisesti valittaessa tutkimusmenetelmää ennalta tiedossa olevan tutkimuskohteen pohjalta. Kuvissa on esitetty kaksi tapausta, joissa on esimerkkeinä erilaiset tutkimuskohteet ja lähtötiedot sekä tieto siitä, mitä tutkimuksissa on tarve saada selville. Ennalta tiedossa olevan tutkimuskohteen, toteutuksen vaatimusten ja tutkimuksista tarvittavan tiedon avulla voidaan taulukosta valita vaihtoehtoja eri tutkimusmenetelmistä.



Kuva 17. Esimerkki tutkimusmenetelmän valitsemisesta 600 mm valurautaiselle päävesijohdolle.

Kuvassa 17 esimerkkinä on tutkimuskohde, joka on halkaisijaltaan 600 mm valurautainen päävesijohto, jonka tulee olla käytössä koko tutkimusten suorittamisen ajan. Esimerkkikohteessa halutaan tutkimuksissa saada selville putken kunto ja paikantaa mahdolliset vuodot. Näillä lähtötiedoilla voidaan taulukosta valikoida vaatimukset täyttävät menetelmät. Tulee kuitenkin huomioida esimerkiksi vesijohtokameran osalta, että sillä saadaan visuaalisesti tarkasteltua putken kuntoa sisäpuolelta. Näin ollen visuaalisen arvioinnin riittävyyttä tulee punnita tapauskohtaisesti. Taulukoitujen menetelmätyyppien vaatimuksiin tulee kuitenkin suhtautua siis niin, että tarkemmat vaatimukset toteutukselle tulee aina tarkemmin selvittää.



Kuva 18. Esimerkki tutkimusmenetelmän valitsemisesta 200 mm muoviselle jakelujohtolle.

Kuvassa 18 esimerkkinä on tutkimuskohde, joka on halkaisijaltaan 200 mm muovinen jakelujohto, joka on tarvittaessa mahdollista sulkea tutkimuksen ajaksi. Esimerkkikohteessa halutaan paikantaa mahdolliset vuodot. Näillä lähtötiedoilla taulukosta valikoituu kuvan mukaiset tutkimusmenetelmät vaihtoehtoiksi. Kun kyseessä on pienempi jakelujohto, on vuodonpaikannukseen järkevää valita kevyempiä tutkimusmenetelmiä. Tutkimusmenetelmä kannattaa valita verkoston rakenteen ja toteutuksen mahdollisuuksien mukaan.

Useamman kuin yhden kuntotutkimusmenetelmän käyttämisellä samalle tutkimuskohdelle saadaan entistä täsmällisempää tietoa ja menetelmillä pystytään täydentämään toisiaan. Kahden eri menetelmän soveltamisella voidaan myös saada varmuus menetelmän antamista tuloksista, mikäli valitut menetelmät antavat saman tyyppistä tietoa.

6.3 Muita menetelmävaihtoehtoja

Tulevaisuudessa pilotoitavien eri menetelmätyyppien tarvetta ja tutkimuskohteita on ennalta vaikea arvioida. Tähän lukuun on laadittu vaihtoehtoja erityyppisistä menetelmistä, joille voisi mahdollisesti tulevaisuudessa olla tarvetta ja sovelluskohteita. Ne on valittu sen mukaan minkä tyyppisiä menetelmiä tällä hetkellä on käytössä ja minkälaisia menetelmiä on vuosien aikana pilotoitu.

Vuotojen sijainnin tarkempaan paikallistamiseen ja jatkuvaan seurantaan soveltuvat hydrofonitekniikkaan perustuvat akustiset anturit. Antureiden vuodonpaikannus perustuu vuotoäänien havaitsemiseen vedestä, ja niillä on mahdollista havaita vuotoja jo niiden syntymisen alkuvaiheessa. Akustiset anturit asennetaan paloposteihin määritellyn etäisyyden välein, ja vuotojen tarkka sijainti määrittyy vuotoäänien kulkeman matkan perusteella antureiden välillä. Antureiden toimintaa pystytään seuraamaan reaaliaikaisesti niille kehitetyn sovelluksen avulla, jolloin ne mahdollistavat jatkuvan ja joustavan vuodonpaikannuksen vuorokauden ajasta riippumatta, eikä niiden käyttö aiheuta häiriötä vedenjakelulle. Antureiden toiminnan perustuessa vuotoäänien havainnointiin vedestä on niiden soveltaminen kannattavaa muoviputkille. Tarvittaessa akustisia antureita voidaan soveltaa myös muille putkimateriaaleille tarpeen mukaan. Tämän tyyppisistä akustisista antureista markkinoilla on esimerkiksi Trimble Telog LDR32.

Vesijohtokameroiden toiminta perustuu putkea sisäpuolelta reaaliaikaisesti kuvaavaan kameraan ja vedestä vuotoääniä samanaikaisesti havaitsevaan anturiin. Vesijohtokameratyypin mukaan laite on mahdollista saada tutkittavaan putkeen palopostin kautta tai erillisen asennettavan instrumentin avulla. Vesijohtokamera on usein vaijerin päässä, jolloin sen on käytettävyydeltään helposti hallittavissa. Laitteisto liikkuu putkessa työntämällä vaijeria tai virtauksen mukana laitteistossa olevan purjeen avulla. Anturilla varustetulla vesijohtokameralla saadaan selville reaaliaikaisesti vuotojen sijainnit sekä voidaan arvioida putken kuntoa sisäpuolelta visuaalisesti. Akustista vesijohtokameraa on kannattavaa hyödyntää muoviputkien vuodonpaikannukseen sekä esimerkiksi metalliputkille ahtaumien selvittämiseen. Pienempien putkien tutkimiseen akustisella vesijohtokameralla on esimerkiksi APD Investigator, ja isommille putkille vastaavia vaihtoehtoja on esimerkiksi Sahara-työkalu ja APD LDS 1000. Markkinoilla on myös vaihtoehtona akustinen vesijohtokamera, jota pystytään käyttämään sekä vaijerilla operoitavana että putkessa vapaasti uivana työkaluna. Putkessa vapaasti uiva työkalu mahdollistaa pidempien matkojen tutkimisen kerralla, jolloin soveltuvuus on hyvä päävesijohdoille. Tästä esimerkkinä on APD Bullet.

Putken tarkemman rakenteellisen kunnon selvittämiseen tarkoitetuilla työkaluilla saadaan selville vuotojen lisäksi putken seinämäpaksuus ja havaitaan korroosio. Putken sisään vietävä työkalu kerää tietoa putken rakenteesta ja kuvaa kameralla samalla edetessään putkessa. Työkaluja on erityyppisiä, putkessa vapaasti virtauksen mukana uivia sekä kaapelin päässä käyttäjän hallitsevia. Pienempien putkien tutkimiseen soveltuu

esimerkiksi APD PipeScan+. Isoimmille putkille, päävesijohtojen tutkimiseen vaihtoehtoja on esimerkiksi PipeDiver ja APD Amplus.

7 Yhteenveto

HSY:n vesijohtoverkon vuototaso on hieman laskenut vuodesta 2010–2012, ja vuonna 2018 vuotavuus oli noin 18 %. Verkoston ikä ja kunto vaihtelevat eri alueiden välillä ja verkoston kunnan määrittelemiseen tarvitaan paljon erityyppistä tietoa ja tutkimuksia. HSY:llä paikannetaan päivittäin vuotoja järjestelmällisesti verkostoa läpikäyden päivittäisessä käytössä pitkään olleiden hyvien ja luotettavien menetelmien avulla. Vuosien aikana pilotoituilla eri kuntotutkimusmenetelmillä on saatu entistä täsmällisempää tietoa putkien kunnosta vuodonpaikantamisen lisäksi. Menetelmillä saatu tieto tutkittujen putkien kunnosta on toiminut sekä päätöksenteon että suunnittelun tukena. Pilotoiduilla kuntotutkimusmenetelmillä on myös pystytty löytämään ratkaisuja erityisesti niihin kohteisiin, joita käytössä olevilla vuodonpaikannusmenetelmillä on ollut haasteellisempaa tutkia.

HSY:llä on pilotoitu 2010-luvulla vesijohtoverkoston eri kuntotutkimusmenetelmiä muun muassa veden laatuun, akustisiin ilmiöihin, magneettikentän muutoksiin, merkkikaasuun sekä tutkatekniikkaan perustuen. Menetelmästä riippuen tutkimuksissa voidaan selville esimerkiksi vuodot ja/tai putken tarkempi rakenteellinen kunto. Jokaisella kuntotutkimusmenetelmällä on myös omat vaatimukset toteutuksen ja soveltuvuuden osalta, jolloin on tärkeää selvittää tutkittavan kohteen osalta, minkä tyyppistä menetelmää siihen pystytään soveltamaan. Eri kuntotutkimusmenetelmillä saadaan erityyppistä tietoa, jolloin menetelmävalintaa tehtäessä tulee myös huomioida se, miten paljon ja minkälaista tietoa tutkimuksista on tarpeellista saada. Näin voidaan myös arvioida, kuinka raskaalla työmäärällä kohdetta on järkevää ja kustannustehokasta tutkia.

Menetelmistä laadittuun yhteenvetotaulukkoon on tiivistetty pääpiirteittäin menetelmien soveltuvuudet, vaatimukset tutkimusten toteutuksille sekä se, mitä tietoa tutkimuksissa saadaan. Taulukkoon arvioitiin myös tutkimusten toteuttamistavan raskaus ja keveys sekä kustannusluokitukset koko toteutukselle. Yhteen taulukkoon laadittu ja tiivistetty tieto eri kuntotutkimusmenetelmistä mahdollistaa nopeallakin tarkastelulla menetelmien vertailemisen ja toimii apuna menetelmän valintaan. Sen avulla pystytään esimerkiksi ennalta tiedossa olevaan kohteeseen löytämään yksi tai useampi soveltuva menetelmä.

Useammasta menetelmävaihtoehdosta pystytään taulukosta valitsemaan sopivin esimerkiksi kustannusluokituksen tai tutkimusten toteutustavan perusteella. Menetelmäkohtaiset tarkemmat vaatimukset tutkimusten toteuttamiselle tulee lisäksi aina selvittää. Myös tulevaisuudessa HSY:llä on tarkoitus vuosittain pilotoida eri menetelmiä ja taulukoon on muutamia erityyppisiä menetelmävaihtoehtoja laadittu sen mukaan, joille saat-
taisi tulevaisuudessa olla sovelluskohteita.

Lähteet

- 1 Berninger, Kati; Dubovik, Maria; Laakso, Tuija; Paatela, Henri; Piila, Noora; Rautiainen, Jyri; Tynkkynen, Oras; Vahala, Riku; Virta, Suvi & Virtanen, Raimo. 2018. Tulevaisuuden kestävä vesihuolto -ennakointi, ohjaus ja järjestäminen. Verkkoaineisto. Valtioneuvoston kanslia. <<https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/161028/56-2018-Tulevaisuuden%20kestava%20vesihuolto.pdf>>. Luettu 18.1.2020.
- 2 Lampola, Tiia & Kuikka, Sakari. 2018. Viemäreiden kuntotutkimusopas. Verkkoaineisto. Vesilaitosyhdistys. <https://www.vvy.fi/site/assets/files/2519/viemareiden_kuntotutkimusopas_final.pdf>. Luettu 26.9.2020.
- 3 Näin vesihuolto toimii. 2020. Verkkoaineisto. Helsingin seudun ympäristöpalvelut -kuntayhtymä HSY. <<https://www.hsy.fi/vesi-ja-viemarit/nain-vesihuolto-toimii/>>. Luettu 20.8.2020.
- 4 HSY:n vesijohtoverkoston vuotohallintastrategia. 2019. Yrityksen sisäinen raportti. Helsingin seudun ympäristöpalvelut -kuntayhtymä HSY.
- 5 RIL 237-1-2010 Vesihuoltoverkkojen suunnittelu, perusteet ja toiminnallisuus. 2010. Helsinki: Suomen Rakennusinsinöörien liitto RIL ry.
- 6 Vuotovesien hallinta, vesijohtovuotojen vähentäminen. 2010. Verkkoaineisto. Suomen ympäristöopisto Sykli. <<https://sykli.etapahtuma.fi/Portals/5/Julkaisut%20vanhoilta%20sivuilta/Vuotovesi%20v14%20valmis%20072010.pdf>>. Luettu 25.4.2020.
- 7 Rautio, Harri. 2014. Tutkimusraportti. Yrityksen sisäinen raportti. Helsingin seudun ympäristöpalvelut -kuntayhtymä HSY.
- 8 Rautio, Harri. 2020. Toimitusjohtaja, Aquapriori Oy. Kinkomaa. Puhelinkeskustelu 10.4.2020.
- 9 ePulse Pipeline Condition Assessment, How ePulse technology works. 2020. Verkkoaineisto. Echologics. <<https://www.echologics.com/services/condition-assessment/epulse/>>. Luettu 15.5.2020.
- 10 Rantala, Tommi. 2020. Omaisuudenhallintaratkaisut ja digitaaliset päätöksenteon tukijärjestelmät vedenjakelu- ja jätevesiverkoston hallintaan. Luentomateriaali. Xylem Suomi.
- 11 Smart water: Leak detection and non-revenue water. 2020. Verkkoaineisto. Xylem. <<https://www.xylem.com/fi-fi/making-waves/water-utilities-news/smart-water-leak-detection-and-non-revenue-water/>>. Luettu 24.7.2020.

- 12 Pipeline inspection. 2020. Verkkoaineisto. Breivoll Inspection Technologies. <<https://breivoll.eu/diagnostics/pipeline-inspection/>>. Luettu 24.7.2020.
- 13 Complex contactless pipelines inspection. 2020. Verkkoaineisto. Polyinform. <http://www.polyinform.com/sites/default/files/uploads/2_pipelines_inspection_kmd-01m.pdf>. Luettu 24.7.2020.
- 14 Fisher, Ori. 2020. Utilis Best Practices Certification. Luentomateriaali. Utilis.
- 15 Fisher, Ori. 2020. HSY summary meeting. Yrityksen sisäinen raportti. Helsingin seudun ympäristöpalvelut -kuntayhtymä HSY.
- 16 Kuusisto, Tero. 2020. LVI-työtekniikka, LC Yhtiöt Oy. Helsinki. Sähköpostikeskustelu 13.3–3.4.2020.
- 17 Kuikka, Jussi. 2020. Putkimestari, Helsingin seudun ympäristöpalvelut -kuntayhtymä HSY. Valokuva. Helsinki. 27.3.2020.
- 18 Rautio, Harri & Raukola, Pekka. 2019. Tutkimusraportti. Yrityksen sisäinen raportti. Helsingin seudun ympäristöpalvelut -kuntayhtymä HSY.
- 19 Pure Technologies Ltd. 2016. SmartBall Inspection Report. Yrityksen sisäinen raportti. Helsingin seudun ympäristöpalvelut -kuntayhtymä HSY.
- 20 Poulton, Matthew. 2015. Inspection Report. Yrityksen sisäinen raportti. Helsingin seudun ympäristöpalvelut -kuntayhtymä HSY.
- 21 Echologics. 2016. ePulse Pilot Project Report. Yrityksen sisäinen raportti. Helsingin seudun ympäristöpalvelut -kuntayhtymä HSY.
- 22 Oy Polyinform International Ltd. 2013. Report: Pilot project on the contactless magnetometric inspection of the pipelines of HSY. Yrityksen sisäinen raportti. Helsingin seudun ympäristöpalvelut -kuntayhtymä HSY.
- 23 Sivonen, Toni & Kuikka, Jussi. 2020. Putkimestarit, Helsingin seudun ympäristöpalvelut -kuntayhtymä HSY. Haastattelut kevät/kesä 2020.