



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO  
TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

PAULA HAIKONEN  
VESIJOHTO- JA JÄTEVESIVERKOSTON SANEERAUSTEN  
PRIORISOINNIN KEHITTÄMINEN

Diplomityö

Tarkastajat: professori Jukka Rintala  
ja kehittämispäällikkö Saila Kallioinen  
Tarkastaja ja aihe hyväksytty  
27. syyskuuta 2017

## TIIVISTELMÄ

**PAULA HAIKONEN:** Vesijohto- ja jätevesiverkoston saneerausten priorisoinnin kehittäminen

Tampereen teknillinen yliopisto

Diplomityö, 70 sivua, 2 liitesivua

Tammikuu 2018

Ympäristö- ja energiatekniikan diplomi-insinöörin tutkinto-ohjelma

Pääaine: Vesi- ja jätehuoltotekniikka

Tarkastajat: professori Jukka Rintala ja kehittämispäällikkö Saila Kallioinen

Avainsanat: verkostosaneeraukset, priorisointi, vesijohdot, jätevesiviemärit

Tämä diplomityö käsittelee vesijohto- ja jätevesiverkoston saneerausten priorisoinnin kehittämistä Helsingin seudun ympäristöpalvelut -kuntayhtymässä (HSY). Saneerausten priorisoinnin avulla pyritään kohdentamaan saneeraustoimenpiteet niihin saneerauskohteisiin, jotka tarvitsevat eniten saneerausta. Työn tavoitteena oli kehittää HSY:n käyttöön saneerausten priorisoinnin seurantatyökalu, jonka avulla voidaan tutkia, miten kannattavia yrityksen toteutuneet saneeraukset ovat olleet. Tämän tarkastelun on tarkoitus toimia lähtökohtana saneerausten priorisoinnissa ja saneeraussuunnittelun jatkokehittämisessä HSY:llä.

Työn teoriaosa tarkastelee kansainvälistä kirjallisuutta aiheesta ja kokoaa vertaisarvioituista tutkimusartikkeleista saneerauksen valintaan vaikuttavia tekijöitä ja saneerausten priorisoinnissa käytettyjä optimoitavia muuttujia. Kirjallisuuskatsauksessa tehtyjen havaintojen pohjalta kehitettiin saneerausten priorisoinnissa käytettävä viitekehys, jonka toimivuutta testattiin tämän diplomityön tapaustutkimuksessa. Tapaustutkimuksessa tutkittiin tarkasteluun valittujen toteutuneiden saneerauskohteiden priorisointia ja sen pohjalta kehitettiin saneerausten seurantatyökalu HSY:n käyttöön. Työkalu perustuu HSY:llä aiemmin tehtyyn SANNI-riskiluokitukseen ja saneerauskohteiden kustannustietoihin. Tapaustutkimuksessa saatujen tulosten pohjalta tunnistettiin kehityskohteita HSY:n saneerausten priorisointia ohjaavissa käytännöissä, joiden kehittämiseksi on pyritty esittämään ratkaisuehdotuksia.

Saneerausten priorisoinnissa käytetyn seurantatyökalun avulla on mahdollista jakaa tarkastellut saneerauskohteet kolmeen luokkaan: kannattaviin, keskinkertaisiin ja kannattamattomiin. Näistä kolmesta ryhmästä keskinkertaisten saneerauskohteiden priorisointi on haastavinta. Tällaisten kohteiden saneerauspäätös voi edellyttää tarkempaa asiantuntija-arviota tai muiden kuin priorisointiin sisällytettyjen saneerauksen valintaan vaikuttavien tekijöiden ottamista huomioon. Saneerausten priorisointi on sitä luotettavampaa, mitä vähemmän epävarmuuksia lähtötiedot sisältävät. Työssä tarkasteltiin lisäksi putkikoon vaikutusta saneerauskohteen yksikkökustannuksiin. Jakeluvesijohdoilla ja keräilyviemäreillä putkikoko ei hyvin selittänyt vaihtelevia kustannuksia, mutta päävesijohdoilla putkikoko saattoi osaltaan vaikuttaa projektiin yksikkökustannuksiin.

## ABSTRACT

**PAULA HAIKONEN:** Development of the prioritization of water and wastewater network rehabilitation

Tampere University of Technology

Master of Science Thesis, 70 pages, 2 Appendix pages

January 2018

Master's Degree Programme in Environmental and Energy Technology

Major: Water and Waste Management Engineering

Examiner: Professor Jukka Rintala and Development Manager Saila Kallioinen

Keywords: pipeline rehabilitation, prioritization, water pipes, sewers

This thesis deals with the prioritization of rehabilitation of water and wastewater networks. It proposes an approach for prioritizing rehabilitation projects in a case company, which is Helsinki Region Environmental Services Authority (HSY). Prioritization of rehabilitation projects is an important task where the aim is to best target the rehabilitation works to those projects where distribution pipes are in worst condition. An essential purpose of this thesis was to develop a tool to investigate whether a rehabilitation project that was completed by the case company has been profitable. The aim of this thesis is to work as a starting point for the future development of rehabilitation planning in HSY.

The literature review takes a closer look on the international research dealing with this topic. The different factors affecting the prioritization of rehabilitation projects as well as the objective functions, used in the prioritization process, are gathered from selected research articles. Based on the findings of the literature review, a framework to perform the prioritization of rehabilitation projects is presented. The framework was tested in the case study that is introduced in this thesis. In the case study, the prioritization process was performed to a selected group of completed projects and a tool that evaluates whether a project has been profitable was developed. This evaluation tool is based on a risk classification, earlier produced by the personnel of HSY, and the costs of rehabilitation. Based on the results obtained in the case study, development areas were identified in the practices of prioritization of rehabilitation works in HSY and solutions were suggested in order to improve these practices.

With the aid of the developed tool, it is possible to divide the rehabilitation projects into three different groups, which are profitable projects, mediocre projects and non-profitable projects. The challenge is especially the mediocre projects, which are harder to prioritize than the rest of the projects. The decision concerning the rehabilitation of such projects may require expert opinion of the importance of each factor affecting the decision-making process. Also, other factors, than the ones integrated in the formulation of the used prioritization tool, may be included in the analysis. The prioritization performed is more reliable if there is less uncertainty in the source data. The effect of pipe size on the unit costs of a rehabilitation project was also investigated. For water distribution pipes and collector sewers, pipe size did not explain well the differences in unit costs but for water mains pipe size might have some sort of an effect on the unit costs of rehabilitation.

## ALKUSANAT

Tämä diplomityö toteutettiin vuoden 2017 aikana kohdeyrityksen eli Helsingin seudun ympäristöpalvelut -kuntayhtymän (HSY) tarpeisiin. Työn ohjaajana HSY:ltä on toiminut Miia Hyttinen ja työn tarkastajina Tampereen teknillisestä yliopistosta (TTY) professori Jukka Rintala ja kehittämisspäällikkö Saila Kallioinen. Haluan kiittää HSY:tä mahdollisuudesta toteuttaa tämä diplomityö aiheesta, joka osoittautui erittäin mielenkiintoiseksi, sopivan haasteelliseksi ja laaja-alaiseksi. Työn tehtyäni voin todeta, että aiheen osalta riittää tutkittavaa ja kehitettävää vielä tulevaisuussakin.

Erityisesti haluan kiittää diplomityötäni ohjannutta Miia Hyttistä, jonka kommentit ja neuvot työtä koskien olivat asiantuntevia ja arvokkaita. Lisäksi haluaisin kiittää Tiia Lampolaa ja Anssi Yrjölää avusta diplomityöpaikan järjestämisessä ja kiinnostuksesta työn toteuttamiseen sekä Ossi Ylpekkää, joka avuliaasti keräsi minulle kustannustietoja työtäni varten. Suuret kiitokset myös Pentti Janhuselle, joka mahdollisti diplomityöni toteuttamisen HSY:llä. Haluaisin lisäksi kiittää Jukka Rintalaa ja Saila Kallioista aiheellisesta ja kehittävästä palautteesta työstäni sekä työn tarkastamisesta. Kiitokset myös Tampereen teknillisen yliopiston tukisäätiölle apurahan myöntämisestä diplomityön tekemistä varten. Lopuksi vielä kiitokset läheisilleni ja erityisesti Juhalle kaikesta tuesta ja kannustuksesta tämän diplomityön tekemisen aikana.

Helsingissä, 6.12.2017

Paula Haikonen

## SISÄLLYSLUETTELO

1.	JOHDANTO .....	1
2.	TEORIA .....	4
2.1	Vesijohtojen ja jätevesiviemäreiden saneeraus .....	4
2.2	Päätöksentekomallit saneerauskohteiden valintaan .....	6
2.2.1	Priorisointi- ja optimointimallit.....	6
2.2.2	Optimointi .....	8
2.2.3	Monitavoiteoptimointi.....	11
2.2.4	Geneettiset algoritmit .....	12
2.2.5	Esimerkki optimointimallista siltojen saneeraussuunnittelussa .....	14
2.2.6	Tilastolliset menetelmät .....	15
2.3	Eroavaisuudet vesijohto- ja jätevesiverkoston saneerausten priorisoinnissa	17
2.4	Saneerauksen valintaan vaikuttavat tekijät.....	18
2.5	Optimoitavat muuttujat.....	22
3.	TUTKIMUSMENETELMÄT JA AINEISTO.....	25
3.1	Priorisoinnissa käytetty viitekehys .....	25
3.2	SANNI-riskiluokitus.....	27
3.2.1	Vesijohdon SANNI-indeksi .....	28
3.2.2	Jätevesiviemäriin SANNI-indeksi.....	30
3.3	Saneerausten priorisointi kehitetyllä menetelmällä.....	31
3.3.1	Saneerauskohteiden valinta .....	32
3.3.2	Saneerauskohteiden kustannustiedot.....	35
3.3.3	Tietojen käsittely .....	35
3.3.4	Tulosten esittäminen .....	37
4.	TULOKSET .....	38
4.1	Saneerausten kokonaiskustannusten tarkastelu .....	38
4.2	Saneerauskustannusten kustannuslajien osuuksien tarkastelu kokonaiskustannuksista .....	42
4.3	SANNI-indeksien tarkastelu.....	46
4.4	Saneerausten priorisointi .....	49
4.4.1	Jakeluvesijohdot.....	49
4.4.2	Keräilyviemärit.....	53
4.4.3	Päävesijohdot .....	57
4.4.4	Pääviemärit.....	60
5.	KEHITYSTOIMENPITEET.....	61
6.	JOHTOPÄÄTÖKSET.....	64
	LÄHTEET .....	67

LIITE A: Tarkasteltujen saneerauskohteiden perustiedot

## KUVALUETTELO

<b>Kuva 1.</b>	<i>Eri tasoilla toteutettava saneerauksen priorisointi tai optimointi.</i>	7
<b>Kuva 2.</b>	<i>Saneerauksen valintaan vaikuttavien tekijöiden luokittelu.</i>	19
<b>Kuva 3.</b>	<i>Optimoitavien muuttujien luokittelu</i>	22
<b>Kuva 4.</b>	<i>Kuvaus priorisoinnissa käytetyn viitekehyksen rakenteesta</i>	25
<b>Kuva 5.</b>	<i>Jakeluvesijohtojen ja keräilyviemärien saneerausten kokonaiskustannukset kohteittain</i>	40
<b>Kuva 6.</b>	<i>Päävesijohtojen saneerausten kokonaiskustannukset kohteittain</i>	41
<b>Kuva 7.</b>	<i>Pääviemärien saneerauksen kokonaiskustannukset</i>	42
<b>Kuva 8.</b>	<i>Jakeluvesijohtojen saneerauskustannusten kustannuslajien osuudet kokonaiskustannuksista</i>	43
<b>Kuva 9.</b>	<i>Keräilyviemärien saneerauskustannusten kustannuslajien osuudet kokonaiskustannuksista</i>	44
<b>Kuva 10.</b>	<i>Päävesijohtojen saneerauskustannusten kustannuslajien osuudet kokonaiskustannuksista</i>	45
<b>Kuva 11.</b>	<i>Pääviemärien saneerauskustannusten kustannuslajien osuudet kokonaiskustannuksista</i>	46
<b>Kuva 12.</b>	<i>Jakeluvesijohtojen ja keräilyviemärien SANNI-indeksien parannukset kohteittain</i>	47
<b>Kuva 13.</b>	<i>Päävesijohtojen SANNI-indeksien parannukset kohteittain</i>	48
<b>Kuva 14.</b>	<i>Pääviemärien SANNI-indeksin parannus</i>	48
<b>Kuva 15.</b>	<i>Kaikki saneeratut jakeluvesijohdot kohteittain</i>	50
<b>Kuva 16.</b>	<i>Saneerattujen jakeluvesijohtojen jaottelu kannattaviin, keskinkertaisiin ja kannattamattomiin kohteisiin</i>	52
<b>Kuva 17.</b>	<i>Esimerkki toteutettavasta saneerausten priorisoinnista kolmen jakeluvesijohtojen saneerausprojektin välillä</i>	53
<b>Kuva 18.</b>	<i>Kaikki saneeratut keräilyviemärit kohteittain</i>	54
<b>Kuva 19.</b>	<i>Saneerattujen keräilyviemäreiden jaottelu kannattaviin, keskinkertaisiin ja kannattamattomiin kohteisiin</i>	55
<b>Kuva 20.</b>	<i>Putkikoon vaikutus jakeluvesijohtojen yksikkökustannuksiin</i>	56
<b>Kuva 21.</b>	<i>Putkikoon vaikutus keräilyviemäreiden yksikkökustannuksiin</i>	57
<b>Kuva 22.</b>	<i>Kaikkien saneerattujen johtolajien tarkastelu kohteittain</i>	58
<b>Kuva 23.</b>	<i>Molemmat saneeratut päävesijohdot kohteittain ja priorisoinnin tuottama luokittelu</i>	59
<b>Kuva 24.</b>	<i>Saneerattu pääviemäri ja priorisoinnin tuottama luokka</i>	60

## TAULUKKOLUETTELO

<b>Taulukko 1.</b>	<i>Kirjallisuudessa esiintyneiden päätöksentekomuuttujien luokittelu .....</i>	<i>10</i>
<b>Taulukko 2.</b>	<i>Saneerauksen valintaan vaikuttavat tekijät.....</i>	<i>21</i>
<b>Taulukko 3.</b>	<i>Saneerausten priorisoinnissa käytetyt saneerauksen valintaan vaikuttavat tekijät .....</i>	<i>26</i>
<b>Taulukko 4.</b>	<i>Vesijohdon SANNI-indeksin laskentaa varten määritelty materiaalin korjaamisen vaikeus eri materiaaleille, muokattu lähteestä (Hyttinen, 2017) .....</i>	<i>29</i>
<b>Taulukko 5.</b>	<i>Vesijohtojen kuntoluokitukseen sisältyvien riskiluokkien luokittelu, muokattu lähteestä (Hyttinen, 2017) .....</i>	<i>30</i>
<b>Taulukko 6.</b>	<i>Jätevesiviemärien kuntoluokitukseen sisältyvien riskiluokkien luokittelu .....</i>	<i>31</i>
<b>Taulukko 7.</b>	<i>Luettelo eri johtolajien saneerauskohteista .....</i>	<i>39</i>
<b>Taulukko 8.</b>	<i>Jakeluvesijohtojen saneerausten priorisointi SANNI-indeksin parannuksen ja yksikkökustannusten avulla sekä priorisoinnin tuottamat luokat, joihin saneerauskohteet on jaettu.....</i>	<i>51</i>
<b>Taulukko 9.</b>	<i>Saneerauskohteiden priorisoinnissa käytetyt raja-arvot kaikille johtolajeille.....</i>	<i>51</i>
<b>Taulukko 10.</b>	<i>Keräilyviemärien saneerausten priorisointi SANNI-indeksin parannuksen ja yksikkökustannuksen avulla ja priorisoinnin tuottamat luokat, joihin saneerauskohteet on jaettu.....</i>	<i>55</i>
<b>Taulukko 11.</b>	<i>Päävesijohtojen saneerausten priorisointi SANNI-indeksin parannuksen ja yksikkökustannuksen avulla ja priorisoinnin tuottamat luokat, joihin saneerauskohteet on jaettu.....</i>	<i>59</i>
<b>Taulukko 12.</b>	<i>Pääviemärien saneerauksen priorisointi SANNI-indeksin parannuksen ja yksikkökustannuksen avulla ja priorisoinnin tuottama luokka .....</i>	<i>60</i>

## LYHENTEET JA MERKINNÄT

CCTV	engl. Closed Circuit Television Inspection, TV-kuvaus
FPM-järjestelmä	engl. Financial Performance Management, taloushallintajärjestelmä
HSY	Helsingin seudun ympäristöpalvelut -kuntayhtymä
NHPP	engl. non-homogeneous Poisson process, epähomogeeninen Poisson-prosessi
ROCOF-funktio	engl. rate of occurrence of failure, prosessin absoluuttinen vikataajuus
TrimbleNIS	verkkotietojärjestelmä
2d-pituus	kaksiulotteinen pituus
3d-pituus	kolmiulotteinen pituus



# 1. JOHDANTO

Vesijohto- ja jätevesiverkoston ikääntyessä niiden kunto heikkenee ja tarve saneeraukselle kasvaa. Verkostojen saneeraustarve on usein suurempi kuin saneeraukseen käytettävissä olevat resurssit. Tällöin on tärkeää, että tärkeimmät ja kiireellisimmät saneeraukset tehdään ensimmäisenä ja saneerauskohteet priorisoidaan tärkeysjärjestykseen. Saneerausten priorisoinnilla pyritään löytämään saneerausta tarvitsevat putket ja kaikista kustannustehokkaimmat saneerausvaihtoehdot ja -menetelmät sekä optimaalisin ajankohta saneeraukselle ottamalla huomioon turvallisuuden, luotettavuuden, laadun, tehokkuuden sekä käytettävissä olevat resurssit (Kleiner et al., 1998a; Kleiner et al., 2001; Ugarelli & Federico, 2010). Priorisoinnilla pyritään maksimoimaan saneerauksella saavutettavaa hyötyä samaan aikaan, kun minimoidaan esimerkiksi kustannuksia tai vahinkojen aiheutumisen riskiä. Tällä tavoin saneeraukseen käytettävät resurssit tulevat hyödynnettyä tehokkaasti ja huolellinen saneeraussuunnittelu antaa oikeutuksen ja perustellut saneerauksen toteuttamiselle.

Verkostojen kunnan heikkenemisellä on useita ei-toivottuja seurauksia. Ensinnäkin verkoston suorituskyky ja palvelutaso laskevat (Kleiner et al., 1998a; Kleiner et al., 2001; Ugarelli & Federico, 2010). Myös vahingon aiheutumisen riski kasvaa, kun putkirikot ja vuodot yleistyvät. Samalla hukataan vettä ja juomavesi voi myös saastua. Kunnan heikentymisen johdosta erityisesti vesijohdoilla hydraulinen kapasiteetti pienenee, paine putkissa laskee, painehäviöt kasvavat ja veden laatu voi heiketä. Nämä vaikutukset lisäävät energiakustannuksia ja voivat aiheuttaa tyytymättömyyttä asiakkaissa. (Halhal et al., 1997; Hong et al., 2006) Yleensä kunnan heikkeneminen lisää verkoston käyttö-, ylläpito-, saneeraus- ja korjauskustannuksia (Kleiner et al., 1998a; Kleiner et al., 1998b; Kleiner et al., 2001; Ugarelli & Federico, 2010). Näitä ongelmia pyritään usein ennaltaehkäisemään ja välttämään korjaamalla ensin putkessa olevat vauriot sekä myöhemmin saneeraamalla putki oikeanaikaisesti.

Saneerausten priorisointi ja optimaalisen saneerausajankohdan selvittäminen on ollut suosittu tutkimuskohde viime vuosikymmeninä (Kleiner et al., 1998a; Kleiner et al., 1998b; Roshani & Filion, 2014). Ensimmäiset vesijohdoille tehdyt tutkimukset ovat olleet yksittäistä putkea tarkastelevia putkirikkomalleja, joissa on pyritty ennustamaan putkirikot korjaamisen kustannuksia lineaarisella tai eksponentiaalisella funktiolla (Roshani & Filion, 2014). Myöhemmin mallit ovat kehittyneet monimutkaisemmiksi ja niiden ratkaisu vaatii usein monitavoiteoptimointia. Jätevesiverkoston saneerausten suunnittelu on aiemmin ja osittain vieläkin toteutettu kokemuseräiseen tietoon perustuvien arvioiden ja prosessien avulla (Halfawy et al., 2008; Ward et al., 2014). Vasta 1990-luvulta lähtien ovat alan tutkijat ja toimijat alkaneet hyödyn-

tämään standardoitua TV-kuvauksella (engl. CCTV) saatua kuntotutkimustietoa saneeraussuunnittelussa jätevesiviemärin kunnan arvioinnissa. Tietoa käyttämällä on pyritty luotettavampiin ja toistettavampiin lähestymistapoihin. Viime vuosikymmeninä molempien verkostojen saneerausten priorisoinnissa on aloitettu käyttämään kehittyneempiä työkaluja, joiden käytön on mahdollistanut lisääntyvän laskentakapasiteetin saatavuus. Näiden optimointialgoritmien ja hydraulista mallinnusta hyödyntävien työkalujen avulla on mahdollista tarkastella monimutkaisia verkostoja ja etsiä optimaalisimpia saneeraustoimenpiteitä ja -ajankohtia. (Ward et al., 2014)

Saneerausten priorisointiin käytettyjä työkaluja on kritisoitu niiden läpinäkyvyyden puutteesta (Ward et al., 2014). Monissa tässäkin diplomityössä käsitellyissä artikkeleissa on esitelty tutkimuksen myötä syntyneitä työkaluja, jotka edustavat usein tieteellistä lähestymistapaa saneerausten priorisointitehtävän ratkaisuun. Osa kehitetyistä omaisuudenhallintatyökaluista on siten liian monimutkaisia tai kankeita ja niiden käyttö edellyttää suuren tietomäärän keräämistä. (Ana & Bauwens, 2007) Mallien soveltaminen käytännössä voi olla hankalaa, mikäli tarvittavaa tietomäärää ja osaamista mallien toteuttamiseen ei ole saatavilla. Tästä syystä tutkimuskohteiksi on ehdotettu kevyempien työkalujen kehittämistä, jotka olisi helppo ottaa käyttöön yritystasolla ja tiedot mallin hyödyntämiseksi olisivat saatavilla (Ana & Bauwens, 2007). Tämä diplomityö pyrkii tarjoamaan saneerausten priorisointiin soveltuvan viitekehyksen sekä käytännöllisen ratkaisun saneerausten priorisoinnin kehittämiseen. Mallin rakentamisessa on pyritty ottamaan huomioon kohdeyrityksessä jo aiemmin toteutettu kehitystyö, mallin käyttöön tarvittava aineisto saneerauskohteista sekä valmiudet soveltaa ratkaisua käytännössä.

Tämän työn tavoitteena on kehittää Helsingin seudun ympäristöpalvelut -kuntayhtymän verkostosaneerausten priorisointia. Työ on rajattu koskemaan vesijohto- ja jätevesiverkostoa. Työn teoriaosassa kerätään kansainvälisistä tutkimusartikkeleista saneerausten valintaan vaikuttavia tekijöitä sekä saneerausten priorisoinnissa käytettyjä optimoitavia muuttujia. Kirjallisuuskatsauksen havaintojen pohjalta kehitetään viitekehys saneerausten priorisointiin, jonka toimivuutta testataan tapaustutkimuksessa. Tapaustutkimuksen tuloksena kehitetään toteutuneiden saneerauskohteiden priorisoinnin seurantatyökalu. Työkalun avulla voidaan tutkia, onko saneeraus ollut kannattava toteuttaa. Työn tuloksien pohjalta pyritään tunnistamaan kehityskohteita saneerausten priorisointia ohjaavissa käytännöissä ja esittämään ratkaisuehdotuksia toiminnan kehittämiseksi. Työn tarkoitus on tehdä saneerausten priorisoinnissa hyödynnettävistä menetelmistä läpinäkyvämpiä ja järjestelmällisemmin toteutettavia nykyisiin menetelmiin verrattuna. Tämän diplomityön on tarkoitus toimia lähtökohtana saneerausten priorisoinnin kehittämisessä kohdeyrityksessä.

Työ etenee seuraavasti. Luku 2 tarkastelee verkostosaneerausten priorisointia kansainvälisten tutkimusten perusteella. Luvussa tutustutaan saneerausten priorisoinnin keskeisiin käsitteisiin, erilaisiin saneerausten päätöksentekomalleihin, eroavaisuuksiin vesijohtojen ja jätevesiviemäreiden saneerausten priorisoinnissa sekä kootaan tarkastel-

luissa tutkimusartikkeleissa esiintyneitä saneerausten valintaan vaikuttavia tekijöitä ja optimoitavia muuttujia. Luku 3 käsittelee tutkimusmenetelmiä ja aineistoa. Luvussa esitellään työssä kehitetty priorisoinnissa käytettävä viitekehys sekä HSY:n kehittämä SANNI-riskiluokitus, joita molempia hyödynnetään tapaustutkimuksessa saneerausten priorisoinnissa. Tämän jälkeen kuvataan kohdeyritykselle toteutettavassa tapaustutkimuksessa käytettyjä työvaiheita ja -menetelmiä sekä työhön tarvittavaa aineistoa. Luvussa 4 esitetään tapaustutkimuksessa valituille 28 toteutuneelle saneerauskohteelle toteutetun saneerausten priorisoinnin tulokset. Lisäksi luvun alussa tarkastellaan valittujen saneerauskohteiden saneerausten kokonaiskustannuksia, saneerauskustannukset muodostavien kustannuslajien osuuksia kokonaiskustannuksista sekä käytettyjä kuntoindeksejä eli SANNI-indeksejä. Samalla pyritään myös arvioimaan käytettyjen lähtötietojen luotettavuutta. Luvussa 5 käsitellään esiin nousseita kehitysehdotuksia saneerausten priorisoinnin kehittämiseksi. Lopuksi luvun 6 johtopäätöksissä on lyhyesti käsitelty työn toteutus, työn tulokset, työn merkitys ja uutuusarvo, työn rajoitukset sekä tulevaisuuden kehityskohteet.

## 2. TEORIA

Luvussa 2 on käsitelty saneerausten priorisointia käsittelevää kansainvälistä kirjallisuutta esittelemällä vesijohtojen ja jätevesiviemärien saneerausten keskeisimpiä käsitteitä, saneerauskohteiden priorisoinnissa käytettyjä päätöksentekomalleja ja eroavaisuuksia vesijohtojen ja jätevesiviemärien saneerausten priorisoinnissa. Lisäksi teoriaosan tavoitteena on luokitella kirjallisuudesta kerättyjä saneerausten valintaan vaikuttavia tekijöitä ja saneerausten priorisoinnissa käytettyjä optimoitavia muuttujia. Teoriaosan tavoitteena on luoda pohja saneerausten priorisoinnissa käytettävän viitekehyksen kehittämiseksi sekä taustoittaa työssä kehitetyn saneerausten priorisoinnissa apuna käytettävän seurantatyökalun perusteita.

### 2.1 Vesijohtojen ja jätevesiviemäreiden saneeraus

Saneerauksesta (engl. renewal or rehabilitation) käytetään erilaisia termejä tilanteesta riippuen. Saneerauksella tarkoitetaan joissakin yhteyksissä vain putken sujuttamista, mutta toisinaan käsite voi pitää sisällään putken sujuttamisen lisäksi putken uusimisen tai korjaamisen (deMonsabert et al., 1999; Selvakumar et al., 2002). Saneerauksella tarkoitetaan toimenpiteitä, joilla voidaan parantaa putken toiminnallista ja rakenteellista kuntoa (Kleiner et al., 2001). Tämä voidaan toteuttaa joko sujuttamalla tai uusimalla huonokuntoinen putki. Uutta sujutusta tehtäessä vanhaa putkea voidaan käyttää sujutuksen tukemiseen. (Selvakumar et al., 2002) Putken uusiminen voidaan tehdä kahdella tavalla: kaivamattomilla menetelmillä tai aukikaivamisella (Selvakumar et al., 2002; Grigg, 2005). Kaivamattomilla menetelmillä uusi putki lisätään korvaamaan jotakin osaa vanhasta putkilinjasta tai putki voidaan sijoittaa uuteen sijaintiin lähelle olemassa olevaa putkea (Selvakumar et al., 2002). Sujutus ja putken uusiminen kaivamattomilla menetelmillä vähentävät kaivamisen tarvetta, jolloin ne myös pienentävät saneerauksesta aiheutuvia haittoja, kuten melua, häiriötä liikenteelle ja läheisille toiminnoille sekä kadunpäällysteen uusimisen kustannuksia (Engelhardt et al., 2000; Selvakumar et al., 2002). Putken uusiminen aukikaivamalla tarkoittaa puolestaan vanhan putken uusimista siten, että putkilinja kaivetaan auki koko saneerattavan osan pituudelta. Vanha putki korvataan uudella putkella sijoittamalla se samaan paikkaan kaivantoon tai lähelle olemassa olevaa putkea (Selvakumar et al., 2002).

Korjaamisella voidaan tarkoittaa pieniä verkoston ylläpitoon liittyviä toimenpiteitä tai suurempia korjaustoimenpiteitä. Vesijohdon putkirikon tai vuodon korjaaminen voidaan esimerkiksi tehdä korjausholkin avulla tai paikkaamalla rikkoutunut kohta vesijohtoa. (Grigg, 2005) Rikkoutunut tai vuotava jätevesiviemäri voidaan korjata pistekorjauksella

tai käyttämällä esimerkiksi saumauslaastia (deMonsabert et al., 1999; Ward et al., 2014). Korjaamiseksi luetaan myös esimerkiksi liitoksien tiivistykset ja halkeamien paikkaamiset (deMonsabert et al., 1999; Grigg, 2005).

Vesijohtojen sujutusmenetelmät voidaan jakaa ei-rakenteellisiin ja rakenteellisiin sujutusmenetelmiin. Ei-rakenteellinen sujutus ei nimensä mukaisesti paranna putken rakenteellista kuntoa. (Selvakumar et al., 2002) Vesijohdoille edulliset ja hyväksi todennetut ei-rakenteelliset sujutusmenetelmät ovat pinnoituksena toteutettavat sementtilaastivuoraus eli betonointi sekä epoksinpinoitus (Engelhardt et al., 2000; Selvakumar et al., 2002; Kekki, 2007). Pinnoitus toteutetaan asentamalla putken sisäpinnalle ohut korroosiokestävä pinnoite. Rakenteellinen sujutus tehdään puhdistetun putken sisäpinnalle vesitiiviinä rakenteena, joka on läheisessä kontaktissa olemassa olevan putken kanssa. (Selvakumar et al., 2002) Rakenteellinen sujutus lisää vesijohdon vahvuutta ja vähentää vuotoja. Se on kuitenkin ei-rakenteellista sujutusta kalliimpi menetelmä. (Engelhardt et al., 2000) Rakenteellinen sujutus voidaan toteuttaa esimerkiksi käyttäen pitkäsujutusta, sukkasujutusta tai muotoputkisujutusta (Selvakumar et al., 2002).

Putken uusimismenetelmistä aukikaivaminen on yleisin menetelmä päävesijohtojen uusimiseen. Aukikaivamalla uusiminen voidaan toteuttaa perinteisellä menetelmällä tai kapealla kaivannolla. Perinteisessä menetelmässä putki asennetaan aukikaivettuun kaivantoon, joka on kaivettu joko olemassa olevan putken paikalle tai lähelle vanhaa putkilinjaa. Kapean kaivannon-menetelmä on muuten samankaltainen perinteisen menetelmän kanssa, mutta menetelmässä pyritään pitämään kaivannon leveys mahdollisimman kapeana. (Selvakumar et al., 2002) Putken uusimiseen on nykyään käytössä useita erilaisia kaivamattomia menetelmiä, joista tunnetuimpia ovat hydraulinen ja pneumaattinen pakkosujutus, mikrotunnelointi sekä ohjattava suuntaporaus (Engelhardt et al., 2000; Selvakumar et al., 2002).

Jätevesiviemäreiden saneeraukseen voidaan soveltaa useita erilaisia menetelmiä, jotka ovat pääosin samoja vesijohtojen saneeraukseen käytettävien menetelmien kanssa (Abraham et al., 1998; Selvakumar et al., 2002; Halfawy et al., 2008). Jätevesiviemäreille voidaan tunnistaa rakenteellisten ja ei-rakenteellisten sujutusmenetelmien rinnalle kolmas ryhmä: puolirakenteelliset menetelmät (Halfawy et al., 2008). Rakenteellisissa sujutusmenetelmissä sujutetun putken ei tarvitse olla kontaktissa olemassa olevan putken kanssa vaan putki kestää itsenäisesti hydrostaattisia, maaperän aiheuttamia ja muita kuormia. Puolirakenteellisessa sujutuksessa sujutettu putki voi kestää itsenäisesti hydrostaattista painetta tai sujutusmateriaali voi toimia komposiittina vanhan putken kanssa. Puolirakenteellista menetelmää ei yleensä käytetä viettoviemäreille. Jätevesiviemäreille soveltuvat sujutusmenetelmistä käytettäväksi vesijohtojen tapaan muun muassa pitkäsujutus, sukkasujutus ja muotoputkisujutus. Jätevesiviemäreiden uusimiseen voidaan puolestaan käyttää hydraulista tai pneumaattista pakkosujutusta, mikrotunnelointia ja ohjattavaa suuntaporausta. Näiden lisäksi jätevesiviemäreiden uusimiseen voidaan käyttää esimerkiksi putkitunkkausta tai kairaporausta. (Halfawy et al., 2008)

Saneerausmenetelmän valintaan vaikuttavat saneerausmenetelmän edut, tekniset rajoitteet sekä kustannukset (Halfawy et al., 2008). Saneerausmenetelmän soveltuvuus riippuu useista tekijöistä ja tiettyihin sovelluskohteisiin toiset menetelmät ovat soveltuvampia ja kustannustehokkaampia kuin toiset (Abraham et al., 1998; Halfawy et al., 2008). Saneerausmenetelmien valinnassa on tärkeää hyödyntää järjestelmällistä tapaa valita toteutuskelpoiset vaihtoehdot saneerauksen suorittamiseen (Halfawy et al., 2008).

## **2.2 Päätöksentekomallit saneerauskohteiden valintaan**

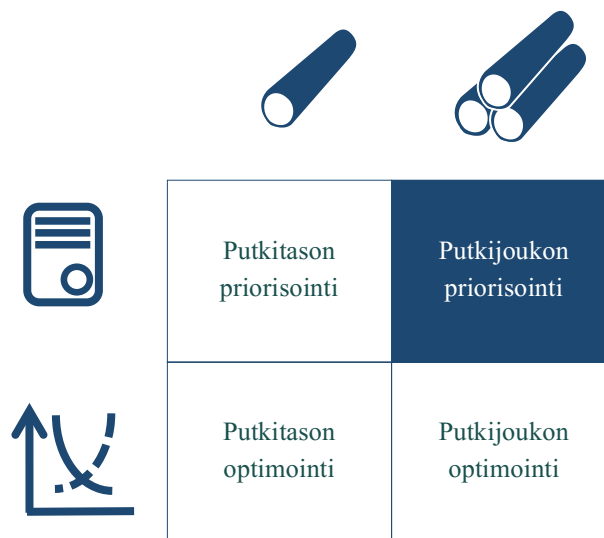
Tässä luvussa esitellään erilaisia päätöksentekomalleja saneerauskohteiden valintaan. Päätöksentekomallit hyödynsivät priorisointia tai optimointia saneerauskohteiden valinnassa. Monet päätöksentekomalleista käyttivät mallin osana erilaisia tilastollisia menetelmiä. Tässä luvussa kuvataan ensiksi priorisointi- ja optimointimallien yleistä toimintaperiaatetta. Tämän jälkeen käsitellään tarkemmin optimointia, jonka jälkeen tarkastellaan tilastollisten menetelmien soveltamista vesijohto- ja jätevesiverkoston saneerausten päätöksentekomalleissa.

### **2.2.1 Priorisointi- ja optimointimallit**

Saneerausten päätöksentekomalleja on yleisiä ohjeistuksia sisältävien oppaiden lisäksi kahdenlaisia: priorisointimalleja ja optimointimalleja (Engelhardt et al., 2000). Molemmat mallit pyrkivät asettamaan saneerausta tarvitsevat kohteet tärkeysjärjestykseen, mutta saneerattavien kohteiden valinta suoritetaan hieman eri tavoin. Priorisointimallit ovat tyypillisesti hieman yksinkertaisempia kuin optimointimallit. Priorisointimallit pyrkivät järjestämään saneerausta tarvitsevat kohteet jonkinlaisen pisteytysmenetelmän avulla tärkeysjärjestykseen, jonka mukaisesti kohteita pyritään saneeraamaan. Saneeraukseen valitaan täten ensiksi suuremman prioriteetin kohteita ja edetään tällä tavoin kohti pienemmän prioriteetin kohteita, kunnes saneeraukseen tarkoitetut resurssit on käytetty. (Lee et al., 2009; Rogers & Grigg, 2009; Tagherouit et al., 2011; Mohamed & Zayed, 2013; Baah et al., 2015) Priorisointimallit tarkastelevat kutakin verkoston komponenttia yksittäin, eikä budjettirajoite varsinaisesti sisälly päätöksentekoprosessiin (Engelhardt et al., 2000). Priorisointimallit keskittyvät vertailemaan yksittäisiä saneerauskohteita keskenään eivätkä maksimoimaan saneerauksista saatavaa kokonaisuhyötyä. Lisäksi priorisointimallit eivät pysty tarkastelemaan koko saneeratun verkostojärjestelmän suorituskykyä tai ennustettua palvelutasoa hydraulisen suorituskyvyn, luotettavuuden tai veden laadun kannalta. Budjettirajoitteen puuttuessa ne eivät myöskään sovellu pitkän aikavälin saneeraussuunnitteluun. Kriittisyyteen perustuvat putkien saneerausmallit ovat myös eräänlaisia priorisointimalleja. Niissä päätöksenteko putkien saneeraamisesta perustuu yksinomaan putken kuntoon ja vahingon aiheutumisen riskiin sekä arvioon putken kriittisyydestä verkoston kannalta. (Engelhardt et al., 2000) Olennaisia tekijöitä riskiperusteisessa lähestymistavassa ovat riskin suuruus, sen todennäköisyys ja vahingosta aiheutuvat seuraukset (Baah et al., 2015).

Optimointimalleilla on priorisointimalleja laajempi mahdollisuus tutkia erilaisia optimaalisia yhdistelmiä toteutettavien saneerauskohteiden valinnassa käytettävissä olevan budjetin rajoissa (Halhal et al., 1997; Dandy & Engelhardt, 2001; Nafi & Kleiner, 2010; Roshani & Filion, 2014; Li et al., 2016). Ne pystyvät myös ottamaan huomioon kunkin putken vuorovaikutuksen koko verkostojärjestelmään. Lisäksi optimoinnissa voidaan ottaa huomioon samanaikaisesti sekä saneeratun verkoston suorituskyky että saneerauksesta aiheutuvat kustannukset. Yleensä optimointiprosessissa toinen näistä tekijöistä asetetaan optimoitavaksi muuttujaksi ja toinen tekijä rajoite-ehdoksi. Vaihtoehtoisesti optimointitehtävä voidaan muotoilla monitavoiteoptimointitehtäväksi, jossa optimoidaan yhtäaikaisesti useampaa eri muuttujaa (luku 2.2.3). (Engelhardt et al., 2000) Optimointimallit vaativat kuitenkin toimiakseen suuren määrän laskentakapasiteettia, kun optimaalista ratkaisua tai ratkaisujoukkoa etsitään arvioimalla suurta joukkoa erilaisia optimia lähellä olevia ratkaisuyritteitä (Engelhardt et al., 2000). Lisäksi optimointimallit vaativat usein enemmän dataa ja ne edellyttävät käyttäjältä enemmän osaamista kuin priorisointimallit. Optimoinnin suorittaminen edellyttää myös suurempaa työmäärää kuin priorisointimallin käyttö.

Priorisointia ja optimointia voidaan tehdä eri tasoilla. Kun priorisointi tai optimointi toteutetaan yksittäiselle putkelle on kyseessä putkitason priorisointi tai optimointi. Vastaavasti priorisointi- ja optimointimalleilla voidaan tarkastella useampia putkia tai niistä muodostuvaa putkijoukkoa, jolloin kyseessä on putkijoukon priorisointi tai optimointi. Saneerauskohteiden valintaa voidaan siten hahmottaa nelikentän avulla, jossa toisella akselilla on tarkastelutaso ja toisella päätöksentekomalli. Tällöin saneerauskohteiden priorisointitehtävä voidaan muotoilla neljällä eri tavalla, mitä on havainnollistettu kuvassa 1. Tässä diplomityössä keskitytään tarkastelemaan putkijoukon priorisointia.



**Kuva 1.** Eri tasoilla toteutettava saneerauksen priorisointi tai optimointi.

Idealisessa tilanteessa vesijohtoverkoston saneerausten päätöksentekomalli ottaisi huomioon neljä kriteeriä, jotka ovat hydraulinen suorituskyky, taloudellisuus, verkoston luotettavuus ja veden laatu. Taloudellisuuden kriteeri pitää sisällään kustannuksien minimoimisen kustannustietoa hyödyntävän mallin avulla. Verkoston hydraulinen suorituskyky tulisi ottaa huomioon siten, että saneerattu osa verkostosta täyttää suorituskyvyltään lainsäädännölliset määräykset. Asiakkaille tarjotun veden laadun on myös täytettävä sille asetetut vaatimukset. Lisäksi palvelun luotettavuus on varmistettava, jotta häiriötilanteita vedenjakelussa esiintyisi mahdollisimman vähän. Suuri laskentakapasiteetin tarve tavallisesti rajoittaa tarkastelua, jolloin yleensä voidaan tarkastella vain yhtä tai kahta näistä kriteereistä. Optimointimallit onnistuvat korvaamaan monet priorisointimallien puutteet, mutta eivät monestikaan pysty käsittelemään kaikkia saneerausten päätöksentekomallin suorituskykykriteerejä, joita olivat edellä mainitut hydraulinen suorituskyky, taloudellisuus, verkoston luotettavuus ja veden laatu. Etenkin verkoston luotettavuuden ja veden laadun vaatimuksia on harvemmin sisällytetty malleihin. (Engelhardt et al., 2000)

Vesijohtoverkoston luotettavuus on käsitteenä vaikeasti määriteltävissä eikä ole olemassa yleismaailmallista yksimielisyyttä siitä, miten se tulisi määritellä tai mitata. Vesijohtoverkoston luotettavuuteen liittyy vaatimus siitä, että verkosto tarjoaa tarvittavan määrän vettä ja veden laatu on riittävä. Vesi tulisi myös toimittaa eri sijainteihin verkoston toimintojen ja ominaisuuksien paikallisesta ja ajallisesta vaihtelusta riippumatta. Verkoston luotettavuutta on pyritty kuvaamaan erilaisilla mittareilla, kuten esimerkiksi kaikkien verkoston solmukohtien yhteydellä veden lähteeseen, tarvittavaan veden kysyntään vastaamisella tai vedenjakelun häiriöistä kärsivien asiakkaiden määrällä. Verkoston luotettavuuden määritelmän epämääräisyys on johtanut siihen, että asiaa on kuvattu monenlaisin menetelmin sekä laskentamenetelmät ja käsitteen määrittely ovat vaihdelleet eri tutkimuksissa. (Engelhardt et al., 2000)

Priorisointimalleja ei kuvata tässä yhteydessä tarkemmalla tasolla, sillä tutkimuksissa käytettävät lähestymistavat ovat perusperiaatteeltaan varsin samankaltaisia. Keskeisenä periaatteena priorisointimalleissa on laskea priorisoinnissa käytettävä indeksi, joka on painotettu summa saneerauksen valintaan vaikuttavista tekijöistä. Indeksien perusteella saneerauskohteet pisteytetään tärkeysjärjestykseen. Priorisointiprosessin eräänlainen toteutustapa kuvataan yksityiskohtaisemmin työssä esitellyssä tapaustutkimuksessa.

## 2.2.2 Optimointi

Optimointi on menetelmä, jolla etsitään optimaalista arvoa tai ratkaisua tarkasteltavaan tehtävään. Optimointitehtävä tulisi määritellä siten, että se on mahdollista ratkaista matemaattisesti (Ward et al., 2014). Optimointia varten määritellään yleensä yksi tai useampia tavoitefunktioita, joiden suoritusta optimoidaan joko maksimoimalla tai minimoimalla tarkasteltuja tavoitefunktioita (Ward et al., 2014). Tavoitefunktion toiminnan taustalla on päätöksentekomuuttujia, jotka ovat tyypillisesti tarkasteltuun tehtävään tai



sen ratkaisuun vaikuttavia tekijöitä. Päätöksentekomuuttujia vaihtelemalla voidaan muodostaa erilaisia ratkaisuja optimoinnin tulokseksi (Ward et al., 2014). Usein vesijohtojen ja jätevesiviemäreiden saneerausten optimoinnissa käytetään rajoite-ehtoina esimerkiksi verkoston hydrauliseen suorituskykyyn tai saatavilla olevaan budjettiin liittyviä ehtoja (Kleiner et al., 1998b; Wu et al., 2001; Dandy & Engelhardt, 2006; Nafi & Kleiner, 2010; Li et al., 2016). Rajoite-ehdot mahdollistavat optimointitehtävän rajauksen ja ne auttavat varmistamaan, että ratkaisut ovat toteuttamiskelpoisia ja kustannustehokkaita (Halhal et al., 1997; Halfawy et al., 2008; Ward et al., 2014; Ward & Savić, 2014).

Vesijohtojen ja jätevesiviemärien saneerausten optimoinnissa käytettyjä päätöksentekomuuttujia on monenlaisia. Yleisimpiä päätöksentekomuuttujia ovat saneerausajankohta ja erilaiset saneerausvaihtoehdot, -menetelmät tai -toimenpiteet. Optimaalinen saneerausajankohta pyritään määrittämään, jotta voidaan minimoida putken saneeraus- ja ylläpitokustannuksia tai putkirikkojen korjaamiskustannuksia (Kleiner et al., 1998b; Kleiner et al., 2001). Sopivan saneerausmenetelmän valinta voi perustua esimerkiksi kustannustehokkaan saneerausvaihtoehdon löytämiseen tai verkoston luotettavuuden ja hydraulisen suorituskyvyn parantamiseen saneerauksen myötä (Wu et al., 2001; Halfawy et al., 2008; Nafi et al., 2008). Etenkin geneettisiä algoritmeja hyödyntävissä tutkimuksissa päätöksentekomuuttujat merkitään kokonaislukuarvoina, jotka sisältävät saneerattavaksi suunnitelluille putkille erilaisia saneerausvaihtoehtoja. Eri saneerausvaihtoehtoja pyritään optimoinnissa vertailemaan keskenään. (Nafi et al., 2008; Ward et al., 2014) Joissakin tapauksissa päätöksentekomuuttuja voi sisältää päätöksen siitä saneerataanko putki vai ei. Päätöksessä voidaan myös tarkemmin valita, uusitaanko saneerattava putki, sujutetaanko se vai jätetäänkö saneeraus kokonaan tekemättä. Tyypillisesti tämänkaltainen saneerauspäätös sisällytetään päätöksentekomallin määrittelyihin kokonaislukumuuttujana. (Kim & Mays, 1994; Kao & Li, 2007; Giustolisi & Berardi, 2009) Päätöksentekomuuttujat voivat vielä edellä mainittujen muuttujien lisäksi sisältää tiedon esimerkiksi putken halkaisijasta, putken tunnuksesta, saneerausta tarvitsevista putkista tai saneerauksen paikasta (Halhal et al., 1997; Dandy & Engelhardt, 2001; Dandy & Engelhardt, 2006; Halfawy et al., 2008; Jin et al., 2008; Nafi & Kleiner, 2010; Roshani & Filion, 2014). Päätöksentekomuuttujien luokittelua on havainnollistettu taulukossa 1.

Saneerausten priorisoinnissa käytettäviä optimoitavia tavoitefunktioita on myös runsaasti. Tavoitefunktiot voivat liittyä esimerkiksi kustannusten, verkoston luotettavuuden tai hydraulisen suorituskyvyn optimointiin (Nafi & Kleiner, 2010). Tavoitefunktioiden sisältämiä kriteerejä käsitellään luvussa 2.5.

**Taulukko 1.** Kirjallisuudessa esiintyneiden päätöksentekomuuttujien luokittelu

Päätöksentekomuuttajat	Tutkimukset	
	<i>Vesijohdot</i>	<i>Jätevesiviemärit</i>
Saneerausajankohta	Kleiner et al., 1998 Kleiner et al., 2001 Dandy & Engelhardt, 2006 Nafi & Kleiner, 2010 Roshani & Filion, 2014	deMonsabert et al., 1999 Halfawy et al., 2008
Saneerausvaihtoehdot, -menetelmät tai -toimenpiteet	Halhal et al., 1997 Kleiner et al., 1998 Kleiner et al., 2001 Wu et al., 2001 et al., 2006 Nafi et al., 2008 Nafi & Kleiner, 2010 Roshani & Filion, 2014	Abraham et al., 1998 deMonsabert et al., 1999 Halfawy et al., 2008 Ward & Savić, 2011 Ward et al., 2014 Ward & Savić, 2014
Saneerauspäätös	Kim & Mays, 1994 Dandy & Engelhardt, 2001 Kao & Li, 2007 Giustolisi & Berardi, 2009	Ward & Savić, 2012
Putken halkaisija	Dandy & Engelhardt, 2001 Dandy & Engelhardt, 2006 Jin et al., 2008	
Putken tunnus	Halhal et al., 1997	
Saneerausta tarvitsevat putket	Nafi & Kleiner, 2010	Halfawy et al., 2008
Saneerauksen paikka	Roshani & Filion, 2014	

Kolmas keskeinen osatekijä optimointitehtävän muodostamisessa ovat erilaiset rajoiteehdot. Eräs yleisimmin verkostosaneerausten optimoinnissa käytetty rajoiteehto on budjettirajoite. Budjettirajoite johtuu siitä, että yleensä verkostosaneerausten toteuttamista rajoittavat rajalliset resurssit tai muut kohteet, jotka kilpailevat samoista resursseista (Halhal et al., 1997). Saneerausten priorisoinnilla pyritään kohdentamaan resurssit niihin verkoston osiin, jotka tarvitsevat eniten kunnostamista. Budjettirajoite voidaan asettaa vuosikohtaiseksi (Roshani & Filion, 2014; Li et al., 2016) tai pidemmälle aikavälille (Dandy & Engelhardt, 2001; Nafi & Kleiner, 2010). Pidemmän aikavälin saneeraussuunnittelu on monesti jaettu lyhyempiin suunnitteluajanjaksoihin ns. aika-askeliin, jotta olisi helpompi seurata resurssien pysymistä taloudellisten reunaehtojes sisällä (Dandy & Engelhardt, 2001; Dandy & Engelhardt, 2006; Giustolisi & Berardi, 2009). Tavallisesti budjettirajoite pitää sisällään ehdon, jossa saneerausten kustannukset eivät

saa ylittää vuosittaista tai pidemmällä aikavälillä määräytyvää budjettia, joka on kohdennettu saneeraustoimenpiteiden toteuttamiseen.

Toinen yleisimmistä verkostosaneerauksia koskevista rajoite-ehdoista on verkoston hydrauliseen suorituskykyyn liittyvät rajoite-ehdot. Tällaisia rajoite-ehdoja ovat esimerkiksi massan ja energian säilyminen (Kim & Mays, 1994; Kleiner et al., 1998b; Kleiner et al., 2001; Wu et al., 2001; Li et al., 2016) tai erilaiset virtaama- (Kim & Mays, 1994; Nafi et al., 2008), virtausnopeus- (Wu et al., 2001; Roshani & Filion, 2014) ja painevaativuudet (Kim & Mays, 1994; Kleiner et al., 1998b; Kleiner et al., 2001; Wu et al., 2001; Dridi et al., 2008; Nafi et al., 2008; Roshani & Filion, 2014). Erilaisten hydraulisten rajoitusehtojen noudattamisen tarkistamisessa voidaan käyttää hydraulisia simulointiohjelmia, jotka helpottavat usein verkostotasolla tehtyjä tarkasteluja (Kleiner et al., 2001; Wu et al., 2001; Nafi & Kleiner, 2010; Roshani & Filion, 2014; Li et al., 2016).

Siinä tapauksessa, että tarkastellun ratkaisun rajoite-ehto ei täyty, yleensä ratkaisu on toteuttamiskelvoton. Monesti optimoinnissa halutaan välttää tällainen tulos, jolloin käyttökeltomille ratkaisuille asetetaan erilaisia keinotekoisia sakkotermejä. Sakkotermi ohjaa optimointitehtävää saavuttamaan toivotun tuloksen, jossa käyttökeltomat ratkaisut eivät enää tule valituksi toteutettavien ratkaisujen joukkoon. (Nafi & Kleiner, 2010) Mallit voivat myös sallia yksittäisen toteuttamiskeltottoman ratkaisun hylkäämisen sen laiminlyödessä rajoite-ehdoja (Nafi et al., 2008).

### 2.2.3 Monitavoiteoptimointi

Saneerausten priorisoinnissa on useita keskenään kilpailevia ja ristiriitaisia tavoitteita (Halhal et al., 1999; Ward & Savić, 2012; Ward & Savić, 2014). Tavoitteita ovat yleensä kustannusten minimoiminen ja saneerauksella saavutettujen hyötyjen maksimoiminen (Halhal et al., 1997). Saneerausten tuottamien hyötyjen ja kustannusten välillä vallitsevan vaihtokaupan lainalaisuuksien ymmärtäminen on tärkeää saneerauksia koskevan päätöksenteon kannalta (Ward & Savić, 2014).

Varhaisemmat vesijohtojen saneerausten priorisointia käsitelleet optimointimallit tarkastelevat ongelmaa yksitavoiteoptimointina, jossa minimoidaan kustannuksia verkoston suorituskykyyn liittyvien rajoitusehtojen ollessa voimassa (Halhal et al., 1997). Yksitavoiteoptimointia hyödyntävät mallit eivät ole helposti sovellettavissa usean tavoitteen optimointitehtäviin (Halhal et al., 1997), vaikka kriteerejä voitaisiinkin yhdistää painokertoimien avulla (Halhal et al., 1999). Yksitavoiteoptimoinnissa painokertoimien arvot valitaan monesti subjektiivisiin arvioihin perustuen. Tyydyttävän ratkaisun löytämiseksi painokertoimia usein mukautetaan, minkä seurauksena optimointi on suoritettava useaan kertaan. (Halhal et al., 1999) Tämän vuoksi uudemmat vesijohto- ja jätevesiverkoston saneerausten priorisointia käsittelevät tutkimukset ovat tarkastelleet saneerausten priorisointia monitavoiteoptimointitehtävänä (Halhal et al., 1999; Dandy &

Engelhardt, 2006; Halfawy et al., 2008; Jin et al., 2008; Nafi et al., 2008; Giustolisi & Berardi, 2009; Ward et al., 2014).

Monitavoiteoptimoinnissa on vähintään kaksi optimoitavaa tavoitefunktiota, jotka määritellään erikseen matemaattisella esityksellä (Halhal et al., 1999; Giustolisi & Berardi, 2009). Monitavoiteoptimoinnissa jokaista tavoitefunktiota arvioidaan erikseen ja kutsutaan ratkaisua arvioidaan suhteessa kriteereihin (Halhal et al., 1997; Halhal et al., 1999; Ward & Savić, 2012). Monitavoiteoptimoinnissa lopputuloksena ei saavuteta vain yhtä optimaalisinta ratkaisua, vaan joukko hyviä ratkaisuja, jotka ovat toisiinsa nähden vaihtoehtoisia (Halhal et al., 1999; Jin et al., 2008; Giustolisi & Berardi, 2009). Tätä ratkaisujoukkoa kutsutaan Pareto-optimaaliseksi joukoksi (Halhal et al., 1997; Halhal et al., 1999; Giustolisi & Berardi, 2009). Pareto-rintamalla tarkoitetaan Pareto-optimaalisen joukon esitystä tavoitteita kuvaavassa kentässä (Giustolisi & Berardi, 2009). Kun tarkastellaan tällaista ratkaisujoukkoa samanaikaisesti ristiriitaisten tavoitteiden suhteen, ratkaisut voidaan nähdä tasavertaisina eli dominoitumattomina, millä tarkoitetaan, että siirryttäessä ratkaisusta toiseen, ei ole mahdollista parantaa yhtä tavoitefunktiota huonontamatta samalla toista (Halhal et al., 1997; Halhal et al., 1999; Jin et al., 2008; Giustolisi & Berardi, 2009). Pareto-optimaalisen joukon ratkaisujen ollessa vaihtoehtoisen hyviä, on päätöksentekijän yleensä vaikeaa ellei mahdotonta valita vaihtoehtojen kesken ilman muita päätöksenteossa apuna käytettäviä valintakriteerejä (Jin et al., 2008). Monitavoiteoptimoinnin yhtenä etuna voidaan pitää päätöksentekijän mahdollisuutta valita vapaasti laajasta joukosta vaihtoehtoja ja hyödyntää päätöksenteossa muitakin valintakriteerejä, kuin mitä on sisällytetty optimoinnin tavoitefunktioksi (Alvisi & Franchini, 2009; Giustolisi & Berardi, 2009). Tällaiset päätöksentekoa helpottavat lisäkriteerit voivat liittyä esimerkiksi taloudellisiin epävarmuuksiin tai sääntelyllisiin rajoitteisiin (Giustolisi & Berardi, 2009).

Monitavoiteoptimointitehtävän ratkaisemiseksi on saatavilla useita erilaisia optimointialgoritmeja (Jin et al., 2008). Monet tässä työssä tarkastellut tutkimukset ovat tutkineet evolutiivisiin algoritmeihin kuuluvia geneettisiä algoritmeja. Ne ovat osoittautuneet tehokkaiksi etsintä- ja optimointimenetelmiksi monitavoitteisen tehtävän ratkaisuun. (Giustolisi & Berardi, 2009) Seuraavaksi käsitellään tarkemmin geneettisiä algoritmeja.

## 2.2.4 Geneettiset algoritmit

Geneettiset algoritmit ovat evolutiivisia algoritmeja (Nafi et al., 2008), joita käytetään etsintämenetelminä tutkimaan ratkaisuvaihtoehtoja monen eri tieteenalojen ongelmien ratkaisemisessa (Dandy & Engelhardt, 2001; Lee et al., 2009; Nafi & Kleiner, 2010; Ward & Savić, 2012). Geneettiset algoritmit ovat lähtöisin evolutiivisen laskennan alalta ja ne jäljittelevät luonnossa havaittua biologisista lajien sopeutumista ja kehittymistä sekä toimintoja, joihin kuuluvat luonnonvalinta, lisääntyminen, risteytys ja mutaatio (Halhal et al., 1997; Lee et al., 2009; Ward & Savić, 2012).

Geneettisistä algoritmeista on kehittynyt varteenotettava tekniikka vesijohto- ja jätevesiverkostoa koskeviin suunnittelu- ja hallintatehtäviin, kuten saneerausten optimointiin ja aikataulutukseen (Nafi & Kleiner, 2010; Ward et al., 2014). Merkittävä etu geneettisten algoritmien käytössä verrattuna muihin optimointimenetelmiin on niiden hyödyllinen ominaisuus tutkia ratkaisuvaruutta useista kohdista samanaikaisesti (Dandy & Engelhardt, 2001; Wu et al., 2001). Tämä suurentaa todennäköisyyttä löytää globaali optimi ja välttää ratkaisun lähentyminen paikalliseen minimiin (Dandy & Engelhardt, 2001; Wu et al., 2001). Optimaalisen ratkaisun etsinnän hajauttaminen mahdollistaa myös valikoidun ratkaisujen läpikäynnin ja rinnakkaisten ratkaisujen muodostumisen (Halhal et al., 1999; Wu et al., 2001). Lisäksi geneettisen algoritmin toiminnassa etuna on algoritmin tapa käsitellä suoraan tavoitefunktiota, jolloin muuta lisätietoa ei tarvita (Halfawy et al., 2008; Lee et al., 2009). Haittapuolena geneettistä algoritmia käytettäessä on mahdollisten useiden algoritmin ajokertojen aiheuttama pitkäkö käsitelyaika (Dandy & Engelhardt, 2001).

Geneettiset algoritmit soveltuvat hyvin erilaisten optimointitehtävien ratkaisemiseen (Dandy & Engelhardt, 2001; Lee et al., 2009; Ward & Savić, 2012). Niitä voidaan hyödyntää muun muassa epälineaaristen, diskreettien eli epäjatkuvien ja useita huippuja sisältävien tavoitefunktioiden ja rajoitusehtojen optimoinnissa (Dandy & Engelhardt, 2001; Lee et al., 2009). Verrattain uusi kehityssuunta on monitavoitteisen geneettisen algoritmin käyttö optimoinnissa, jossa pyritään löytämään dominoitumattomia eli useaan kilpailevaan tavoitteeseen eri tavoin suhtautuvia vaihtoehtoisia ratkaisuja tehtävään. (Nafi & Kleiner, 2010)

Geneettiselle algoritmille on tyypillistä koodata suunnittelua ohjaavat tekijät, kuten päätöksentekomuuttujat, numerotietoa sisältävään merkkijonoon, joka toimii kuten kromosomi luonnossa (Halhal et al., 1997; Giustolisi & Berardi, 2009) Geneettisen algoritmin toiminta alkaa tavallisesti satunnaisesta aloituspopulaatiosta, jossa populaation yksilöt on kuvattu nauhamaisina numerojonoina (Wu et al., 2001). Nämä merkkijonot kuvaavat kyseessä olevan tehtävän ratkaisuja (Dandy & Engelhardt, 2001; Wu et al., 2001). Jokaisen ratkaisun kelpoisuutta eli suorituskykyä arvioidaan tavoitefunktioon nähden ja se arvotetaan hyvyysfunktion avulla (Halhal et al., 1997; Wu et al., 2001; Lee et al., 2009). Lisääntyminen risteytyksen avulla sekä mutaatio ovat keskeisiä mekanismeja algoritmin toiminnan kannalta. Risteytys tuottaa uusia yksilöitä prosessiin arvioitavaksi ja mutaatio on tärkeä toiminto populaation monimuotoisuuden säilyttämisessä (Jin et al., 2008). Mutaatio voi aikaansaada ennakoimattoman suunnan algoritmille ratkaisuvaruudessa ja sen avulla voidaan varmistaa ettei hyödyllinen geneettinen materiaali häviä ennenaikaisesti (Halhal et al., 1997; Wu et al., 2001). Se myös auttaa estämään ratkaisun lähentymistä paikalliseen optimiin (Wu et al., 2001).

## 2.2.5 Esimerkki optimointimallista siltojen saneeraussuunnittelussa

Liikennevirasto toteutti yhteistyössä tutkijoiden kanssa tutkimuksen, jossa kehitettiin robustia portfolio-mallinnusta hyödyntävä optimointisovellus siltojen saneerausten priorisointiin. Toisin kuin tavallisessa optimoinnissa, portfolio-mallinnuksessa ei etsitä yhtä optimiratkaisua, vaan ratkaisu on joukko dominoitumattomia portfolioita. Dominoivat portfoliot ovat toteuttamiskelpoisempia verrattuna dominoituun portfolioon jonkin mittarin perusteella. Dominoitumattomia portfolioita etsitään ratkaisuksi, koska tällöin ei ole olemassa toista portfolioa, joka olisi dominoitumatonta portfolioa parempi suorituskyvyltään. Tutkimuksessa tarkastellut useat sadat saneerausprojektkandidaatit muodostavat priorisoinnin tuloksena seuraavat kolme ryhmää: pääprojektit, rajalla olevat projektit ja ulkopuoliset projektit. Pääprojektit ovat saneerauskohteita, jotka kuuluvat kaikkiin optimaalisiin ratkaisuihin eli dominoitumattomiin portfolioihin, rajalla olevat projektit kuuluvat osaan dominoitumattomista portfolioista ja ulkopuoliset projektit eivät kuulu mihinkään dominoitumattomaan portfolioon. Tämän tyyppisen jaottelun perusteella päätöksentekijää suositellaan valitsemaan saneerattavaksi pääprojekteja ja jättämään ulkopuoliset projektit saneeraamatta, jotta maksimoitaisiin saneerauksesta saavutettavat hyödyt. Menetelmä jättää kuitenkin jouston varaa saneerausprojektien valintaan, kun rajalla olevat projektit muodostavat keskeisen ryhmän, joka vaikuttaa myös toteutettavien saneerauksien kokoonpanoon. (Mild et al., 2015)

Saneerausongelman asettelu ei ole tyypillinen vain siltaprojekteille, vaan ongelman keskeiset piirteet ovat havaittavissa myös muissa infrakohteissa. Ongelman pääpiirteisiin kuuluvat seuraavat asiat:

- 1) lähtökohtana voi olla useita satoja projektkandidaatteja, joiden joukosta valitaan vain osa saneerattavaksi käytettävissä olevien resurssien rajoissa
- 2) suuri määrä olemassa olevia projekteja koskevaa tietoa
- 3) tarve priorisoida projekteja monesta näkökulmasta samanaikaisesti
- 4) suunnittelu voi pohjautua epätäydelliseen tai osittain vanhentuneeseenkin tietoon, kuten epävarmaan kustannusarvioon
- 5) osa suunnittelua ohjaavista rajoitteista on tiukkoja, osa puolestaan joustavia
- 6) käytetyn tiedon syntyminen ja hyödyntäminen on jatkuvaa, joten tietoa tulee päivittää määräajoin

Projektin myötä kehitetyn sovelluksen etuna voidaan pitää etenkin sitä, että se pystyy tuottamaan epätäydellisistä lähtötiedoista tukea saneerauspäätöksiin. Optimointi tuottaa laskettuja indeksejä ja niiden avulla yksittäisistä projekteista koostuvat portfoliot saadaan jaettua kolmeen erilaiseen ryhmään, jotka helpottavat saneeraukseen valittavien kohteiden valintaa. (Mild et al., 2015) Tämänkaltaista saneerauskohteiden jaottelua eri ryhmiin on hyödynnetty myöhemmin myös tämän työn tapaustutkimuksessa.

Kehitetty optimointisovellus on esimerkki onnistuneesta infra-alan saneerausten priorisoinnista, joka on toteutettu Suomessa. Projektin tavoitteena oli luoda systemaattinen, läpinäkyvä ja toistettavissa oleva mallinnus tukemaan päätöksentekoa. Kokemusten perusteella malli on tarpeeksi yksinkertainen ja käytännöllinen, ja se jättää tilaa myös siltamestarien painottamille keskeisille tekijöille, joita ei ole sisällytetty sovellukseen. Mallia on säännöllisin väliajoin päivitetty ja loppukäyttäjät eli siltamestarit ovat saaneet vaikuttaa mallin kehitykseen, mikä on helpottanut sovelluksen käyttöönottoa ja parantanut sitoutumista mallin käyttämiseen. (Mild et al., 2015)

## 2.2.6 Tilastolliset menetelmät

Verkostosaneerausten priorisoinnissa käytetyt mallit hyödyntävät monesti tilastollisilla menetelmillä tuotettua tietoa, jolla pyritään ennustamaan esimerkiksi tulevien vuotojen määrä ja ajankohta, putken kuntoindeksin heikkeneminen putken ikääntymisen myötä, tai tulevia kustannuksia (Abraham et al., 1998; Loganathan et al., 2002; Wirahadikusumah & Abraham, 2003; Rogers & Grigg, 2009). Kun tilastollisia menetelmiä hyödynnetään ennustamaan jonkin ilmiön tulevaa käyttäytymistä, ennusteen pohjana käytetään yleensä historiatietoja (Wirahadikusumah & Abraham, 2003; Rogers & Grigg, 2009). Historiatietojen pohjalta ennustemallille määritetään oikeat kertoimet esimerkiksi matriisilaskentaa hyödyntävien Markovin ketjujen avulla (Abraham et al., 1998; Wirahadikusumah & Abraham, 2003). Putkirikko- ja kuntotietoa on kuitenkin kerätty vesihuoltolaitoksilla vasta parin vuosikymmenen ajan, joten useinkaan tarvittavaa historiatietoa ei ole saatavilla (Rogers & Grigg, 2009). Tällöin ennustemallin kertoimien määrittämisessä hyödynnetään asiantuntija-arvioita tai simuloidaan tulevat arvot esimerkiksi Monte Carlo-menetelmällä (Wirahadikusumah & Abraham, 2003; Davis & Marlow, 2008).

Saneerausongelman ratkaisemisessa käytetyistä tilastollisista menetelmistä yleisiä lähestymistapoja ovat regressio ja probabilistiset mallit (Loganathan et al., 2002; Rogers & Grigg, 2009). Regressio tunnistaa asioiden välisiä yhteyksiä kumulatiivisesta historia-tiedosta paikan ja ajan suhteen ja olettaa muuttujien suhdetta kuvaavien trendien jatkuvan samankaltaisena tulevaisuudessa (Rogers & Grigg, 2009). Probabilistiset mallit soveltuvat käytettäväksi esimerkiksi silloin, kun historiatieto on puutteellista (Wirahadikusumah & Abraham, 2003; Davis & Marlow, 2008), ja ne hyödyntävät ennustamisessa todennäköisyyksiä ja erilaisia jakaumia (Rogers & Grigg, 2009). Vesijoh-tojen putkirikkojen ennustamisessa painopiste on viime vuosikymmeninä siirtynyt probabilististen mallien käyttöön (Rogers & Grigg, 2009), joita on hyödynnetty myös jäte-vesiviemäreiden kunnan heikkenemisen ennustamisessa (Wirahadikusumah & Abraham, 2003; Davis & Marlow, 2008).

Regressiossa historiatietoa käytetään ennustamaan esimerkiksi esiintyvää vuototiheyttä jollakin ajanhetkellä tulevaisuudessa (Rogers & Grigg, 2009). Ennustaminen hyödyntää siis nykytilaa ja sitä edeltävää tietoa ja sovittaa ennustettuihin pistesarjoihin, jonkin

funktion kuvaamaan muuttujien välistä yhteyttä. Trendiä kuvaava funktio voi olla lineaarinen, eksponentiaalinen, polynominen tai epälineaarinen riippuen muuttujien välisestä suhteesta. Regressiolla ennustaminen tehdään nykyhetkellä ja se antaa sen hetkisen arvion tulevaisuudesta sillä hetkellä käytettävissä olevan tiedon perusteella. Regression antama ennuste voi kuitenkin vanheta ajan myötä eikä sillä ole mahdollista useaan kertaan simuloida lyhyempien tarkasteluajanjaksojen ennusteita nykyhetkellä, sillä se ei probabilististen mallien tapaan hyödynnä todennäköisyyksiä. Toki todennäköisyysjakauma, jolla tulevaisuutta ennustetaan, määräytyy putken nykyhetken olosuhteiden mukaan (Wirahadikusumah & Abraham, 2003).

Probabilistisia malleja voidaan käyttää esimerkiksi putkirikon esiintymistodennäköisyyden ennustamisessa (Rogers & Grigg, 2009). Niitä on käytetty myös vesijohtojen ja jätevesiviemäreiden kunnan heikentymisen ennustamiseen (Wirahadikusumah & Abraham, 2003; Davis & Marlow, 2008). Putkirikon esiintymisen todennäköisyys voi olla esimerkiksi niin korkea, että katsotaan, että putki on parasta saneerata, tai kuntoindeksin arvon perusteella putki on niin huonossa kunnossa, että se edellyttää saneeraustoimenpiteitä. Tavallisesti regressio ja probabilistiset mallit edeltävät saneerausten priorisointia koskevaa päätöksentekoa, joka voidaan myöhemmässä vaiheessa toteuttaa determinististen päätöspuiden tai optimointimenetelmien avulla (Abraham et al., 1998; Wirahadikusumah & Abraham, 2003). Esimerkkejä probabilistisista malleista ovat Monte Carlo-simulaatio, epähomogeeninen Poisson-prosessi ja Markovin ketju (Abraham et al., 1998; Wirahadikusumah & Abraham, 2003; Davis & Marlow, 2008; Rogers & Grigg, 2009).

Monte Carlo-simulaatiolla päätöksentekomuuttujia generoidaan satunnaisesti tietokoneohjelman avulla käyttäen hyväksi muuttujien todennäköisyysjakauman arvoja. Monte Carlo-menetelmä voidaan esimerkiksi yhdistää fysikaaliseen putkirikkomalliin, jolloin simulaation tuottamia satunnaisia arvoja käytetään edelleen fysikaalisessa mallissa ennustamaan putken tulevaa vahinkokäyttäytymistä ja putken odotettua käyttöikää. (Davis & Marlow, 2008)

Epähomogeeninen Poisson-prosessi eli NHPP (engl. non-homogeneous Poisson process) on komponenttitason mallinnusmenetelmä, joka soveltuu vesijohtojen vahinkojen ennustamiseen. Menetelmä hyödyntää probabilistista ROCOF-funktiota (engl. rate of occurrence of failure), joka ottaa huomioon putken elinkaaren eri vaiheet. ROCOF on joustava työkalu, joka pystyy käsittelemään puutteellistakin putkirikkotietoa. (Rogers & Grigg, 2009)

Markovin ketju on myös probabilistinen malli, jonka toimintamekanismi soveltuu ennustemallien kehittämiseen. Markovin ketjulla voidaan kuvata stokastisia prosesseja. Stokastisille prosesseille on ominaista se, että todennäköisyydet, jotka ennustavat prosessin tulevaa kehitystä, riippuvat vain nykyhetkestä eikä historiatiedolla ole tällöin



merkitystä. Markovin ketjua on käytetty onnistuneesti mallintamaan myös erilaisten infrarakenteiden kunnan heikkenemistä. (Abraham et al., 1998)

## **2.3 Eroavaisuudet vesijohto- ja jätevesiverkoston saneerausten priorisoinnissa**

Vesijohto- ja jätevesiverkoston saneerausten priorisoinnissa on omia erityispiirteitään. Vesijohtoverkoston saneerausten priorisoinnista löytyy laajasti kirjallisuutta viime vuosikymmenten ajalta (Ward & Savić, 2012). Jätevesiverkoston osalta aihetta on käsitelty vasta hiukan vesijohtopuolta myöhemmin ja selkeästi vähemmän. Kuitenkin myös jätevesiverkoston saneerausten priorisoinnista on kirjoitettu jo lukuisien vuosien ajan. Molemmat alat ovat alkaneet käyttää optimointialgoritmeja ja muita kehittyneitä työkaluja saneerausten priorisointiin. Jätevesiala on kuitenkin vasta hiljattain alkanut hyödyntää kyseisiä työkaluja, niiden ollessa käytössä jo pidempään vesijohtoverkoston saneerausten suunnittelussa (Ward & Savić, 2011; Ward & Savić, 2012).

Vesijohtojen ja jätevesiviemärien saneerausten priorisoinnissa putkien kunnan ennustaminen toteutetaan tyypillisesti hiukan eri tavoin kullekin putkilajille. Menetelmät ovat erilaisia, sillä trendit putkivahinkojen esiintymisessä ja saatavilla oleva kenttätieto vaihtelevat vesijohdoilla ja jätevesiviemäreillä. Vesijohtojen kunnan ennustamisessa käytetään yleensä hyväksi historiatietoa toteutuneista putkirikoista tai lasketaan kunnan heikkenemis- tai paranemisprosessia kuvaavia malleja, joilla voidaan ennustaa tulevan putkirikon ajankohta tai vuototiheys. Jätevesiviemäreille raportoidaan puolestaan tyypillisesti vain vahingot, jotka johtavat viemärin kokonaisvaltaiseen sortumiseen. Käytännössä ainoastaan vahinkohistorian perusteella ei voida tunnistaa saneerausta tarvitsevia kohteita, sillä jätevesiviemärit voivat monesti olla huonossa kunnossa ja tarvita saneerausta siitäkin huolimatta, että varsinaista vahinkoa ei ole vielä tapahtunut. (Fenner, 2000) Tästä syystä kuntotutkimukset, jotka toteutetaan tavallisesti TV-kuvauksella, ovat soveltuva ja paljon käytetty menetelmä jätevesiviemärien kunnan selvittämiseen (deMonsabert et al., 1999; Ariaratnam & MacLeod, 2002; Wirahadikusumah & Abraham, 2003; Ward et al., 2014).

Jätevesiviemärien kuntoa arvioidaan usein kuntoluokituksen avulla, joka perustuu yleensä TV-kuvaamalla saatuun kuntotutkimustietoon. Putken kunnan arviointi perustuu pisteytysmenetelmään, jolla kuvataan verkoston nykyistä tilaa (Abraham et al., 1998). Tätä pisteytystä kutsutaan kuntoindeksiksi. Vastaavaa menetelmää ei yleensä käytetä vesijohdoille, sillä niiden kunnan arviointi perustuu tavallisesti putkirikkojen ja vuotojen korjauksen yhteydessä saatuihin aistinvaraisiin havaintoihin eikä TV-kuvaamista käytetä niiden kunnan dokumentointiin. Kuntoluokitus on standardoitu tapa luokitella erilaisia jätevesiviemäriä esiintyviä vikoja (Ward & Savić, 2011). Tyypillisesti putken kunnan arvioinnissa tunnistetaan eri osissa putkea esiintyviä vikoja, joiden mukaan lasketaan putken kokonaisvaltaista kuntoa kuvaava kuntoindeksi

(Wirahadikusumah & Abraham, 2003). Esimerkiksi Iso-Britanniassa paikallinen Vesi-tekniikan tutkimuskeskus (Water Research Centre) on tuottanut standardeja ja ohjeistuksia kuntoluokituksen toteuttamiseen (Ward & Savić, 2011). Tavallisesti jätevesiviemärien kuntoindeksit sisältävät viisi luokkaa, jotka kuvaavat jätevesiviemäriin asteittaista kunnan heikentymistä. Luokka 1 kuvaa yleensä hyvää kuntoa ja luokka 5 puolestaan huonoa kuntoa. (Wirahadikusumah & Abraham, 2003; Ward & Savić, 2011)

Jätevesiviemäreiden etuna verrattuna vesijohtojen saneerausten priorisointiin on se, että putkien kunto on verrattain helppo todentaa vesijohtoihin nähden (Ward & Savić, 2012). Jätevesiviemäreiden saneerauksen suunnittelun osalta haittapuolena on se, että yleensä tietokannoissa on epätäydellisemmin ja rajoitetummin tietoa saatavilla jätevesiviemäreistä kuin vesijohdoista. Tämä voi rajoittaa merkittävästi toteutettavan analyysin tasoa ja tyyppiä. Lisäksi se on osaltaan syy siihen, että jätevesiviemäreitä on tutkittu vähemmän kuin vesijohtoja ja sen seurauksena niiden kunnossapitämiseen liittyviä menetelmiä on kehitetty vähemmän. (Fenner, 2000)

## 2.4 Saneerauksen valintaan vaikuttavat tekijät

Työn yhtenä tarkoituksena on kerätä saneerausten priorisoinnissa esiintyneitä saneerauksen valintaan vaikuttavia tekijöitä sekä luokitella niitä yleisemmällä tasolla. Seuraavaksi esitellään syntynyt yhteenveto kirjallisuudesta kerätyistä saneerauksen valintaan vaikuttavista tekijöistä. Yhteenveto on koottu yhteensä 40 eri tutkimuksen perusteella.

Saneerauksen valintaan vaikuttavat tekijät voidaan jakaa kahdeksaan ryhmään (kuva 2), joissa tekijöitä kuvaavat seuraavat ylätasot:

1. Saneerauksen toteutus
2. Putken ympäristö
3. Kustannukset
4. Verkoston suorituskyky
5. Putken ominaisuustiedot
6. Riskeihin liittyvä tieto
7. Ajalliset tekijät
8. Muut tekijät

Näihin kahdeksaan ryhmään luokiteltuja saneerauksen valintaan vaikuttavia tekijöitä on koottu taulukkoon 2. Ensimmäinen ryhmä eli saneerauksen toteutus sisältää saneerauksella saavutettavia hyötyjä, kuten mittakaavaedut sekä synergiaedut, jolla tarkoitetaan mahdollisuutta toteuttaa saneeraus samanaikaisesti lähellä sijaitsevien toisten infra-hankkeiden yhteydessä. Tämä ryhmä ei sisällä hyötynä saneerauksella saavutettavaa suorituskyvyn paranemista, sillä se on sisällytetty verkoston suorituskykyyn liittyvien tekijöiden ryhmään. Ryhmässä on tekijöitä yhteensä 11 eri tutkimuksesta. Lisäksi ryhmä sisältää päätöksentekoon liittyviä tekijöitä, joilla on merkitystä eri saneerausmene-

telmien valinnassa. Usein eri saneerausmenetelmien valintaan liittyvän päätöksenteon lähdemateriaalina oli esimerkiksi jätevesiviemäreiden kohdalla kuntotutkimuksen TV-kuvausraportit (Ward & Savić, 2011; Ward et al., 2014). Mittakaavaetujen ja läheisten infrahankkeiden yhtäaikaaisella toteuttamisella pyritään yleensä saneerauksen kustannus-  
tehokkuuden lisäämiseen.



**Kuva 2.** Saneerauksen valintaan vaikuttavien tekijöiden luokittelu.

Toinen ryhmä on putken ympäristöön liittyvät tekijät. Neljä viidestä ryhmään kuuluvasta tekijästä, joita ovat putken sijainti, maaperän tyyppi, olosuhteet ja liikennetaso, ovat melko ilmeisiä merkitykseltään. Viides tekijä, kohteen haavoittuvuus, kuvaa saneerauskohteen luonnetta, kuten asukastiheyden merkitystä saneeraustarpeeseen (Tagherouit et al., 2011). Esimerkiksi kaupallisten keskittymien tai sairaalan läheisyydessä sijaitsevat putket ovat kriittisempiä sillä, putkessa tapahtuvilla vahingoilla on suurempi vaikutus ja putkien vikaantumisesta aiheutuu suuremmat kustannukset verrattuna verkoston latvaosissa sijaitseviin putkiin (Tagherouit et al., 2011). Lisäksi putken ympäristöön liittyvät tiedot ovat keskeisiä ja tarpeellisia, kun halutaan tietoa ympäristön vaikutuksesta putken kunnan heikentymiseen (Nafi et al., 2008).

Kolmas ryhmä koostuu taloudellisista tekijöistä, jotka sisältyivät tekijöinä 32 eri tutkimukseen. Tämä ryhmä oli tutkimusten määrän perusteella yleisin vaikuttavien tekijöiden ryhmä. Ryhmä sisältää eri tyyppisiä kustannuslajeja, kuten sujuttamisen, uusimisen ja korjaamisen kustannuksia. Taloudellista tietoa ylläpito- ja saneerauskustannuksista on hyvä olla olemassa, jotta voidaan vertailla ja arvioida eri saneeraus- ja huoltotoimenpiteitä ja niiden kannattavuutta (Nafi et al., 2008).

Neljäntenä ryhmänä on verkoston suorituskykyyn liittyvät tekijät, jotka esiintyivät 22 eri tutkimusartikkelissa. Tämän ryhmän tekijöistä esimerkiksi putken kuntotietojen sekä putkirikko- ja korjaustiedon avulla voidaan ennustaa tulevaa vuototiheyttä, mahdollisten putkirikkojen määrää, suunnitella kuntotutkimuksia ja ennakoida saneerauksen tarvetta sekä ajankohtaa (Davis & Marlow, 2008).

Viides ryhmä on putken ominaisuustiedot, joita löytyi 14 eri tutkimuksesta. Monet putken ominaisuustiedot yleensä kirjataan, kun putki alunperin asennetaan (Rogers & Grigg, 2009; Baah et al., 2015). Näitä tietoja voidaan myöhemmin helposti hyödyntää vesilaitoksen tietojärjestelmästä (Nafi et al., 2008; Rogers & Grigg, 2009).

Kuudes ryhmä käsittää riskeihin liittyvän tiedon. Tähän ryhmään kuuluvia tekijöitä ke-rättiin yhteensä 12 eri tutkimuksesta. Ryhmä sisältää vahinkoja, häiriöitä, riskiä ja putken kriittisyyttä kuvaavia tekijöitä. Riskiin ja kriittisyyteen liittyvät tekijät muodostuvat riski- tai kriittisyysindekseistä ja putken kriittisyyteen vaikuttavista tekijöistä. Nämä tekijät määrittävät riskiä ja sen mahdollisia vaikutuksia. Putken kriittisyyteen liittyvät tekijät, kuten esimerkiksi tieluokka, vaikuttavat ymmärrettävästi saneerauksen tarpeellisuuteen ja kiireellisyyteen.

Seitsemäntenä ryhmänä on ajalliset tekijät, joita oli yhdeksässä tutkimuksessa. Ajallisista tekijöistä mainittiin esimerkiksi saneerausajankohta, suunnitteluajanjakso ja budjettivuosi. Ajanmääreitä käytetään yleisesti muuttujana niin tavoitefunktioissa kuin rajoite-ehtoissakin tutkimuksissa, joissa on tarkasteltu saneerauksen aikataulutusta (Kleiner et al., 1998b; Halhal et al., 1999; Dandy & Engelhardt, 2001; Hong et al., 2006; Dridi et al., 2008; Nafi & Kleiner, 2010; Ugarelli & Federico, 2010; Roshani & Filion, 2014; Li et al., 2016). Ajalliset tekijät, kuten saneerauksen ajankohta ovat merkittäviä, kun tarkastellaan esimerkiksi putken elinkaarikustannuksia. Tällöin voidaan saneerauksen kustannuksia ja hyötyjä tarkastelevan analyysin avulla määrittää optimaalinen saneerausajankohta. (Davis & Marlow, 2008)

Kahdeksannen ryhmän muodostavat muut tekijät. Ryhmä on kooltaan pieni ja sisältää vain muutamia tekijöitä kuudesta eri tutkimuksesta. Pääosin nämä tekijät ovat erilaisia päätöksenteko- tai ryhmittelymuuttujia ja mallin parametreja. Muut mainitut tekijät ovat kuljetusetäisyys putkea uusittaessa ja vuotojen havaitsemistutkimusten ennustettu määrä.

**Taulukko 2. Saneerauksen valintaan vaikuttavat tekijät**

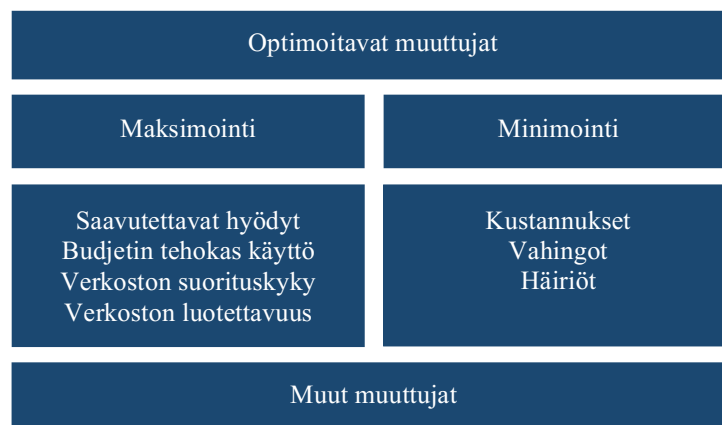
Saneerauksen toteutus	Putken ympäristö	Kustannukset	Verkoston suorituskyky	Putken ominaisuuksiedot	Riskeihin liittyvä tieto	Ajalliset tekijät	Muut tekijät
Mittakaavaedut	Putken sijainti	Sujuttaminen	Putken kunnottiedot	Tunnus	Vahingon tyyppi	Saneerausajankohta	Päätöksentekomuuttujat
Synergiaedut	Maaperäntyyppi	Uusiminen	Suorituskyvyn mittarit	Ikä	Vahingon seuraukset	Suunnitteluajanjakso	Ryhmittelymuuttujat
Päätökseen-tekoon liittyvät tekijät	Olosuhteet	Korjaaminen	Suorituskyvyn vaatimukset	Pituus	Vahingon todennäköisyys	Budjettivuosi	Mallin parametrit
	Liikennetaso	Rakentaminen	Putkiriikko- ja korjaustieto	Materiaali	Häiriöiden määrä		
	Kohteen haavoittuvuus	Kuljetus	Putkiriikkojen määrä	Halkaisija	Häiriöiden todennäköisyys		
		Verkoston ylläpito	Vuototiedot	Asennustiedot	Riskiä kuvaavat tekijät		
		Energia		Lukumäärä	Kriittisyys		
		Häiriöt					
		Koneet ja työvoima					
		Taloudelliset muuttujat					
		Muut kustannustekijät					

On mahdollista, että yhteenvedossa ei ole tunnistettu kaikkia tekijöitä. Yhteenvedo saneeraukseen vaikuttavista tekijöistä antaa kuitenkin yleiskuvan saneerausten priorisointiin vaikuttavista tekijöistä, joista ainakin osa olisi hyvä ottaa huomioon saneerausten priorisointia toteutettaessa. Kaikkia näitä tekijöitä on tuskin mahdollista sisällyttää yhteen malliin tai tarkasteluun, joten saneerausten priorisointia suunniteltaessa olisi tärkeää tunnistaa kyseessä olevan saneerausten priorisointitavan kannalta keskeiset tekijät.

## 2.5 Optimoitavat muuttujat

Luku 2.5 käsittelee optimoitavia muuttujia, joiden perusteella saneerausten priorisointi on toteutettu tässä diplomityössä tarkastelluissa tutkimuksissa. Työn tavoitteena on koota tutkimuksissa käytettyjä optimoitavia muuttujia yhteensä 39 eri tutkimuksesta ja luokitella niitä yleisemmällä tasolla.

Tarkasteltujen tutkimusten perusteella optimoitavat muuttujat voidaan jakaa maksimoitaviin ja minimoitaviin muuttujiin sekä muihin muuttujiin. Maksimoitavia muuttujia on neljä ja minimoitavia muuttujia kolme erilaista. Maksimoitavat muuttujat ovat saavutettavat hyödyt, budjetin tehokas käyttö, verkoston suorituskyky ja verkoston luotettavuus. Minimoitavia muuttujia ovat puolestaan kustannukset, vahingot ja häiriöt. Lisäksi on muiden muuttujien ryhmä, joiden optimoitavia muuttujia ei saatu luokiteltua edellä mainittuihin maksimoitavista tai minimoitavista muuttujista muodostettuihin seitsemään eri ryhmään. Kuvassa 3 on havainnollistettu muuttujien luokittelua kuhunkin ryhmään.



**Kuva 3.** Optimoitavien muuttujien luokittelu

Ensimmäinen ryhmä optimoitavia muuttujia käsittää saneerauksella saavutettavat hyödyt. Ryhmään kuuluvat muuttujat ovat kolmesta tutkimusartikkelista (Abraham et al., 1998; Halhal et al., 1999; Davis & Marlow, 2008). Ryhmään kuuluvat saneerauskohteen hyödyn ja kustannuksen suhde sekä saneerauksen nettohyötyarvo. Molemmat muuttujat kuvaavat saneerauksella saavutettua hyötyä.

Toisena ryhmänä optimoitavia muuttujia on budjetin tehokas käyttö. Tämä muuttuja esiintyi yhdessä tutkimusartikkelissa (Nafi & Kleiner, 2010). Budjetin järkevä hyödyntäminen on saneerausten priorisoinnin kannalta keskeistä, kun saneeraukseen käytettävissä olevat resurssit ovat monesti pienemmät kuin itse saneeraustarve. Budjetin tarkastelu sisältyy yleensä jollakin tasolla kaikkien priorisointi- ja optimointimallien käyttöön vaikka sitä ei suoraan asetettaisikaan rajoite-ehdoksi. Budjettiin liittyvät näkökohdat vaikuttavat siten usein taustalla saneerauspäätöksiä tehtäessä. Tästä syystä se on nostettu esiin omana ryhmänään.

Kolmantena ryhmänä on verkoston suorituskykyä maksimoivat muuttujat. Näitä muuttujia esiintyi 12 tutkimusartikkelissa. Tähän ryhmään kuuluvat muun muassa verkoston rakenteellisen, hydraulisen ja toiminnallisen sekä kokonaisvaltaisen kunnon parannustoimenpiteet, vesijohdoilla vuotovetenä menetetyn veden ja jätevesiviemäriin pääsevän vuotoveden minimointi sekä virtausnopeutta ja painetta optimoivat tavoitefunktiot. Vesijohdoilla vuotovesi virtaa paineellisesta putkesta ulospäin. Jätevesiviemäreissä vuotovesiä kulkeutuu tavallisesti enemmän sisäänpäin kuin ulospäin. Viemäriin päätyvä vuotovesi johtuu rikkonaisista verkoston osista, laittomista hulevesiviemäriin liittokista tai asiaankuulumattomasta kuivatus- tai hulevedestä (deMonsabert et al., 1999). Jätevesiviemäriin vuotoveden määrää pyritään minimoimaan, sillä se lisää jäteveden käsittelykustannuksia, pienentää jätevesiviemäriin käytössä olevaa hydraulista kapasiteettia, lisää pumppauskustannuksia ja suurentaa viemäriin ylivuodon mahdollisuutta (deMonsabert et al., 1999).

Verkoston luotettavuutta maksimoivat muuttujat muodostavat neljännen ryhmän optimoitavia muuttujia. Tämän ryhmän muuttujia löytyi neljästä tutkimuksesta (Dandy & Engelhardt, 2006; Kao & Li, 2007; Giustolisi & Berardi, 2009; Ward & Savić, 2014). Tarkasteltujen tutkimusten perusteella verkoston luotettavuutta voidaan parantaa muun muassa seuraavilla toimenpiteillä, jotka ovat:

1. asiakkaalle aiheutuvien häiriöiden minimointi
2. vedenjakelun luotettavuuden varmistaminen
3. huollettavuuteen liittyvien ongelmien ennaltaehkäiseminen
4. verkoston kokonaisvaltaisen luotettavuuden takaaminen

Viidentenä ryhmänä on kustannusten minimointi. Tähän ryhmään löytyi optimoitavia muuttujia yhteensä 32 eri tutkimuksesta. Kustannuksia käsittelevistä optimoitavista muuttujista on selkeyden vuoksi esitetty listaus alla. Kaikkia seuraavia kustannustekijöitä on minimoitu tarkastelluissa tutkimuksissa:

1. saneerauksen kokonaiskustannukset
2. saneerauksen rakentamis- ja uusimiskustannukset
3. saneerauksen elinkaarikustannukset
4. saneerauksen pääomakustannukset

5. käyttökustannukset
6. korjauskustannukset, kuten putkirikoista aiheutuvat kustannukset
7. ylläpitokustannukset
8. energiakustannukset
9. vuotoveden käsittelykustannukset

Erilaisia minimoitavia kustannuksia on melko monenlaisia, kuten yläpuolelta olevasta listasta voi havaita. Kustannuksiin liittyvät muuttujat vaihtelevat paljon siitä syystä, että saneerausten priorisointiin tarkoitettuja optimointimalleja ja lähestymistapojakin on monia erilaisia.

Kuudentena ryhmänä optimoitavia muuttujia on vahinkojen minimointi. Tähän ryhmään kuuluvia muuttujia kerättiin neljästä eri tutkimusartikkelista (Halfawy et al., 2008; Ward & Savić, 2012; Mohamed & Zayed, 2013; Baah et al., 2015). Vahinkojen minimointi tapahtuu artikkelien perusteella minimoimalla verkoston keskimääräistä riskiä tai kriittiselle putkelle tai ylipäätään kaikille putkille aiheutuvia vahinkoja. Putken kriittisyyttä tarkasteltaessa voidaan käyttää hyväksi kriittisyysindeksiä.

Häiriöiden minimointi muodostaa seitsemännen ryhmän optimoitavia muuttujia. Tämän ryhmän muuttujia esiintyi ainoastaan yhdessä tutkimusartikkelissa (Li et al., 2016). Tässä tutkimuksessa tarkastelutaso oli sekä yksittäiset putket että putkijoukot. Häiriöiden minimointi muodostui näiden putkien tai putkijoukkojen uusimisen aiheuttamien palveluhäiriöiden vaikutusten minimoimisesta.

Viimeinen eli kahdeksas ryhmä koostuu muista optimoitavista muuttujista, jotka eivät kuuluneet aikaisempiin ryhmiin. Näitä muuttujia löytyi kolmesta eri tutkimuksesta. Tämä ryhmä on joukko muutamia sekalaisia optimoitavia muuttujia, jotka ovat enemmän tai vähemmän tutkimuskohtaisia.

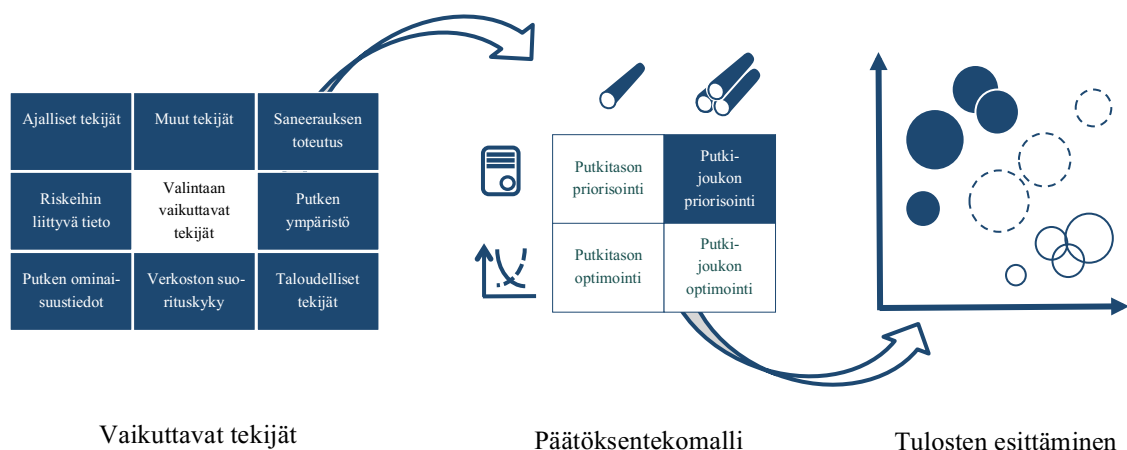


### 3. TUTKIMUSMENETELMÄT JA AINEISTO

Tässä luvussa käsitellään kohdeyritykselle eli Helsingin seudun ympäristöpalvelut -kuntayhtymälle kehitetyn saneerausten priorisoinnissa käytettävän työkalun perusteita, sen kehittämisen vaiheita sekä tarvittavaa aineistoa. Luvussa 3.1 esitellään tapaustutkimuksessa käytetty viitekehys saneerausten priorisointiin. Luvussa 3.2 on esitelty SANNI-riskiluokitus vesijohdoille ja jätevesiviemäreille. Luvussa 3.3 tarkastellaan saneerausten priorisoinnissa käytettyä menetelmää sekä aineistoa.

#### 3.1 Priorisoinnissa käytetty viitekehys

Tässä työssä käytetty viitekehys koostuu kolmesta osasta: saneerauksen valintaan vaikuttavista tekijöistä, saneerausten päätöksentekomallista ja tulosten esittämisestä. Kuvassa 4 on havainnollistettu viitekehyyksen rakennetta. Viitekehyyksen ensimmäisen osan muodostavat saneerauksen valintaan vaikuttavat tekijät. Nämä tekijät vastaavat kysymykseen: Mitkä tekijät vaikuttavat saneeraukseen? Toisena osana viitekehystä on saneerausten päätöksentekomalli, joka voi perustua priorisointi- tai optimointimalliin. Saneerausten päätöksentekomallin tehtävänä on vastata kysymykseen: Miten kohteet valitaan saneerattavaksi? Viimeisenä osana viitekehystä on tulosten esittäminen. Tämä viitekehyyksen osa vastaa kysymykseen: Mikä on prosessin tulos ja millä tarkkuudella tulosta halutaan tarkastella? Seuraavaksi käsitellään tarkemmin viitekehyyksen osia ja niiden roolia tässä työssä.



**Kuva 4.** Kuvaus priorisoinnissa käytetyn viitekehyyksen rakenteesta

Tämän työn tuloksena kehitetty työkalu saneerausten priorisoinnin seurantaan hyödyntää saneerausten valinnassa tekijöitä, jotka sisältyvät aikaisemmin HSY:llä kehitettyyn SANNI-riskiluokitukseen, sekä kustannustietoa saneerauskohteista. SANNI-

riskiluokitus oli valmistunut ennen tämän työn aloittamista, joten sen hyödyntäminen nähtiin hyvänä lähtökohtana saneerausten priorisoinnin jatkokehittämiselle. Tulevia saneerauskohteita koskevia, suuntaa-antavia kustannusarvioita lukuun ottamatta, kustannustietoa ei ole aikaisemmin hyödynnetty saneerausten priorisoinnissa HSY:llä.

Viitekehyksen ensimmäinen osio tarkastelee lähtötietoja, joita hyödynnetään saneerausten priorisoinnissa. Tässä työssä kehitetty saneerausten priorisoinnissa käytettävä työkalu hyödyntää saneerauksen valintaan vaikuttavia tekijöitä neljästä ryhmästä. Nämä ryhmät ja niihin kuuluvat saneeraukseen vaikuttavat tekijät on esitetty taulukossa 3.

**Taulukko 3.** *Saneerausten priorisoinnissa käytetyt saneerauksen valintaan vaikuttavat tekijät*

<b>Ryhmä</b>	<b>Tekijä</b>
<b>Putken ominaisuustiedot</b>	Putken tunnus Putken ikä Putken pituus Putken materiaali Putken halkaisija
<b>Verkoston suorituskykyyn liittyvät tekijät</b>	Putken kunto- ja vuototiedot
<b>Kustannukset</b>	Toteutuneet saneerauskustannukset
<b>Riskeihin liittyvä tieto</b>	Putken kriittisyys Vahingon todennäköisyys Vahingon seuraukset

Kehitetty työkalu ei ota kantaa ajallisiin tekijöihin, kuten saneerauksen ajankohtaan. Tarkastelun ulkopuolelle jäävät myös putken ympäristöön liittyvät tekijät, kuten maaperän tyyppi, jota ei ole sisällytetty SANNI-riskiluokitukseen. Myös saneerauksen toteutuksen osalta menetelmä ei ota huomioon mittakaava- tai synergiaetuja, joita voitaisiin saavuttaa esimerkiksi toteuttamalla saneerausprojekteja samanaikaisesti lähellä sijaitsevien infratöiden kanssa.

Viitekehyksen toinen osio määrittää saneerausten valinnan tarkastelutason ja vaihtoehtojen vertailun toteutustavan. Tämän työn päätöksentekomallina on käytetty putkijoukon priorisointia. Putkijoukko kattaa tässä tapauksessa kaikkien saneerattujen kohteiden putket. Priorisointi toteutetaan laskemalla kullekin saneerauskohteelle SANNI-indeksin parannus sekä yksikkökustannus metriä kohden. SANNI-indeksin parannuksen ja yksikkökustannuksen suhteen avulla lasketaan indeksi, jonka avulla kohteet asetetaan järjestykseen. Tämän pohjalta voidaan valita saneerauskohteita toteutettavaksi. Kehitetty menetelmä ei ole optimointimenetelmä, koska budjettia ei aseteta rajoite-ehdoksi. On myös tärkeä tunnistaa ero putkijoukon ja yksittäisen putken priorisoinnin välillä. Työssä tarkastellussa putkijoukon saneerausten priorisoinnissa ei etsitä parasta menetelmää tai

optimaalisinta aikaa yksittäisen putken saneeraukselle, vaan etsitään nimenomaan saneerauskelpoisimpia putkia putkijoukosta. Putkella viitataan tässä kunkin johtolajin saneerattuun osuuteen kussakin saneerauskohteessa.

Viitekehyksen kolmas osa sisältää prosessin tuloksen esittämisen. Tässä työssä tulokset esitetään Excel-taulukkolaskentaohjelman työkalujen avulla kuvaajana, jossa vaak akseli kuvaa saneerauksella saavutettavaa hyötyä ja pystyakseli yksikkökustannuksia, jotka on muokattu yksikkökustannusindeksiksi. Tämä esitystapa on havainnollinen, mutta halutessa olisi mahdollista käyttää myös muita esitystapoja. Tässä työssä toteutussa saneerauskohteiden priorisoinnissa on ollut tavoitteena rajata tarkemman tarkastelun tarvetta pienempään joukkoon saneerausprojekteja. Työssä ei ole sen sijaan pyritty selvittämään tarkkaa saneerausjärjestystä projekteille. Priorisointi on toteutettu jakamalla saneerausprojektit kolmeen ryhmään: kannattaviin, keskinkertaisiin ja kannattamattomiin. Ryhmien sisällä voidaan jatkaa tarkempaa tarkastelua kohteiden kesken. Alkuperäinen ajatus tämän tyyppiseen ratkaisuun on peräisin aikaisemmin tässä työssä esitellystä siltojen saneeraussuunnittelua käsittelevästä esimerkkitapauksesta, jossa hyödynnettiin myös projektien luokittelua eri ryhmiin. Tarkastelussa ei keskitytä lähtökohtaisesti yksittäisiin tapauksiin, vaan esityksen avulla pyritään rajaamaan tarkempaa tarkastelua hankalimpiin kohteisiin eli keskinkertaisten kohteiden priorisointiin, jotka on tuloksissa esitetty harmaalla värillä.

Tämän työn saneerausten priorisoinnissa käytettävä viitekehys on kolmen osion kokonaisuus. Saneerausten priorisointiin on useita erilaisia lähestymistapoja. Viitekehyksen avulla pyritään ottamaan olennaiset tekijät huomioon ja auttamaan lähestymistavan valitsemisessa saneerausten priorisointiin. Lisäksi viitekehyksen avulla prosessin eri osat voidaan sovittaa yhteen siten, että käytetty menetelmä toimii tarkoituksenmukaisesti ja antaa tulokseksi saneerauksen päätöksentekoa tukevaa tietoa.

### **3.2 SANNI-riskiluokitus**

SANNI-riskiluokitus kehitettiin HSY:llä vuonna 2015 toteutetun projektin tuloksena. Riskiluokituksen tavoitteena on helpottaa saneerausta tarvitsevien verkostokohteiden valintaa. Riskiluokitus perustuu laskettuihin kuntoindekseihin eli SANNI-indekseihin, joiden avulla voidaan saada riskiperusteinen arvio verkoston saneeraustarpeesta. SANNI-riskiluokitus on laskennallinen työkalu, jota voidaan käyttää apuna saneerauskohteiden priorisoinnissa. SANNI-riskiluokituksessa riski on määritelty muodostuvan häiriön todennäköisyydestä, jota kuvaa verkoston kunto, sekä häiriön seurausten laajuudesta ja vakavuudesta, jota kuvaa putken kriittisyysluokka. SANNI-riskiluokitus painottaa saneerauksen näkökulmasta erityisesti verkoston rakenteellista kuntoa ja toiminnallinen kunto on rajattu enimmäkseen kunnossapidon tehtäväksi. SANNI-indekseihin ei ole sisällytetty saneerauksen kustannusten tarkastelua eikä se ota huomioon HSY:n omistaja-kaupunkien kanssa toteutettavien yhteishankkeiden mukanaan tuomia mahdollisuuksia. (Hyttinen, 2017) Tässä työssä on laajennettu saneerausten priorisoinnissa huomioon

otettavia tekijöitä kattamaan riskienhallinnan lisäksi myös kustannusten tarkastelu, joka on usein nostettu esille saneerausten priorisointia käsittelevässä kirjallisuudessa keskeisenä saneerauksen valintaan vaikuttavana tekijänä.

SANNI-riskiluokitus käsittää vesijohdoille sekä jätevesi-, sekavesi- ja hulevesiverkostojen viettoviemäriputkille lasketut kuntoindeksit. Tässä työssä tarkastellaan vesijohtojen ja jätevesiviemärien SANNI-indeksejä. Kehitetyt SANNI-indeksit on riskiperusteisesti määritelty siten, että saneerauskohteiden valinta painottuu kohteisiin, joissa esiintyy paljon häiriöitä ja häiriöiden seuraukset ovat vakavia, jolloin vikojen korjaaminen on hädästä, hankalaa ja kallista. SANNI-indeksissä hyödynnettävät laskentakaavat sekä tekijät, joiden avulla indeksi määräytyy, eivät perustu yleisiin teorioihin vaan projektia toteuttaneet projektiryhmän jäsenet ovat itse määritelleet ne. SANNI-indeksien laskennassa käytetään monimuuttuja-arviointia, jossa indeksin määräävät muuttujat on pisteytetty ja ne lasketaan yhteen siten, että kutakin muuttujaa painotetaan halutulla kertoimella. SANNI-indeksien painokertoimet perustuvat asiantuntija-arvioon, jota usein hyödynnetään monimuuttuja-arvioinnissa määrittelemään, mille tekijöille halutaan tarkastelussa antaa suurin merkitys. (Hytinen, 2017)

Vesijohdon ja jätevesiviemärien SANNI-indeksit perustuvat eri tekijöihin, joilla on vaikutus putken kuntoon. Putkilinjan kriittisyys on yhteinen tekijä molempien johtolajien SANNI-indeksin laskentakaavoissa. Putkilinjan kriittisyydellä tarkoitetaan arviota putken vikaantumisen seurausten vakavuudesta, mutta arviossa ei oteta huomioon häiriön todennäköisyyttä. Vikaantumisen seurausten vakavuutta on arvioitu verkoston toiminnan, ihmisten turvallisuuden ja ympäristön kannalta. Arvio putkilinjan kriittisyydestä perustuu HSY:n kriittisyysluokitukseen, jossa sekä vesijohto- että jätevesiverkosto on jaettu kolmeen kriittisyysluokkaan. Kriittisyysluokka 1 sisältää erittäin kriittiset putket, joiden vikaantumisella on erittäin vakavia seurauksia. Luokkaan 2 kuuluvat putket, jotka ovat melko kriittisiä. Luokan 3 putket eivät ole kriittisiä ja niiden vikaumisesta aiheutuu yleensä vähäisiä ja paikallisia vahinkoja. SANNI-indeksin laskentakaavassa kriittisimmät putket saavat kriittisyyden osalta suurimman pisteytyksen. (Hytinen, 2017)

### 3.2.1 Vesijohdon SANNI-indeksi

Vesijohdon SANNI-indeksi määräytyy seuraavien tekijöiden avulla:

- A. Ennustettu vuototiheys (kpl/km seuraavien 10 vuoden aikana)
- B. Putkessa olleet vuodot v. 2001 alkaen (kpl)
- C. Materiaalin korjaamisen vaikeus (arvo 0,1,2 tai 3)
- D. Putkilinjan kriittisyys (arvo 1,2,3, missä 3 on kriittinen)

Edellä mainitut tekijät lasketaan yhteen vesijohdon SANNI-indeksin laskentakaavan (1) mukaisesti:

$$1 \times (A - 1)^2 + 1 \times B + 2 \times C + 1 \times D \quad (1)$$

Laskentakaavassa ensimmäisenä tekijänä oleva ennustettu vuototiheys perustuu HSY:n omiin vikaraportteihin, joissa vesijohdon vuototiheyteen vaikuttavat putken materiaali ja ikä. Laskentakaavassa esitetty materiaalin korjaamisen vaikeus on tekijä, jonka arvo perustuu HSY:llä laadittuun kokemuseräiseen luokitukseen. Putken kriittisyys perustuu HSY:n laatimaan putkilinjan kriittisyysluokitukseen, jota kuvattiin edellä. Vesijohdon SANNI-indeksin laskemisessa putken kunnan arviointi on tehty hyödyntämällä aikaisempien vuosien vuotoraportteja sekä niiden pohjalta tilastollisesti muodostettuja putkimateriaalien ikääntymisfunktioita. (Hyttinen, 2017)

Materiaalin korjaamisen vaikeus on määritelty luokittelemalla vesijohtomateriaalit neljään luokkaan niiden hajoamistavan ja korjaamisen vaikeuden mukaan. Luokituksen perusteella korkeimpaan luokkaan (3 pistettä) kuuluvat asbesti- ja Sentab-putket, jotka hajoavat erittäin massiivisesti ja niiden korjaamisessa tarvitaan erikoisosia sekä -välineitä. Seuraavissa väliluokissa (1 ja 2 pistettä) ovat harmaavaluraudat (V, GR) ja PVC-muovi, joiden korjaaminen voidaan tehdä tavanomaisilla välineillä vaikka niiden vauriot ovat yleensä melko laaja-alaisia. Loput materiaalit, kuten teräs, SG-valurauta ja PE-muovit kuuluvat helpoimmin korjattavien putkien luokkaan (0 pistettä). Näiden putkimateriaalien vuodot voivat olla esimerkiksi pieniä syöpymävuotoja, joiden korjaaminen onnistuu paineellisesti. Luokittelu on HSY:n sisäinen ja toteutettu SANNI-indeksien laskentaa varten (taulukko 4). (Hyttinen, 2017)

**Taulukko 4.** *Vesijohdon SANNI-indeksin laskentaa varten määritelty materiaalin korjaamisen vaikeus eri materiaaleille, muokattu lähteestä (Hyttinen, 2017)*

Materiaalin korjaamisen vaikeus	Materiaali
3	A, B
2	GR
1	V, PVC
0	muut

Vesijohdon SANNI-indeksi jakaa putket neljään riskiluokkaan (taulukko 5). Taulukossa on esitetty myös kunkin riskiluokan raja-arvot. Putkien luokittelun tarkoituksena on tunnistaa putket, jotka riskienhallinnan näkökulmasta aiheuttavat suurimman riskin verkostojärjestelmän toimivuudelle ja ympäristölle. Luokkien rajat ovat määrättyneet siten, että haluttu osuus verkostosta on saatu kuhunkin luokkaan. (Hyttinen, 2017)

**Taulukko 5.** Vesijohtojen kuntoluokitukseen sisältyvien riskiluokkien luokittelu, muokattu lähteestä (Hyttinen, 2017)

Riskiluokka	Raja-arvot
Matala riski	<3
Kohtalainen riski	3-<6
Melko korkea riski	6-<10
Erittäin korkea riski	väh. 10

### 3.2.2 Jätevesiviemäriin SANNI-indeksi

Jätevesiviemäriin SANNI-indeksi perustuu viemäreiden kuntotutkimustietoon, jota saadaan TV-kuvaamalla. Indeksillä muodostuu kuntotekijöistä, jotka vaikuttavat putken toimintahäiriöiden seurauksiin. SANNI-indeksin tekijänä olevan kuvaustiedon on tarkoitus erotella kuvatut putket kuvaamattomista, jotta viimeksi mainittuja putkia ei tiedon puutteen takia luokitella hyväkuntoisiksi. (Hyttinen, 2017)

Jätevesiviemäriin SANNI-indeksi määräytyy seuraavien tekijöiden avulla:

- A. Rakenteellinen kunto
- B. Toiminnallinen kunto
- C. Vuotavuus
- D. Putken materiaali
- E. Putkilinjan kriittisyys
- F. TV-kuvaus puuttuu

Näiden tekijöiden havaintojen arvot lasketaan yhteen ilman painotuksia. Jätevesiviemäriin laskentakaava (2) on esitetty alla:

$$\sum A_i + \sum B_i + \sum C_i + D + E + F \quad (2)$$

Jätevesiviemäriin SANNI-indeksi laskettiin kokonaan HSY:llä käytössä olevan verkko-tietojärjestelmän eli TrimbleNIS:n eri toiminnallisuuksia hyödyntäen. (Hyttinen, 2017)

Jätevesiviemäriin vesijohtojen tapaan luokitellaan SANNI-indeksillä neljään riskiluokkaan. Riskiluokkien ulkopuolelle jää ryhmä viemäreitä (Ei tutkimustietoa), joista ei ole olemassa kuvaustietoa. Riskiluokkien luokittelu, niiden raja-arvot sekä kuvaus riskiluokkaan kuuluvista putkista on esitetty taulukossa 6. Jätevesiviemäriin riskiluokkien raja-arvot on määritelty niin, että vakavimpaan luokkaan päätyvät erittäin kriittiset putket, jotka ovat melko huonokuntoisia, sekä vähemmän kriittiset putket, joissa on jokin erittäin paha rakenteellinen vika. Luokkien raja-arvojen määrittely ei ole mielivaltaisen, kuten vesijohdoilla, vaan se perustuu putken kriittisyyteen ja vian vakavuuteen. (Hyttinen, 2017)

**Taulukko 6.** *Jätevesiviemärien kuntoluokitukseen sisältyvien riskiluokkien luokittelu*

<b>Riskiluokka</b>	<b>Raja-arvot</b>	<b>Kuvaus</b>
Matala riski	<3	Putken kunto hyvä, ei kovin kriittinen
Kohtalainen riski	3-<5	Kriittinen putki, kunto melko hyvä
Melko korkea riski	5-<8	Putkessa kohtalaisia vikoja
Erittäin korkea riski	väh. 8	Putkessa vakavia vikoja tai erittäin kriittinen putki, jossa kohtalainen tai pahempi vika

SANNI-indeksi kykenee tunnistamaan kunnoltaan vaihtelevia ja erilaisen riskin aiheuttavia putkia toisistaan. Kuitenkin erityisesti vesijohtojen osalta indeksin käyttämissä lähtötiedoissa voi olla puutteita, mikä voi aiheuttaa epävarmuuksia SANNI-indeksin tuottamaan arvoon. (Hyttinen, 2017)

### **3.3 Saneerausten priorisointi kehitetyllä menetelmällä**

HSY:llä on käytössä saneeraustarpeen arvioimista varten niin sanottu Pitkälista, jonne kerätään mahdollisesti saneerausta vaativia verkostokohteita. Pitkällelistalle valitaan putkimestarien havaintojen perusteella kohteita, joissa on muun toiminnan yhteydessä huomattu ongelmia. Kohteiden valikoituminen listalle on kuitenkin melko satunnaista, sillä valinnassa ei järjestelmällisesti hyödynnetä verkkotietoaineistoa ja verkoston kuntotutkimuksia. (Hyttinen, 2017) Osalle Pitkälistan kohteista tehdään saneeraustarvearvio ja saneerausta tarvitsevat kohteet siirretään toteutus- ja yleissuunnitteluun. Tähän mennessä toteutettavien saneerauskohteiden priorisointi on hoidettu osittain asiantuntijan kokemukseen pohjautuvaan arvioon perustuen, mutta priorisoinnissa on hyödynnetty myös tunnuslukuja (Hyttinen, 2017). Pitkälista on tällä hetkellä ainoa työkalu saneerausten priorisointiin HSY:llä, sillä SANNI-riskiluokitusta ei ole otettu laajamittaisesti käyttöön saneeraustarvetta arvioitaessa. HSY:n tavoitteena on tulevaisuudessa pyrkiä eroon Pitkällelistasta ja kehittää saneerauksen priorisointia siten, että priorisointia voitaisiin toteuttaa jollakin nykyaikaisemmalla työkalulla.

Tässä työssä Pitkällelistaa hyödynnettiin saneerauskohteiden valinnassa, jotta toteutuneita saneerauksia voitaisiin tarkastella niiden kannattavuuden näkökulmasta. Saneerausten priorisointia pyrittiin kehittämään toteutuneita saneerauksia tarkastelemalla, sillä tällaista tarkastelua ei ole vielä olemassa ja se helpottaa mahdollisesti tulevien saneerauskohteiden priorisointia ja tarvittavan työkalun kehittämistä saneerauksen priorisointia varten. Tässä työssä on kehitetty eräänlainen saneerausten priorisoinnin seurantatyökalu ja selvitetty saneerausten priorisoinnin kehitystarpeita, jotta tulevaisuudessa saneeraussuunnittelua olisi mahdollista toteuttaa HSY:llä. Saneerauskohteiden valinnassa tarkasteluun ei sisällytetty saneeraamatta jätettyjä kohteita, jotka oli katsottu liian kalliiksi tai riskialttiiksi toteuttaa. Nämä kohteet rajattiin tutkimuksen ulkopuolelle, koska suunniteltuja kustannuksia ei ollut saatavilla riittävän kattavasti.

Saneerausten priorisoinnissa käytettävän työkalun kehittäminen sisälsi neljä päätyövaihetta, jotka olivat:

1. Saneerauskohteiden valinta
2. Kustannustietojen kerääminen saneerauskohteista
3. Tietojen käsittely
4. Tulosten esittäminen

Työn ensimmäisessä vaiheessa viime vuosina toteutuneita (v. 2013-2017) saneerauskohteita valittiin Pitkältälistalta kolmesta ryhmästä, jotka olivat 1) jakeluvesijohdot ja keräilyviemärit, 2) päävesijohdot ja 3) pääviemärit. Nämä kolme ryhmää valikoituivat mukaan siksi, että ne koskevat verkostosaneerauksia ja ne ovat HSY:n investointien kustannusten seurantajärjestelmässä (FPM) jaoteltu omiksi kustannuskoreikseen, joilla on omat budjettinsa (Hyttinen, 2017). Rajauksen ulkopuolelle jäivät esimerkiksi tunnelisaneeraukset, jotka eivät ole varsinaisia putkisaneerauksia eikä niille ole mahdollista laskea SANNI-indeksiä sekä viemärisujutuspaketit, joista ei ollut riittävästi tietoa saatavilla.

Pitkällelistalle päätyvät vesijohdot ja jätevesiviemärit halutaan suunnitella kokonaisuutena, jolloin voidaan esimerkiksi samaan aikaan saneerata toinenkin putkilaji, mikäli se on kokonaisuuden kannalta järkevää esimerkiksi kustannuksien tai häiriöiden minimoimisen näkökulmasta. Usein Pitkällelistalle päätyvissä kohteissa vesijohto ja jätevesiviemäri sijaitsevat samassa kaivannossa. Jätevesiviemärikohteet, joiden vieressä ei ole huonokuntoista vesijohtoa, päätyvät sujutettavien kohteiden listalle, mikäli niiden viat on sujuttamalla mahdollista korjata. On kuitenkin mahdollista, että Pitkällelistalla olevia kohteita on saneerattu myös sujuttamalla.

### **3.3.1 Saneerauskohteiden valinta**

Ensimmäisessä työvaiheessa laskettiin vesijohdon lähtötaso-SANNI-indeksi, jonka perusteella riskiluokka määräytyy yksittäiselle putkelle saneerausprojektissa. Lähtötaso-SANNI-indeksi kuvaa putken riskitasoa ennen saneerausta. Vesijohdon SANNI-indeksi on määräävä, sillä työmäärän vähentämiseksi ja kohteiden valinnan helpottamiseksi jäteveden SANNI-indeksiä ei laskettu jakeluvesijohdojen kanssa samassa kohteessa oleville keräilyviemäreille.



Tarkasteltavien saneerauskohteiden valinta kustakin ryhmästä perustui seuraaviin valintakriteereihin:

1. Saneeraus on toteutettu
2. Saneeraukselle on mahdollista löytää kustannustietoja HSY:n järjestelmistä
3. Lähtötaso-SANNI:n arvo ja sitä vastaava riskiluokka
4. Alueita kustakin HSY:n omistajakaupungista
5. Toteutetun saneerauksen saneerattu osuus dokumentoitu HSY:llä käytössä olevaan verkkotietojärjestelmään
6. Esiintynyt vuototiheys
7. Saneerauskohteen selkeys

Valintakriteerien tarkoituksena oli helpottaa saneerauskohteiden valintaa. Tavoitteena oli valita tarkasteluun mahdollisimman edustava otos saneerauskohteita ja saada aikaan sopivaa vaihtelua saneerauskohteiden priorisoinnin tuloksiin valitsemalla erityyppisiä kohteita otokseen. Lisäksi tarkasteltavaksi pyrittiin valitsemaan mahdollisimman selkeitä saneerauskohteita. Alla on tarkemmin kuvattu valintakriteerien vaikutusta saneerauskohteiden valintaan.

Kustannustietojen saatavuus rajasi tarkastelua vuosiin 2013-2017, sillä HSY:llä investointien kustannuksien seuranta varten käytössä olevaan FPM-järjestelmään on kirjattu kustannuksia vuodesta 2012 lähtien. Rajausta on perusteltu myös, koska viime vuosina toteutuneiden projektien tarkastelu antaa ajankohtaisimman kuvan nykyisestä saneerausten priorisoinnista.

Ennen saneerausta lasketun lähtötaso-SANNI-indeksin arvon ja sen mukaan määräytyvän riskiluokan perusteella oli toiveena saada mukaan erityyppisiä kohteita, joiden riskiluokka vaihtelisi erittäin korkeasta riskistä matalaan. Valitsemalla erilaisia kohteita tarkasteluun haluttiin varmistaa se, että myöhemmin toteutuneiden saneerausten priorisoinnissa saataisiin selkeämmin esille eroja eri kohteiden välillä. Käytännössä korkean riskin kohteita ei kuitenkaan ollut saatavilla kovin paljon tarkastelua varten vaan suurimmassa osassa kohteita riskiluokka oli joko kohtalainen tai matala ennen saneerausta.

Saneerauskohteita pyrittiin valitsemaan kaikista HSY:n omistajakaupungeista eli Helsingistä, Vantaalta, Espoosta ja Kauniaisista. Saneerauskohteista muodostetun otoksen haluttiin edustavan kokonaisvaltaisesti HSY:n toimialuetta.

Eri johtolajien putkissa esiintynyt vuototiheys sekä vuotojen määrä yleensä raportoidaan Pitkällelistalle ja se kertoo putken saneerauksen tarpeesta. Vuototiheyden perusteella pyrittiin valitsemaan saneerauskohteita, jotka olivat vuotojen kannalta erilaisia kohteita edustavan otoksen aikaansaamiseksi.

Viimeisenä valintakriteerinä oli saneerauskohteen selkeys. Tähän pyrittiin siitä syystä, että projektin täysin yksilöivää tunnistetietoa, joka olisi sama sekä HSY:llä käytössä olevassa verkkotietojärjestelmässä että kustannustietoja sisältävässä FPM-järjestelmässä ei nykyisin ole olemassa. Tämä on selkeä puute, sillä mikäli näiden kahden järjestelmän tietoja haluttaisiin jatkossa hyödyntää saneerausten priorisoinnissa, järjestelmien välillä tulisi olla selvä linkki, jotta eri saneerauskohteet voidaan varmuudella erottaa toisistaan. Saneerauskohteet tunnistettiin verkkotietojärjestelmässä, TrimbleNIS:ssä, käytetyn Mittauserän nimen/osoitetiedon perusteella sekä tutkimalla suunnitelmakarttoja kohteista. Tämän jälkeen seuraavassa alaluvussa esitellyssä työvaiheessa etsittiin Mittauserän nimen/osoitetiedon avulla investointien kustannusten seurantarjestelmästä (FPM) projektin investointinumero. Saneerauskohteiden valinnassa haluttiin valita mahdollisimman selkeitä kohteita, jotta ei olisi vaaraa sekoittaa esimerkiksi lähekkäin olevia saneerauskohteita. Tämä tavoite pyrittiin varmistamaan siten, että selkeiksi kohteiksi valittiin kohteita, joissa suunniteltu saneerauspituus oli lähellä toteutunutta saneerauspituutta, mikä selvitettiin tutkimalla suunnitelmakarttoja kohteista ja toteutettujen saneerausten laajuutta. Käytännössä suunnitelmat voivat saneerauksen toteutusvaiheessa usein muuttuakin, joten valintaperuste ei kerro saneerauksen onnistumisesta. Kuitenkin kriteerin toisena tarkoituksena oli myös karsia tarkasteluun valittavia kohteita isommasta joukosta vartenotettavia saneerauskohteita.

Kohteiden valinnan yhteydessä toteutettiin kysely verkkotietojärjestelmään dokumentoiduista saneeratuista kohteista vuosina 2013-2017. Kyselyn hakuehdoiksi määriteltiin seuraavat mahdolliset saneeraustavat: saneerattu pinnoittamalla, saneerattu sujuttamalla, saneerattu uusimalla, saneerattu uusimalla eri sijaintiin ja saneerattu vaakaporaamalla. Uudisrakennuskohteet jäivät kyseisen tarkastelun ulkopuolelle. Verkkotietojärjestelmässä tehdyn kyselyn perusteella saatiin automaattisesti järjestelmästä koottu Excel-raportti eri vuosina toteutuneista saneerauksista, joka sisälsi työssä myöhemmin tarvittavia yksityiskohtaisia tietoja eri kohteista (esim. putken tunnus, mittaususerän nimi ja ID, materiaali- ja halkaisijatiedot, asennusvuosi).

Jakeluvesijohtokohteita valittiin yhteensä 15, joista 10:een näistä samoista kohteista kuului myös keräilyviemäreitä (5 kohdetta vain vesijohtosaneerauksia). Päävesijohtokohteita valittiin puolestaan vain kaksi ja pääviemäreitä yksi, sillä Pitkällälistalla tämänkaltaisia toteutettuja kohteita oli vain vähän eikä muita soveltuvia kohteita löytynyt listalta. Syy saneerauskohteiden epäsuhtaiseen määrään liittyy olennaisesti siihen, että jakeluvesijohtoja ja keräilyviemäreitä on määrältään selvästi enemmän kuin päävesijohtoja ja pääviemäreitä. HSY:n toimialueella jakeluvesijohtoja on yhteensä noin 2600 km, keräilyviemäreitä 2450 km, kun taas päävesijohtoja ja pääviemäreitä vastaavasti noin 480 km ja 360 km. Edellä mainitut keräilyviemäreiden ja pääviemäreiden johtojen määrät sisälsivät sekä jätevesi- että sekavesiviemäreitä. Muitakin vaikuttavia tekijöitä voi tosin olla päävesijohtojen ja pääviemäreiden pienempään saneerausmäärään, kuten esimerkiksi se, että ne ovat monesti kalliimpia toteuttaa kuin jakeluvesijohtojen ja keräily-

viemäreiden saneeraukset. Muista kuin Pitkänlistan kohteista on huonommin raportoitua tietoa esimerkiksi SANNI-indeksin laskentaa varten.

### 3.3.2 Saneerauskohteiden kustannustiedot

Työn toisessa vaiheessa tarkasteluun valituista saneerauskohteista pyydettiin HSY:n talousosastolta kustannustietoja. Mittauserän/osoitetiedon perusteella tunnistettiin kohteet, ja kohteiden investointinumeron avulla etsittiin kohteiden toteutuneita kustannustietoja investointien kustannusten seurantaan tarkoitettusta FPM-järjestelmästä, joka mahdollistaa muun muassa toteutuneiden kustannusten tarkastelun eri tasoilla. Tämän vaiheen tuloksena saatiin seuraavat tiedot kustannuksista:

1. Saneerauskohteen kokonaiskustannukset
2. Projektin kustannuserittely toimintotunnisteiden avulla: suunnittelu, valvonta, rakentaminen, materiaalit ja muut kustannukset
3. Toteutuneiden saneerauskustannusten muodostumisvuodet

Toteutuneita kustannuksia on voinut muodostua saneerauksen toteutuksen eri vaiheissa, joten projektin kustannukset voivat usein jakautua useallekin vuodelle. Jakeluvesijohdoille ja keräilyviemäreille kustannukset olivat saatavissa kullekin johtolajille erikseen.

HSY:n omistajakaupunkien kanssa toteutettavilla yhteishankkeilla tarkoitetaan kaupunkien kadunrakennushankkeiden yhteydessä tehtäviä saneerauksia. Tässä työssä tehdyn alustavan kustannustietojen tarkastelun perusteella tällaiset kohteet päädyttiin jättämään tarkasteltavien saneerauskohteiden ulkopuolelle. Näin meneteltiin siitä syystä, että tämänkaltaisissa projekteissa muodostuneet kustannukset on kirjattu usein useamman saneerauskohteen koontilaskuina. Kustannuserittely saneerauksen toteutuksessa muodostuvien eri toimintojen kesken olisi ollut hankalampaa selvittää kuin projekteissa, joissa kaikki kustannukset ovat kohdennettu samalle projektille. Kustannuserittely olisi vaatinut sitä, että laskuja käsiteltiltä HSY:n henkilökuntaan kuuluvilta eri henkilöiltä olisi yksittäisten laskujen osalta kysytty tarkempia tietoja koontilaskuissa esiintyvistä kustannuksista, sillä laskuista ei kaikki tarpeelliset tiedot ole aina saatavissa. Tällainen menettely olisi ollut liian työläs eikä se olisi ollut helposti toistettavissa, mikäli menetelmää halutaan jatkossa hyödyntää. Tulevaisuudessa, mikäli tällaisten kohteiden kustannuksia haluttaisiin tarkastella, olisi tarpeen kehittää kustannusten raportointi- ja kirjaustapoja.

### 3.3.3 Tietojen käsittely

Kolmannessa työvaiheessa käsiteltiin kerättyä tietoa. Kustannustiedot koottiin Excel-taulukoon ja kunkin kohteen saneerauskustannuksia sekä eri kustannuslajien osuuksia kokonaiskustannuksista havainnollistettiin erilaisin taulukoin. Tällä tavoin pyrittiin myös havaitsemaan mahdollisia virhelähteitä ja poikkeuksia kustannustiedoissa.

Valittujen projektien materiaali- ja halkaisijatiedot sekä projekteissa toteutuneet saneeratut 2d- ja 3d-pituudet saatiin verkkotietojärjestelmästä koottuihin Excel-raportteihin kirjattuna. 2d-pituuden laskeminen tehtiin raportissa esiintyvien tietojen avulla itse. Toteutettujen saneerausprojektien saneeratuille putkille laskettiin kaikkien yhdenmukaisten materiaali- ja halkaisijatyyppejen toteutunut pituus sekä projektissa toteutunut saneerauspituus kullekin johtolajille. 3d-pituudet ottavat putken kaltevuuden huomioon, joten korkotiedot ovat olennaisia 3d-pituuden laskemisessa. Toteutuneiden saneerauspituuksien laskennassa käytettiin 2d-pituuksia 3d-pituuksien sijaan siitä syystä, että HSY:n verkkotietojärjestelmässä monille vesijohdoille ei ole saatavilla riittävän kattavasti korkotietoja. Näin ollen 3d-pituuksien laskeminen ei perustu tarpeeksi luotettaviin lähtötietoihin.

Materiaali- ja halkaisijatietoja sekä toteutunutta saneerauspituutta tarvittiin saneerausten priorisoinnin lähtötietoina. Materiaali- ja halkaisijatietoja käytettiin myöhemmin toteutuneilla saneerauspituuksilla painotetun keskimääräisen halkaisijan laskemiseen, joka oli sama kunkin projektin putkille. Lisäksi toteutunutta saneerauspituutta kullekin projektille tarvittiin myöhemmin projektin yksikkökustannuksen laskemiseen. Saneerauskohteen yksikkökustannus on laskettu kullekin johtolajille erikseen siten, että saneerauskohteen kokonaiskustannukset kyseessä olevalle johtolajille on jaettu kohteen johtolajin saneeratulla kokonaisputkipituudella. Kokonaisputkipituus saadaan laskettua kohteen saneerattujen putkien pituuksien summana.

Tässä työvaiheessa haluttiin varmistaa myös verkkotietojärjestelmästä automaattisesti tulostetun raportin tietojen oikeellisuus. Tieto on tärkeä, jos kootun Excel-raportin tietoja halutaan jatkossa hyödyntää saneerausten priorisoinnissa. Tietojen tarkistaminen suoritettiin käymällä putken tunnuksen perusteella manuaalisesti läpi, että kaikki automaattisesti Excel-raportista löytyvät putken osat, jotka muodostavat tietynkokoiset laajemat yhdenmukaiset putkiosuudet, löytyivät verkkotietojärjestelmän kartalta. Lisäksi tarkastettiin, että kunkin projektin yhteenlaskettu saneerauspituus vastasi Excel-raporttiin dokumentoitujen saneerattujen putken osien pituuksien summaa sekä verkkotietojärjestelmän mahdollistamalla automaattisemmalla putken pituuden laskemiseen tarkoitettulla toiminnolla saatavaa yhteispituutta. Myös saneerauksista tietoa sisältävän kootun Excel-raportin jokaiselle yksittäiselle putken osalle raportoimat 2d- ja 3d-pituudet täsmäsivät verkkotietojärjestelmästä suoraan luettuihin arvoihin. Näin ollen havaittiin siis, että kaikki saneeratut putkenosat löytyivät Excel-raportista ja ne oli dokumentoitu myös kartalle. Myös raportin tulostamat 2d- ja 3d-pituudet vastasivat verkkotietojärjestelmään dokumentoituja arvoja, mikä onkin toivottavaa, sillä Excel-raportti tulostetaan verkkotietojärjestelmästä. Näin ollen havaittiin, että automatisoitu koottu raportointi toimi hyvin eikä tietoa kadonnut matkan varrella.

Tämän jälkeen koottiin yhteenvedotaulukko kaikista saneerausprojektiin liittyvistä tiedoista. Taulukosta löytyvät seuraavat tiedot:

1. Kohteen nimi
2. Johtolaji
3. Kohteen investointinumero
4. Saneerauksen kokonaiskustannukset
5. Toteutuneiden saneerauskustannusten muodostumisvuodet
6. Kustannukset kustannuslajeittain
7. Saneeratun putken materiaali- ja halkaisijatiedot
8. Toteutuneilla saneerauspituuksilla painotettu keskimääräinen halkaisija
9. Toteutunut saneerauspituus 2d-pituutena
10. Esiintynyt vuototiheys
11. Lähtötaso- ja lopputaso-SANNI-indeksi VJ ja JV ja niitä vastaavat riskiluokat
12. Saneerauksella saavutettava parannus SANNI-indeksissä
13. Saneerauksen yksikkökustannus

Laskennassa käytetty lähtötaso- tai lopputaso-SANNI-indeksi useammalle kuin kunkin johtolajin yhdelle putkelle on saatu suunniteltujen saneerauspituuksien painotettuna keskiarvona. Näin on menetelty siitä syystä, että suunniteltujen saneerattujen putkien määrä ei aina tarkalleen vastaa todellisten saneerattujen putkien määrää, mutta SANNI-indeksi lasketaan yksittäiselle putkelle, joten suunniteltujen putkien ja todellisuudessa saneerattujen putkien SANNI-indeksit täytyy siis saada yhteismitallisiksi.

### **3.3.4 Tulosten esittäminen**

Työn tuloksia on havainnollistettu Excel-tilukkolaskentaohjelman PowerView-työkalulla, jonka avulla voidaan tarkastella, ovatko toteutuneet saneeraukset olleet kannattavia saneerausten priorisoinnin näkökulmasta. PowerView-työkalun tuottamien raporttien avulla voidaan vertailla saneerauksen hyötyjä ja kustannuksia kohteittain ja havaita poikkeavat saneerauskohteet, jotka vaativat tarkempaa tarkastelua.

## 4. TULOKSET

Tässä luvussa 4 käsitellään saneerausprojektien kokonaiskustannuksia johtolajeittain (luku 4.1), esitetään saneerauskustannukset muodostavien kustannuslajien osuudet kokonaiskustannuksista eri johtolajeille (luku 4.2) sekä tarkastellaan SANNI-indeksejä (luku 4.3). Esitettyjen lähtötietojen luotettavuutta pyritään myös arvioimaan. Lisäksi luvussa käsitellään saneerausten priorisointia varten kehitetyllä työkalulla saatuja tuloksia (luku 4.4). Saneerausten priorisointi on tehty toteutuneille saneerausprojekteille eli kehitetty työkalu on eräänlainen saneerausten priorisoinnin seurantatyökalu. Jatkossa on mahdollista kehittää tarkastelua koskemaan myös tulevia saneerausprojekteja.

### 4.1 Saneerausten kokonaiskustannusten tarkastelu

Tässä luvussa tarkastellaan valittujen saneerauskohteiden kokonaiskustannuksia. Saneerauskohteiden priorisointia varten hankittiin HSY:n talousosastolta kustannustietoja HSY:llä vuosina 2013-2017 toteutetuista saneerauksista. Valituista saneerauskohteista 15 koski jakeluvesijohtoja, joista 10:een kohteeseen kuului myös keräilyviemäreitä, jotka sisällytettiin myös tarkasteluun. Jakeluvesijohtokohteista viisi sisälsi vain jakeluvesijohtojen saneerauksen. Lisäksi tarkasteluun valikoitui kaksi päävesijohtojen saneerausta ja yksi pääviemärien saneeraus. Päävesijohtojen ja pääviemärien saneerauksia oli toteutettu HSY:llä tarkasteltuina vuosina selvästi vähemmän kuin jakeluvesijohtojen ja keräilyviemärien saneerauksia, sillä päävesijohtojen ja pääviemäreiden osuus verkoston kokonaispituudesta on merkittävästi pienempi. Lisäksi päävesijohtojen ja pääviemäreiden saneeraukset ovat myös tyypillisesti kalliimpia toteuttaa kuin jakeluvesijohtojen ja keräilyviemärien saneeraukset. Näin ollen näistä johtolajeista löytyi vain muutama so-piva kohde tarkastelua varten.

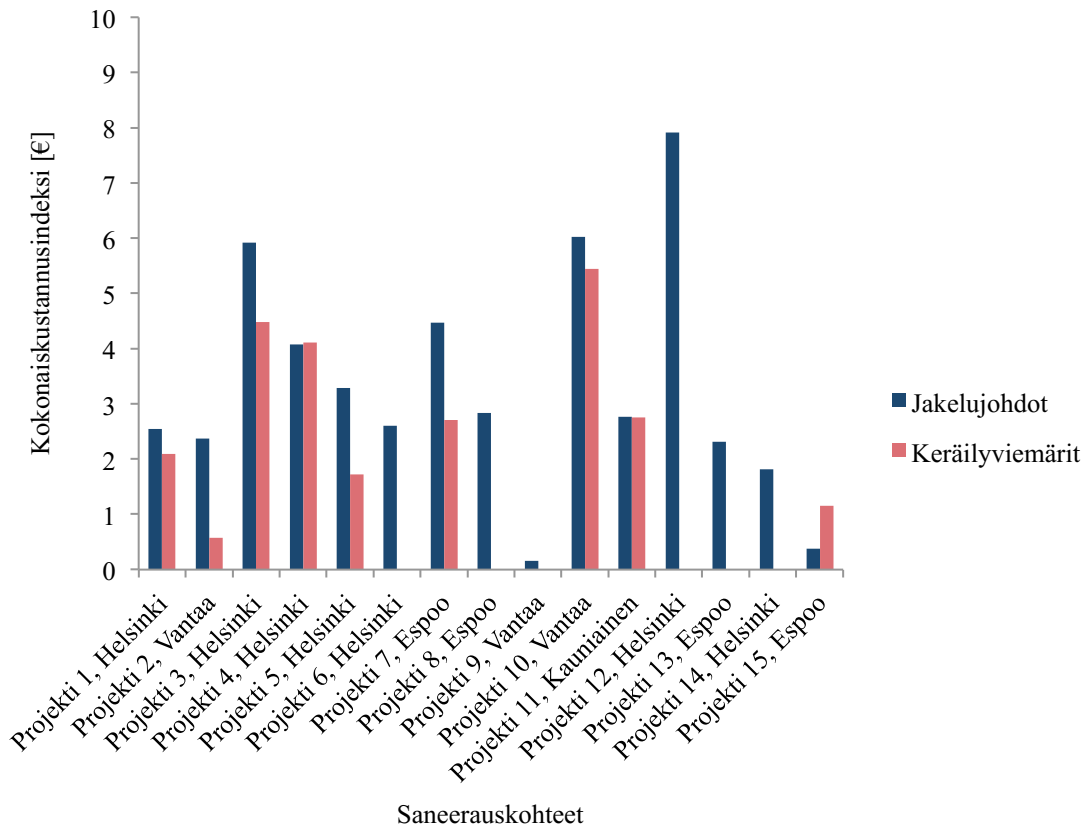
Saneerauskohteet on nimetty jakeluvesijohdoille seuraavasti: Projekti 1, Projekti 2,..., Projekti 15. Projekteista on tämän luvun kuvissa ja taulukoissa yleensä ilmoitettu myös HSY:n omistajakaupunki, jossa saneeraus on toteutettu. Samassa projektissa jakeluvesijohdon kanssa saneerattu keräilyviemärikohte on nimetty jakeluvesijohtokohteen mukaan samalla numerolla. Myös päävesijohtojen ja pääviemäreiden saneeraukset on numeroitu ja niistä on esitetty vastaavat tiedot kuin jakeluvesijohdoista ja keräilyviemäreistä. Taulukossa 7 on esitetty saneerauskohteessa saneeratut johtolajit ja kohteiden numerointi.

**Taulukko 7.** Luettelo eri johtolajien saneerauskohteista

Saneerauskohteet	Jakeluvesijohto	Keräilyviemäri	Päävesijohto	Pääviemäri
Projekti 1, Helsinki	x	x		
Projekti 2, Vantaa	x	x		
Projekti 3, Helsinki	x	x		
Projekti 4, Helsinki	x	x		
Projekti 5, Helsinki	x	x		
Projekti 6, Helsinki	x			
Projekti 7, Espoo	x	x		
Projekti 8, Espoo	x			
Projekti 9, Vantaa	x	x		
Projekti 10, Vantaa	x	x		
Projekti 11, Kauniainen	x	x		
Projekti 12, Helsinki	x			
Projekti 13, Espoo	x			
Projekti 14, Helsinki	x			
Projekti 15, Espoo	x	x		
Projekti 16, Helsinki			x	
Projekti 17, Helsinki			x	
Projekti 18, Espoo				x

Saneerauskohteiden kustannustiedot sisälsivät kunkin projektin saneerauksen kokonaiskustannukset. Kokonaiskustannukset kertovat osaltaan saneerausprojektin kokoluokasta. Kuitenkin saneerausprojekteja voidaan paremmin vertailla vasta, kun saneerauskohteen kokonaiskustannukset jaetaan toteutetulla saneerauspituudella, jolloin saadaan saneerauskohteen yksikkökustannukset yksikössä €/m. Yksikkökustannus on suurena kokonaiskustannuksia vertailukelpoisempi, mutta silti esimerkiksi eri johtolajien välillä voi esiintyä eroja saneerauskustannusten kustannusrakenteessa. Yksikkökustannuksen lisäksi saneerausten priorisoinnissa on hyvä käyttää toista suuretta, joka kuvaa saneerauksella saavutettavaa hyötyä.

Kuvassa 5 on esitetty valittujen jakeluvesijohtojen ja keräilyviemärien saneerausten kokonaiskustannukset kohteittain kokonaiskustannusindeksin avulla. Kokonaiskustannusindeksi on verrannollinen saneerauskohteiden kokonaiskustannuksiin (tarkkaa kaavaa ei esitetä, koska kustannustiedot ovat luottamuksellisia). Kokonaiskustannusindeksin yksikkö on €, sillä indeksi on vain skaalattu valitulla kertoimella. Kohteiden saneerauskustannukset vaihtelevat eli kohteiden kokoluokassa on eroja (kuva 5). Niissä kymmenessä saneerauskohteessa, joissa on saneerattu sekä jakeluvesijohto että keräilyviemäri, on jakeluvesijohdon saneeraaminen ollut keskimäärin 28 prosenttia kalliimpaa kuin keräilyviemäriin. Eroa voi osaltaan myös selittää puutteet projektin kustannusten tiliöinneissä, jolloin on mahdollista, että joissakin tapauksissa keräilyviemäriin saneerauksesta muodostuvia kustannuksia on tiliöity vesijohdon saneerauskustannuksiksi tai toisinpäin. Samassa kaivannossa sijaitsevien vesijohdon ja keräilyviemäriin saneerausten kustannuksia voi olla vaikeaa kohdentaa tarkasti kullekin johtolajille.



**Kuva 5.** *Jakeluvesijohtojen ja keräilyviemärien saneerausten kokonaiskustannukset kohteittain*

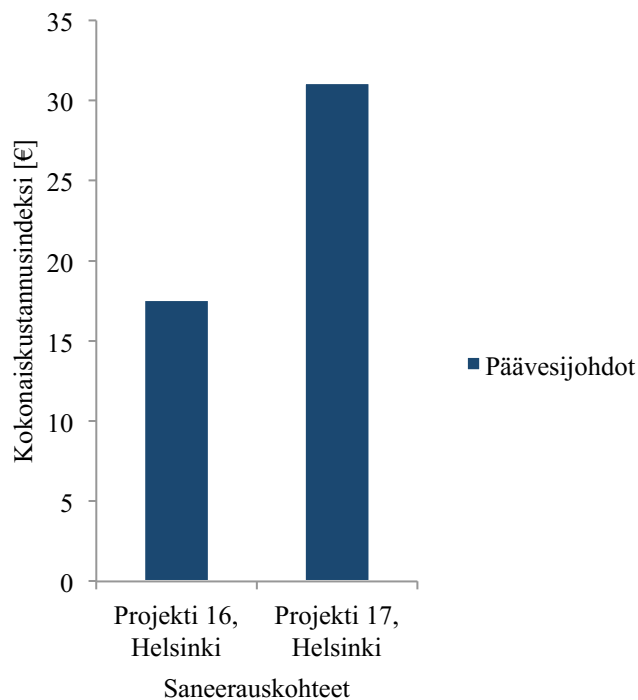
Jakeluvesijohtojen saneerauskustannukset eri kohteissa vaihtelevat kokonaiskustannusindeksien arvojen 0-8 välillä. Tarkastelluista kohteista kallein jakeluvesijohdon saneeraus on ollut Projekt 12, Helsingissä, joka on valmistunut vuonna 2016. Projektin 12 saneerauksen kokonaiskustannusindeksi on 7,9. Edullisin tarkastelluista jakeluvesijohdokohteista on ollut Projekt 9, Vantaalla, joka on valmistunut vuonna 2016. Projektin 9 jakeluvesijohdon saneerauksen kokonaiskustannusindeksi on 0,2. Projektin 9 kohdalla on kuitenkin havaittavissa puutteita kohteen saneerauskustannusten tiliöinneissä, sillä kohteen kustannukset muodostuvat sekä vesijohdon että jätevesiviemärien osalta pelkästään suunnittelukustannuksista. Yleensä saneerauskohteista tiliöidään kustannuksia suunnittelun lisäksi valvonnan, rakentamisen, materiaalien ja muiden kustannuksien osalta. Kaikista jakeluvesijohtojen saneerauksista, joita on yhteensä 15, kuuden kohteen kokonaiskustannukset ovat korkeammat kuin jakeluvesijohdokohteiden kokonaiskustannukset keskimäärin.

Keräilyviemärien saneerauskustannukset vaihtelevat siten, että kokonaiskustannusindeksi on välillä 0–6. Kallein keräilyviemärien saneeraus on ollut vuonna 2016 valmistunut Projekt 10, Vantaalla, jonka saneerauksen kokonaiskustannusindeksi on 6,0. Edullisin tarkastelluista keräilyviemärien saneerauksista on Projekt 9, Vantaalla, jonka kokonaiskustannusindeksi on 0,01. Kuten edellä jo mainittiin Projektin 9 osalta, keräily-

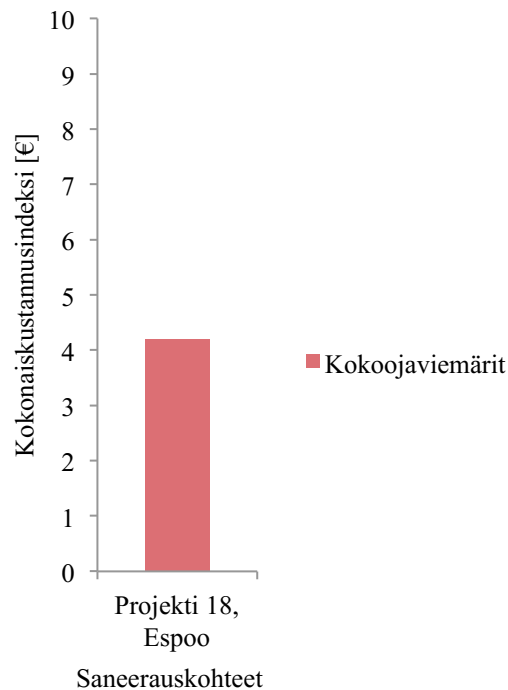


viemärille on tiliöity jakeluvesijohdon tapaan vain suunnittelukustannuksia, joten tiliöinnissä on puutteita myös keräilyviemäriin osalta. Kaikkien keräilyviemärien saneerauskohteista, joita on yhteensä 10, viiden kohteen kokonaiskustannukset ovat keskimääräisiä kokonaiskustannuksia korkeammat.

Päävesijohtojen saneerausten kokonaiskustannusindeksit ovat Projektille 16 (Helsinki) ja Projektille 17 (Helsinki) vastaavasti 17,5 ja 31,1. Kuvassa 6 on esitetty päävesijohtojen saneerausten kokonaiskustannukset molemmille kohteille. Projektin 17 päävesijohdon saneeraus on ollut kustannuksiltaan 77% Projektia 16 kalliimpi. Tarkastellun pääviemäriin saneerauksen kokonaiskustannusindeksi on 4,2. Kuva 7 kuvaa Projektiksi 18 nimetyn pääviemärikohteen saneerausten kokonaiskustannusten suuruutta. Kohteiden pienen lukumäärän vuoksi johtolajeittain tehtävä vertailu päävesijohtojen kesken on suppea ja pääviemärille sitä ei voi tehdä lainkaan.



**Kuva 6.** Päävesijohtojen saneerausten kokonaiskustannukset kohteittain



**Kuva 7.** Pääviemärin saneerauksen kokonaiskustannukset

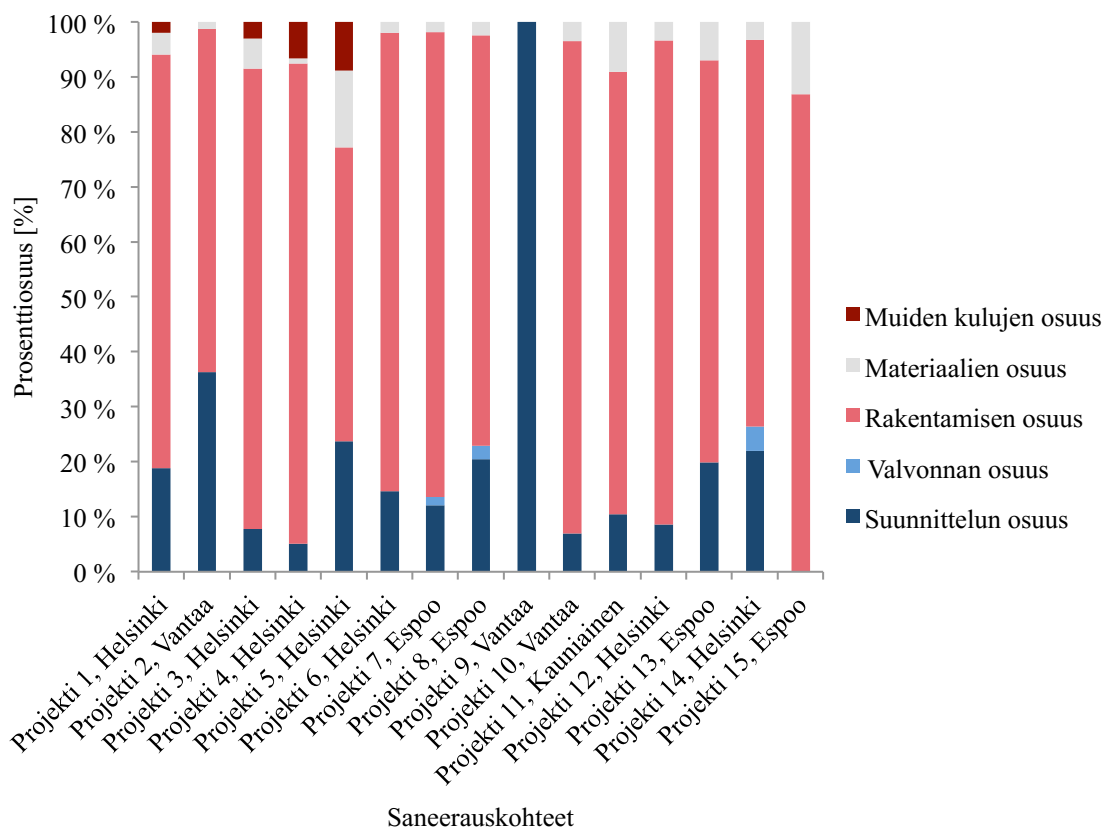
Saneerausten kokonaiskustannusten tarkastelu ei kuitenkaan tuota riittävästi tietoa siitä, kuinka suuri saneerauksella saavutettava hyöty on kustannuksiin nähden. Saneerauksella saavutettavaa hyötyä kuvaamaan on käytetty SANNI-indeksin lähtötason ja lopputason erotusta, jota on myöhemmin verrattu saneerauskohteen yksikkökustannuksiin. Tällä tavoin saneerauskohteita on mahdollista verrata keskenään niiden kannattavuuden näkökulmasta.

## 4.2 Saneerauskustannusten kustannuslajien osuuksien tarkastelu kokonaiskustannuksista

Tässä luvussa tarkastellaan erilaisten saneerauskustannukset muodostavien kustannuslajien osuuksia kokonaiskustannuksista ja arvioidaan kustannustietojen luotettavuutta. Kuvassa 8 on esitetty jakeluvesijohtojen saneerauskustannusten eri kustannuslajien osuudet kokonaiskustannuksista. Kustannuslajeja on viisi eli kohteiden saneerauskustannukset muodostuvat viiden eri toiminnon mukaan, jotka ovat suunnittelu, valvonta, rakentaminen, materiaalit ja muut kustannukset.

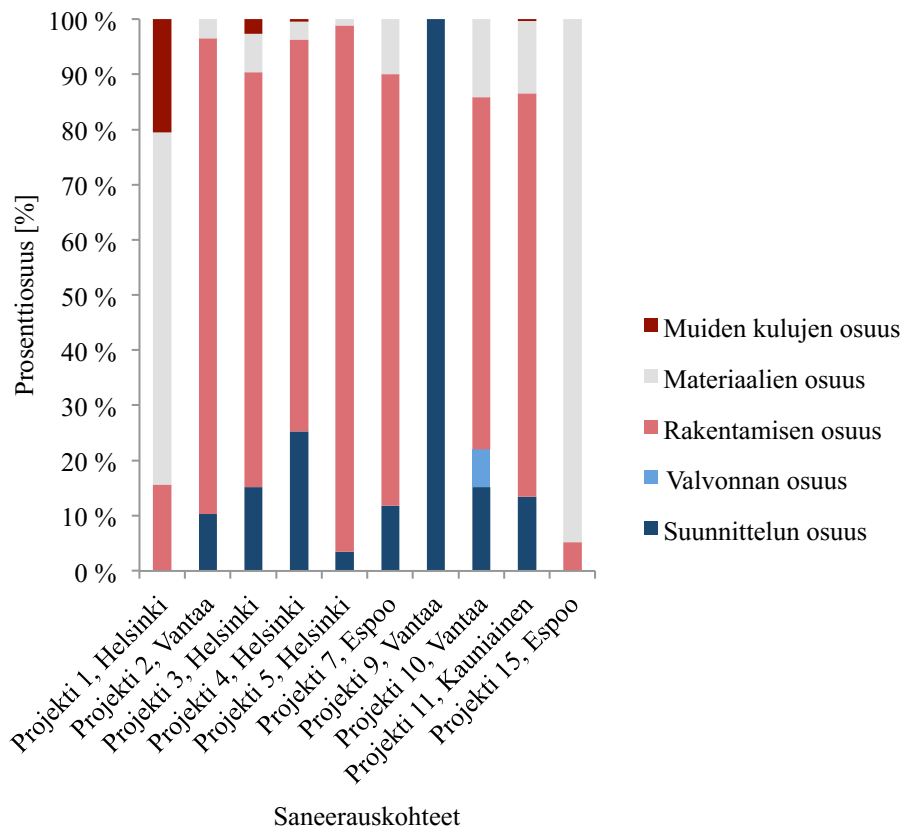
Rakentamisen osuus jakeluvesijohtojen saneerausten kokonaiskustannuksista on eri kustannuslajeista suurin (kuva 8). Silloin, kun jakeluvesijohtojen saneerauksen rakentamisen kustannuksia on kirjattu, sen prosentuaalinen osuus kokonaiskustannuksista vaihtelee 53-90 % välillä. Seuraavaksi suurin kustannuserä on suunnittelu. Suunnittelun kirja-

tut kustannukset jakeluvesijohdoille ovat 5-36 % saneerausten kokonaiskustannuksista. Materiaalikustannukset muodostavat kolmanneksi suurimman kustannuserän. Kirjatut materiaalikustannukset muodostavat 1-14 % suuruisen osuuden kokonaiskustannuksista. Muut kustannukset ovat toiseksi pienin kustannuserä, jonka kirjattujen kustannusten osuudet kokonaiskustannuksista ovat 2-9 %. Valvonnan osuus kokonaiskustannuksista muodostaa kirjattujen kustannusten perusteella pienimmät kustannukset 1,6-4,4 % osuudella. Valvonnasta on kuitenkin jakeluvesijohtokohteiden osalta kirjattu saneerauskustannuksia vain kolmessa 15:stä jakeluvesijohtojen saneerauskohteessa, joten tämän kustannuslajin tiliöinneissä on parantamisen varaa. Kuten edellä on jo mainittu, Projektin 9 jakeluvesijohdon saneerauskustannukset muodostavat poikkeuksen, jossa kaikki saneerauskohteen kustannukset on kirjattu muodostuneen suunnittelusta. Tämä tuskin vastaa todellista tilannetta, jossa epäilemättä saneerauskustannuksia muodostuu muistakin kustannuslajeista. Tästä syystä Projektin 9 kustannustietoja ei voida pitää kovin luotettavina ja myöhemmin toteutettavan priorisoinnin osalta tehty arvio tuskin kovin hyvin vastaa todellisuutta.



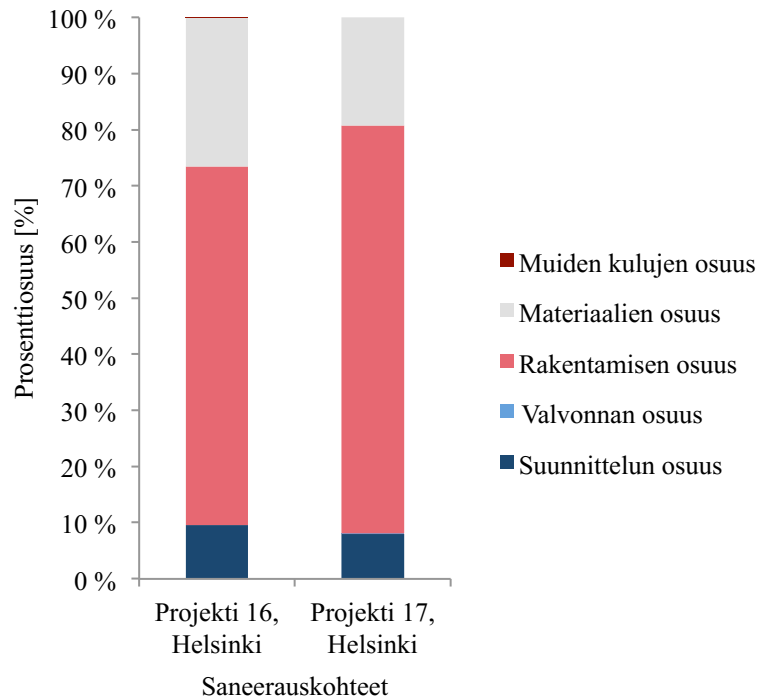
**Kuva 8.** Jakeluvesijohtojen saneerauskustannusten kustannuslajien osuudet kokonaiskustannuksista

Keräilyviemärien saneerauskustannukset muodostavien kustannuslajien osuudet saneerauksen kokonaiskustannuksista on esitetty kuvassa 9. Kuten jakeluvesijohdoilla, keräilyviemärien saneerausten suurimman kustannuserän muodostaa seitsemässä kymmenestä saneerauskohteesta rakentaminen. Kahdessa kohteessa, jotka ovat Projekti 1 ja Projekti 15, materiaalikustannukset ovat muodostaneet eri kustannuslajeista suurimman osuuden kokonaiskustannuksista osuuksien ollessa kohteille 64 % ja 95 % vastaavasti. Muuta huomion arvoista on jälleen Projekti 9, josta edellä on jo mainittu todennäköisesti virheellinen tiliöinti, jossa kaikki kustannukset ovat kirjauksen perusteella suunnittelukustannuksia. Tämän kohteen jakeluvesijohdon tapaan, kustannustiedot tuskin pitävät täysin paikkaansa. Valvonnasta on keräilyviemärien saneerausten osalta kirjattu kustannuksia vain yhdessä kohteessa. Tämän kustannuslajin kustannusten kirjaamiskäytännöt pitäisivät olla järjestelmällisempiä, jotta saneerauskustannukset olisivat luotettavampia ja vastaisivat paremmin todellista tilannetta. Eri kustannuslajien kirjatut osuudet saavat yleensä arvoja seuraavilta vaihteluväleiltä (tarkastelusta poistettu poikkeukset: Projektin 1 ja Projektin 15 materiaalikustannukset ja Projekti 9): suunnittelu 4-25 %, valvonta 7 %, rakentaminen 5-95 %, materiaalit 1-14% ja muut kustannukset 0,4-21 %.



**Kuva 9.** Keräilyviemärien saneerauskustannusten kustannuslajien osuudet kokonaiskustannuksista

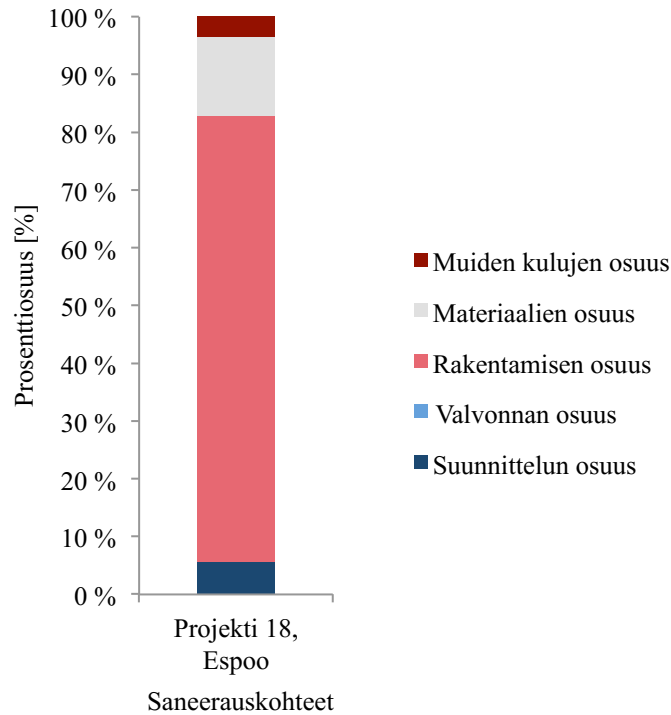
Kahdessa tarkasteluun valitussa päävesijohtojen saneerauksessa rakentaminen on suurin kustannuserä saneerauksen kokonaiskustannuksista. Rakentamisen prosentuaalinen osuus kohteiden kokonaiskustannuksista on Projektille 16 noin 64 % ja Projektille 17 noin 73 %. Seuraavaksi suurimmat kustannuserät ovat materiaalikustannukset 19-27 %, suunnittelukustannukset 8-10 %, valvonta ja muut kustannukset 0-0,1 %. Eri kustannuslajien osuudet kokonaiskustannuksista päävesijohdoille näkyvät kuvassa 10.



**Kuva 10.** Päävesijohtojen saneerauskustannusten kustannuslajien osuudet kokonaiskustannuksista

Tarkastellun pääviemärin (Projekti 18) saneerauskustannukset muodostavien eri kustannuslajien osuudet on esitetty kuvassa 11. Kustannuserien suuruusjärjestys on kutakuinkin samankaltainen kuin päävesijohdoilla eli rakentaminen on suurin kustannuserä (n. 77%), seuraavaksi suurin on materiaalikustannukset (n. 14%), sitten suunnittelun osuus (n. 6%) ja muut kustannukset (n. 4%). Valvonnasta ei ole kirjattu saneerauskustannuksia.

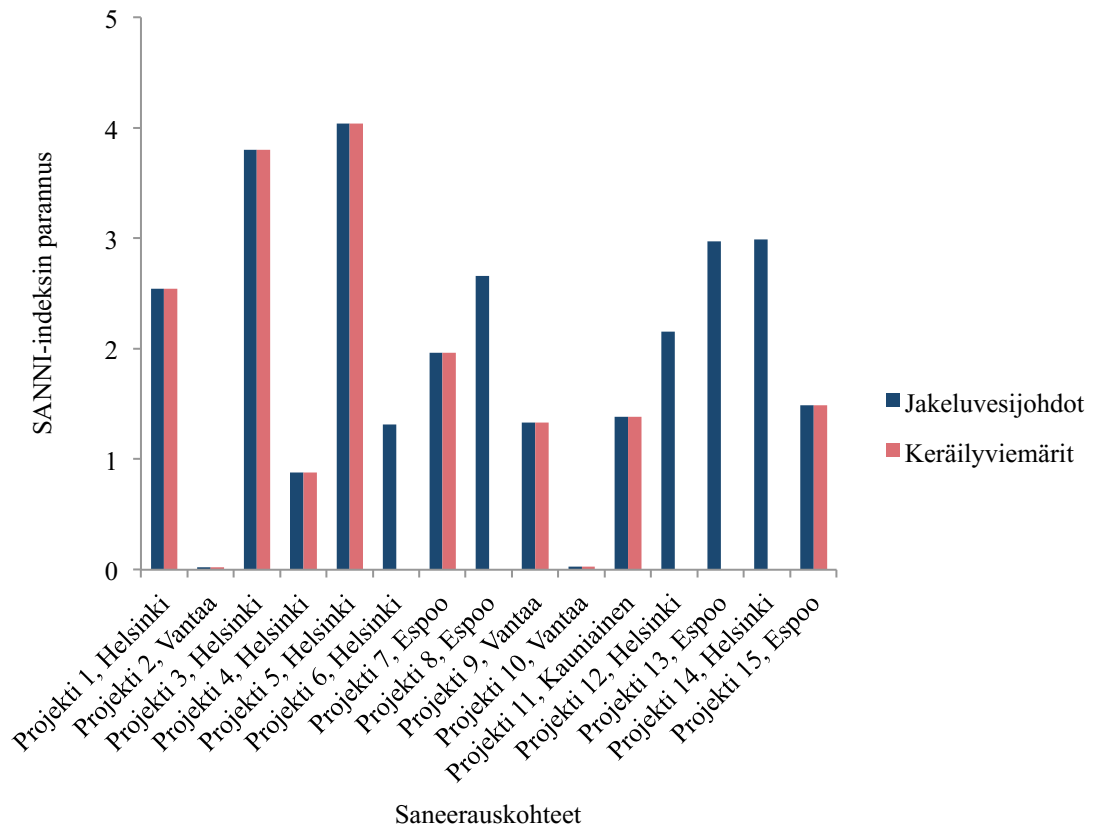
Yhteenvetona tästä tarkastelusta voidaan esittää, että yleensä jakeluvesijohdoilla ja keräilyviemäreillä saneerauskustannukset muodostava kustannusrakenne korkeimmista kustannuksista alkaen on rakentaminen, suunnittelu, materiaalit, muut kustannukset ja valvonta. Päävesijohdoilla ja pääviemäreillä vastaavien kustannuslajien osuuksien suuruusjärjestys on rakentaminen, materiaalit, suunnittelu, muut kustannukset ja valvonta.



**Kuva 11.** Pääviemärin saneerauskustannusten kustannuslajien osuudet kokonaiskustannuksista

### 4.3 SANNI-indeksien tarkastelu

Tässä luvussa 4.3 käsitellään saneerausten priorisoinnissa hyödynnettäviä lähtötaso- ja lopputaso-SANNI-indeksejä sekä niiden avulla laskettuja SANNI-indeksien parannuksia. Lähtötaso- ja lopputaso-SANNI-indeksin arvot kuvaavat putken riskiluokkaa ennen saneerausta ja saneerauksen jälkeen. SANNI-indeksien parannukset kullekin saneerauskohteelle laskettiin lähtötaso- ja lopputaso-SANNI-indeksien erotuksena, joka kuvaa saneerauksella saavutettavaa hyötyä kohteen putkien riskiluokan tyypillisesti parantues- sa saneerauksen myötä. Kuvassa 12 on esitetty SANNI-indeksien parannukset jakelu- vesijohto- ja keräilyviemärikohteille. SANNI-indeksin parannus voi vaihdella huomattavasti eri saneerauskohteissa (kuva 12). SANNI-indeksien parannusten keskiarvo jakeluvesijohdoille on 2,0 ja keräilyviemäreille 1,7. Jakeluvesijohtokohteista keskiarvon yläpuolella on seitsemän ja keräilyviemäreistä neljä kohdetta. Jakeluvesijohtojen ja keräilyviemärien osalta suurimmat SANNI-indeksien parannukset on Projektilla 5 ja pienimmät Projektilla 2. Samassa kohteessa olevien jakeluvesijohdon ja keräilyviemärin saneerausten SANNI-indeksin arvo on samansuuruinen, sillä SANNI-indeksi laskettiin näissä kohteissa vain vesijohdolle, jonka mukaan arvo määräytyy.

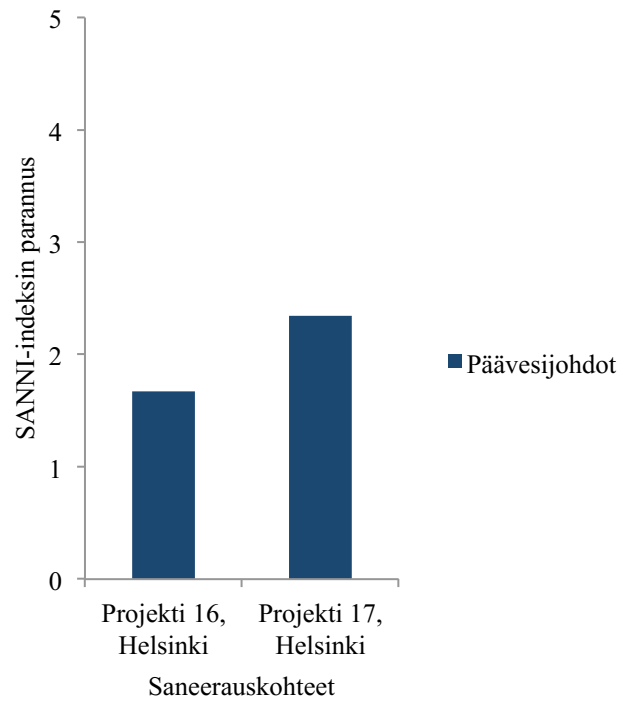


**Kuva 12.** Jakeluvesijohdojen ja keräilyviemärien SANNI-indeksien parannukset kohteittain

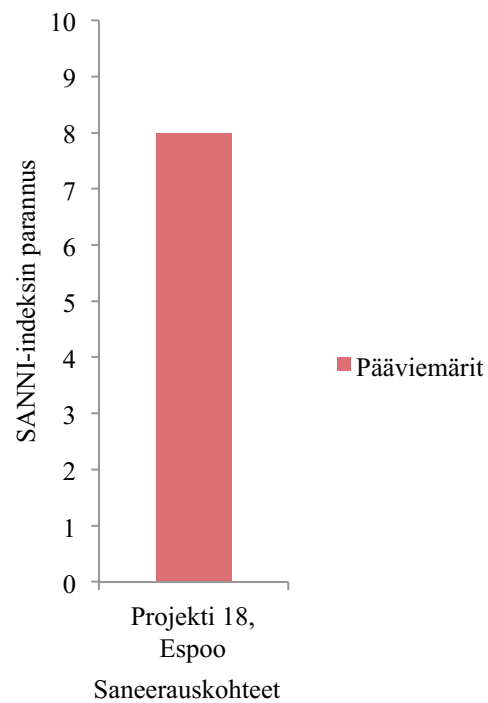
SANNI-indeksien parannukset laskettiin samaan tapaan myös päävesijohdoille. SANNI-parannusten arvot päävesijohdoille on esitetty kuvassa 13. SANNI-indeksien parannukset ovat Projektille 16 ja Projektille 17 vastaavasti 1,7 ja 2,3. SANNI-indeksien parannusten keskiarvo päävesijohdoilla on samaa luokkaa kuin jakeluvesijohdoilla ja keräilyviemäreillä.

Lisäksi laskettiin pääviemärien SANNI-indeksin parannus Projektille 18 (kuva 14). SANNI-indeksin parannus pääviemärielle on 8,0. Arvon perusteella voidaan todeta, että etenkin verrattuna muiden johtolajien SANNI-indeksien parannuksiin sekä niiden keskiarvoihin, pääviemärien saneerauksella saavutettu hyöty on ollut hyvä. Jakeluvesijohdoilla ja keräilyviemäreillä korkein SANNI-indeksin parannus Projektissa 5 on 4,0 eli puolet pienempi kuin pääviemäriellä Projektissa 18.

Päävesijohdojen ja pääviemärien saneerauskohteiden pieni lukumäärä rajoittaa tuloksista muodostettavien johtopäätösten yleistettävyyttä. Näiden kohteiden lukumäärä on liian pieni, jotta asiasta voi muodostaa kokonaiskuvaa. Tarkastelua voisi jatkossa laajentaa suurempaan määrään tarkasteltavia saneerausprojekteja kullekin johtolajille, jotta eroavaisuuksia eri saneerausprojektien ja johtolajien välillä voisi tunnustaa.



**Kuva 13.** Päävesijohtojen SANNI-indeksien parannukset kohteittain



**Kuva 14.** Pääviemäriin SANNI-indeksin parannus

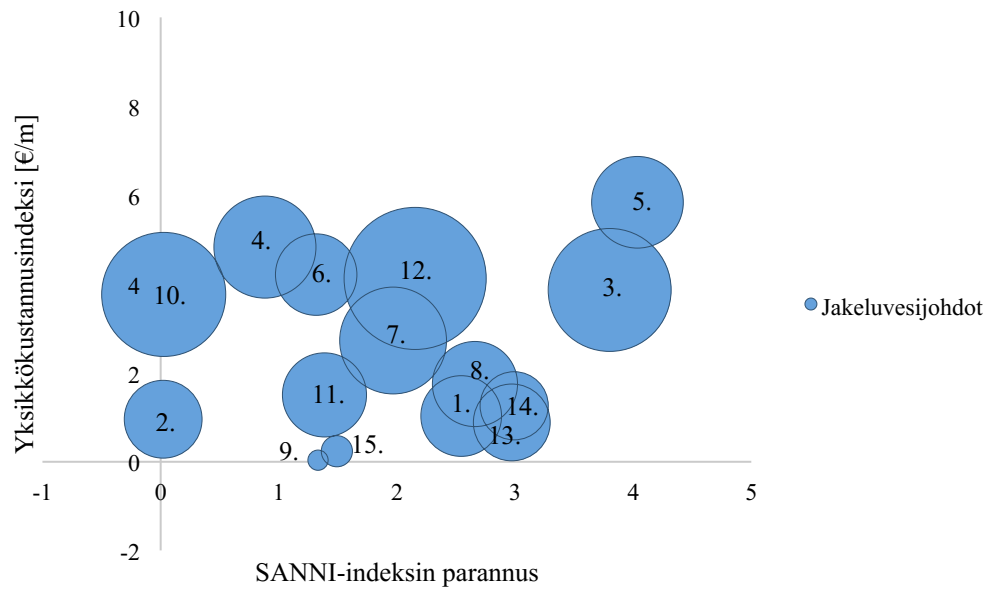


## 4.4 Saneerausten priorisointi

Tämä luku esittelee saneerausten priorisoinnin tuloksia tarkastelluille saneerauskohteille. Tulokset on saatu hyödyntämällä tässä työssä kehitettyä saneerausten priorisoinnin viitekehystä ja toteutuneiden saneerausten seurantatyökalua. Työkalun avulla voidaan arvioida, onko toteutettu saneeraus ollut SANNI-indeksien ja kustannusten perusteella kannattava. Todellisuudessa saneerausten priorisoinnin tavoitteena on kuitenkin arvioida tulevien saneerauskohteiden saneeraustarvetta. Saneerausten priorisoinnin on tarkoitus myös helpottaa saneerauskohteiden valintaa. Saneeraukseen käytettävä vuosittainen budjetti on rajallinen ja yleensä saneerausta tarvitsevia kohteita on enemmän kuin, mitä ehditään vuoden aikana saneerata. Tämän vuoksi saneerauskohteita on tärkeä priorisoida, jotta tärkeimmät ja kiireellisimmät kohteet tulevat ensimmäisenä saneerattavaksi ja samanaikaisesti voidaan saavuttaa suurin hyöty saneerauksesta sekä käyttää saneeraukseen tarkoitettut varat tehokkaasti.

### 4.4.1 Jakeluvesijohdot

Saneerausten priorisointi toteutettiin valituille saneerauskohteille Excelin Power View-työkalun avulla. Kuvassa 15 on jakeluvesijohtojen saneerauskohteet Power View-raporttia vastaavana esityksenä, jossa vaaka-akseli kuvaa SANNI-indeksin parannuksella saavutettua hyötyä ja pystyakselilla on saneerauksen yksikkökustannus yksikkökustannusindeksin perusteella (€/m). Tässä yhteydessä käytettävä yksikkökustannusindeksi on verrannollinen saneerauskohteen yksikkökustannuksiin. Ympyrän koko kuvaa projektin kokonaiskustannuksia. Saneerauksen kannalta otollisimmat saneerauskohteet sijaitsevat kuvan oikeassa alareunassa eli näiden kohteiden SANNI-indeksin parannus on korkea ja niiden yksikkökustannus on matala. Työkalun avulla on mahdollisuus vertailla saneerauksen hyötyjä ja kustannuksia kohteittain ja havaita poikkeavat saneerauskohteet, jotka vaativat tarkempaa tarkastelua.



**Kuva 15.** Kaikki saneeratut jakeluvesijohdot kohteittain

Laskennassa priorisointi toteutettiin jakamalla SANNI-indeksin parannus kohteen yksikkökustannuksella. Tämän jälkeen indeksille asetettiin raja-arvot, joiden perusteella kohteet voidaan luokitella eri luokkiin. Taulukossa 8 on SANNI-indeksin parannuksen ja kohteen saneerauksen yksikkökustannusten perusteella lasketut arvot, joiden avulla saneerausten priorisointi on tehty. Saneerauskohteiden luokittelu hyviin, neutraaleihin ja huonoihin kohteisiin on tehty taulukossa 9 esitettyjen raja-arvojen avulla. Raja-arvot on määritelty siten, että toteutuneiden saneerauskohteiden välille saadaan eroa ja kuhunkin luokkaan saadaan sopiva määrä kohteita. Raja-arvot ovat tapauskohtaisia ja niitä tulee arvioida uudelleen tarpeen mukaan. Jakeluvesijohtojen saneerauskohteista oli luokittelun perusteella hyviä kohteita kuusi, neutraaleja kohteita viisi ja huonoja kohteita neljä kappaletta.

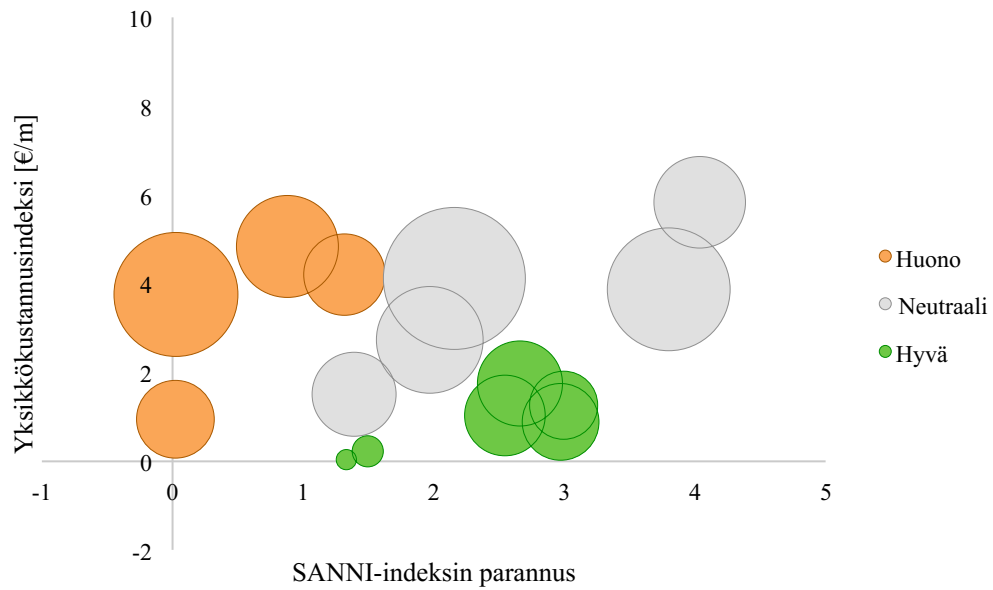
**Taulukko 8.** *Jakeluvesijohtojen saneerausten priorisointi SANNI-indeksin parannuksen ja yksikkökustannusten avulla sekä priorisoinnin tuottamat luokat, joihin saneerauskohteet on jaettu*

Jakeluvesijohdot	SANNI-parannus /yksikkökustannus	Luokka
Projekti 1, Helsinki	4,93	Hyvä
Projekti 2, Vantaa	0,05	Huono
Projekti 3, Helsinki	1,96	Neutraali
Projekti 4, Helsinki	0,37	Huono
Projekti 5, Helsinki	1,38	Neutraali
Projekti 6, Helsinki	0,63	Huono
Projekti 7, Espoo	1,44	Neutraali
Projekti 8, Espoo	3,04	Hyvä
Projekti 9, Vantaa	74,07	Hyvä
Projekti 10, Vantaa	0,01	Huono
Projekti 11, Kauniainen	1,84	Neutraali
Projekti 12, Helsinki	1,05	Neutraali
Projekti 13, Espoo	6,74	Hyvä
Projekti 14, Helsinki	4,76	Hyvä
Projekti 15, Espoo	12,94	Hyvä

**Taulukko 9.** *Saneerauskohteiden priorisoinnissa käytetyt raja-arvot kaikille johtolajeille*

Rajat	Alaraja	Yläraja
Hyvä	3,00	>3,00
Neutraali	1,00	3,00
Huono	0,00	1,00

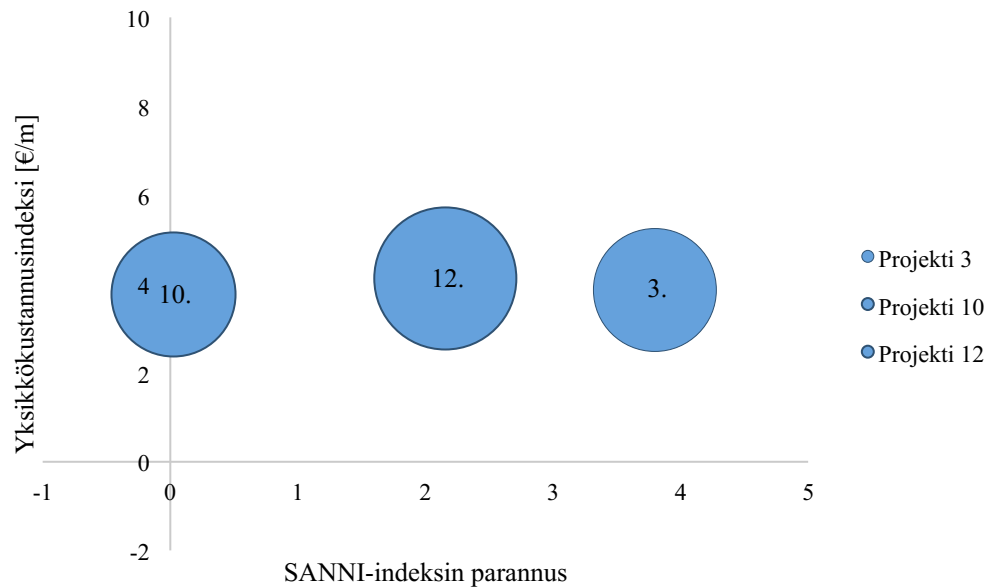
Hyvät, neutraalit ja huonot kohteet tarkoittavat vastaavasti tämän työn kuvissa laskennallisesti kannattavia (merkitty kuvaan vihreällä), kannattamattomia (merkitty kuvaan oranssilla) ja keskinkertaisesti kannattavia (merkitty kuvaan harmaalla) saneerauskohteita (kuvat 16, 19, 23 ja 24). Kuvassa 16 on tämänkaltainen jaottelu jakeluvesijohtojen saneerauskohteille. Keskinkertaisesti kannattavien tapausten kohdalla saneerauskohteita voidaan siirtää kannattavien tai kannattamattomien saneerauskohteiden joukkoon sen mukaan, painotetaanko valinnassa kustannuksia vai SANNI-indeksin parannusta. Tällaisten valintakysymysten edessä saneerausta tarvitsevien kohteiden lukumäärää on voitu rajata PowerView-työkalulla niin, että vaihtoehdoista on mahdollista selvittää muitakin saneerauksen kannalta tärkeitä tekijöitä, jotka voivat helpottaa valintaa saneerauskohteiden priorisoinnin kannalta. Saneerauksella voidaan haluta esimerkiksi parantaa asiakastyytyväisyyttä ja minimoida vuodoista aiheutuvia häiriöitä vedenkäyttäjille, vaikka saneerauksella saavutettava hyöty olisikin vain kohtalaisen hyvä.



**Kuva 16.** Saneerattujen jakeluvesijohtojen jaottelu kannattaviin, keskinkertaisiin ja kannattamattomiin kohteisiin

Tässä yhteydessä tarkastellaan jakeluvesijohtojen saneerausten priorisointia esimerkitapauksen avulla. Esimerkki tarkastelee kolmea jakeluvesijohtokohdetta, jotka ovat Projekti 3, Projekti 10 ja Projekti 12. Kaikkien kolmen saneerauskohteen saneerattavat putket ovat olleet kooltaan pieniä. Niiden pituuksilla painotetut keskimääräiset halkaisijat ovat vastaavasti 150 mm, 110 mm ja 199 mm. Saneerattava putki on Projektissa 3 ollut materiaaliltaan pallografiittivalurautaa, Projektissa 10 polyetyleenä ja Projektissa 12 saneerattu putkipituus on sisältänyt sekä pallografiittivalurautaa että polyetyleenä. Projekti 3 on kuulunut vesijohdon lähtötaso-SANNI-indeksin perusteella kohtalaisen riskin luokkaan ja Projekti 10 ja 13 matalan riskin luokkaan.

Näiden saneerauskohteiden priorisointia tarkastellaan kuvassa 17. Kaikilla kolmella kohteella on suunnilleen sama yksikkökustannusindeksin arvo, joten saneerausten priorisointi voidaan toteuttaa vain vertailemalla SANNI-indeksin parannusta, joka kuvaa saneerauksella saavutettavaa hyötyä. Tässä työssä kehitetyn menetelmän mukaisesti valittaisiin ensimmäiseksi saneerattavaksi kohteeksi Projekti 3, sillä sen SANNI-indeksin parannus on suurin verrattuna kahteen muuhun kohteeseen. Samaan tapaan voitaisiin seuraavaksi valita Projekti 12 ja lopuksi Projekti 10 priorisoinnin perusteella toteutettaviksi saneerauskohteiksi. Tapaukset ovat myös keskenään melko vertailukelpoisia, koska niiden kokonaiskustannukset ovat lähellä toisiaan, toisin sanoen kuvassa ympyrät ovat samankokoisia.

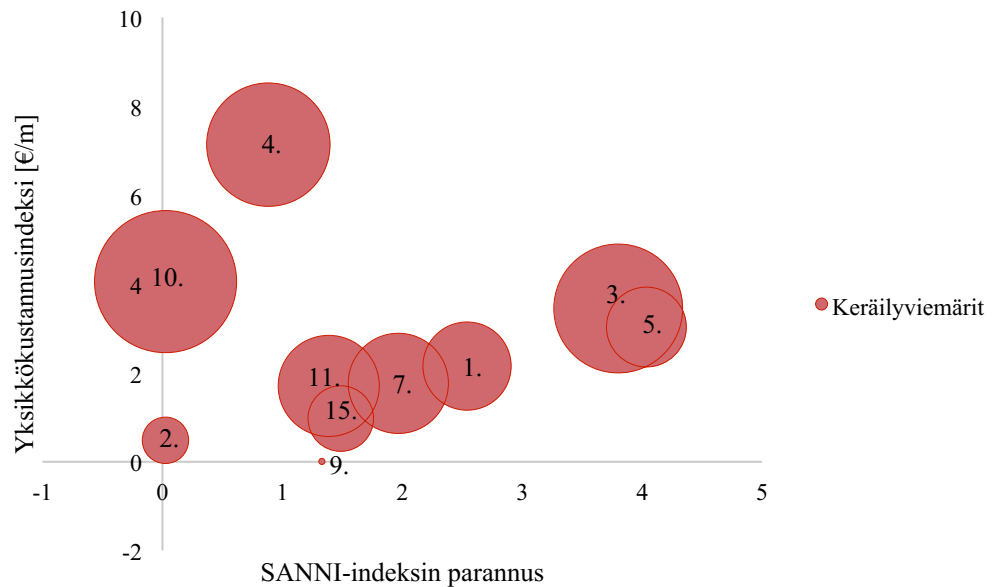


**Kuva 17.** *Esimerkki toteutettavasta saneerausten priorisoinnista kolmen jakeluvesijohtojen saneerausprojektin välillä*

Kuvan 17 esimerkkitapaus havainnollistaa kehitetyllä menetelmällä toteutettavaa saneerausten priorisointia yksinkertaisen tapauksen avulla. Usein valinta priorisoitavien saneerauskohteiden välillä ei kuitenkaan ole näin helppo, sillä sekä yksikkökustannusindeksin että SANNI-indeksin parannuksen arvo eri kohteiden välillä voi vaihdella. Tällöin valinta tulisi tehdä asiantuntija-arvioon perustuen ja valinta riippuisi asiantuntijan antamista painoarvoista saneerauksen valintaan vaikuttaville tekijöille. Myös muilla tekijöillä kuin SANNI-indeksin parannuksella ja kustannuksilla voisi tällöin olla vaikutus päätöksentekoon.

#### 4.4.2 Keräilyviemärit

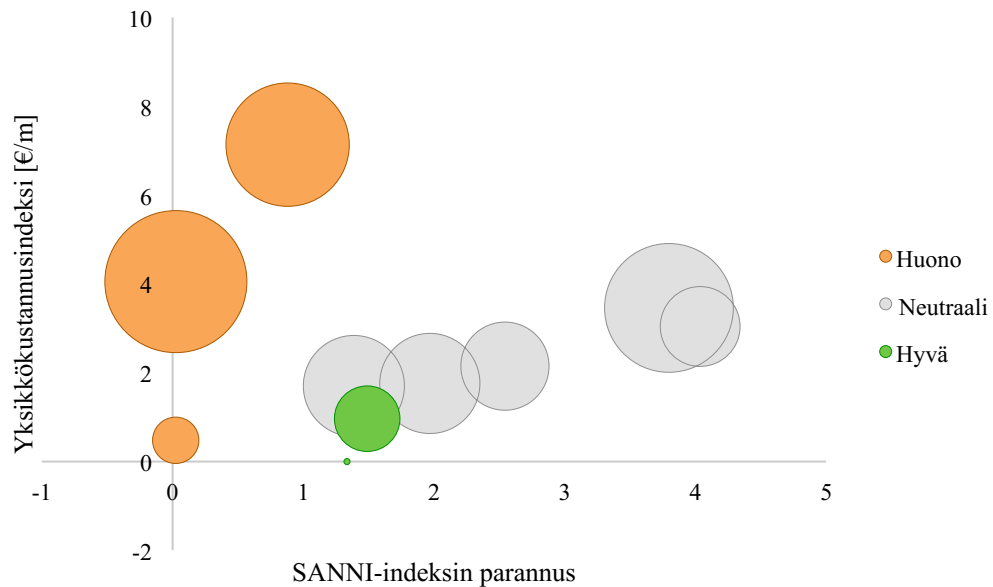
Keräilyviemärien saneerausten priorisointi toteutettiin Excelin PowerView-työkalua hyödyntäen samaan tapaan kuin jakeluvesijohdoille. Akseleita ja ympyrän kokoa kuvaavat suuret olivat myös samoja. Kuvassa 18 on nähtävissä kaikki saneeratut keräilyviemärit kohteittain ja niiden sijoittuminen kuvaajassa.



**Kuva 18.** Kaikki saneeratut keräilyviemärit kohteittain

Kuvassa 19 on jaoteltu keräilyviemärien saneerauskohteet kannattaviin ja kannattamattomiin. Kuvaa on sisällytetty myös kannattavuudeltaan keskinkertaiset kohteet, joiden priorisointi on hankalinta ja vaatii eniten pohdintaa. Taulukko 10 esittää keräilyviemärien saneerausten priorisointia varten lasketun SANNI-indeksin parannuksen ja yksikkökustannuksen suhteen, joka on skaalattu valitulla kertoimella. Arvon perusteella kohteet on luokiteltu hyviin, neutraaleihin ja huonoihin. Keräilyviemäreille on käytetty samoja raja-arvoja luokkien määrittelyssä kuin jakeluvesijohdoille ja raja-arvot ovat taulukossa 9. Keräilyviemärien saneerauskohteista hyviä kohteita oli kaksi, neutraaleja oli viisi ja huonoja kolme.

Saneerausten priorisointi joidenkin kohteiden kannalta saattaa näyttää kannattavammalta myös siitä syystä, että näille saneerauskohteille ei ole tiliöity kustannuksia kaikkien kustannuslajien osalta. Tällaisia saneerauskohteita ovat jo edellä mainittu jakeluvesijohdojen ja keräilyviemäreiden Projekti 9 sekä Projekti 15, jossa on sekä jakeluvesijohdon että keräilyviemärien saneerauksissa tiliöity kustannuksia vain rakentamisen ja materiaalien osalta. Muissa jakeluvesijohdojen ja keräilyviemärien saneerauskohteissa on tiliöity kustannuksia vähintään kolmen kustannuslajin osalta, joita oli yhteensä viittä eri tyyppiä. Projektin 9 ympyrän koko ja yksikkökustannusindeksi ovat poikkeuksellisen pienet, mikä viittaa kohteen virheellisiin saneerauskustannuksien tiliöinteihin (kuva 19).



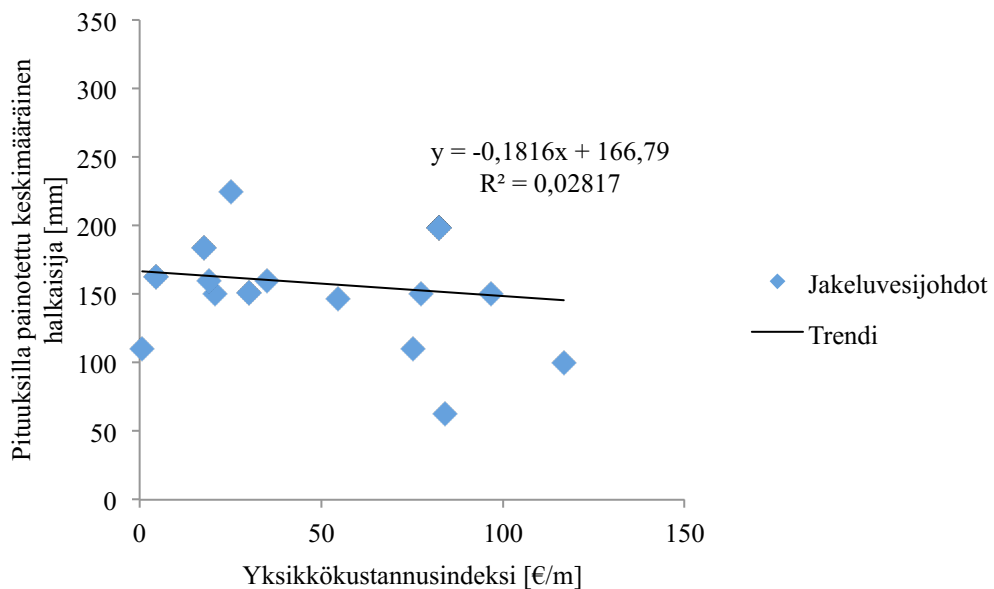
**Kuva 19.** Saneerattujen keräilyviemäreiden jaottelu kannattaviin, keskinkertaisiin ja kannattamattomiin kohteisiin

**Taulukko 10.** Keräilyviemärien saneerausten priorisointi SANNI-indeksin parannuksen ja yksikkökustannuksen avulla ja priorisoinnin tuottamat luokat, joihin saneerauskohteet on jaettu

Keräilyviemärit	SANNI-parannus/ yksikkökustannus	Luokka
Projekti 1, Helsinki	2,36	Neutraali
Projekti 2, Vantaa	0,10	Huono
Projekti 3, Helsinki	2,20	Neutraali
Projekti 4, Helsinki	0,25	Huono
Projekti 5, Helsinki	2,66	Neutraali
Projekti 7, Espoo	2,23	Neutraali
Projekti 9, Vantaa	1108,71	Hyvä
Projekti 10, Vantaa	0,01	Huono
Projekti 11, Kauniainen	1,63	Neutraali
Projekti 15, Espoo	3,08	Hyvä

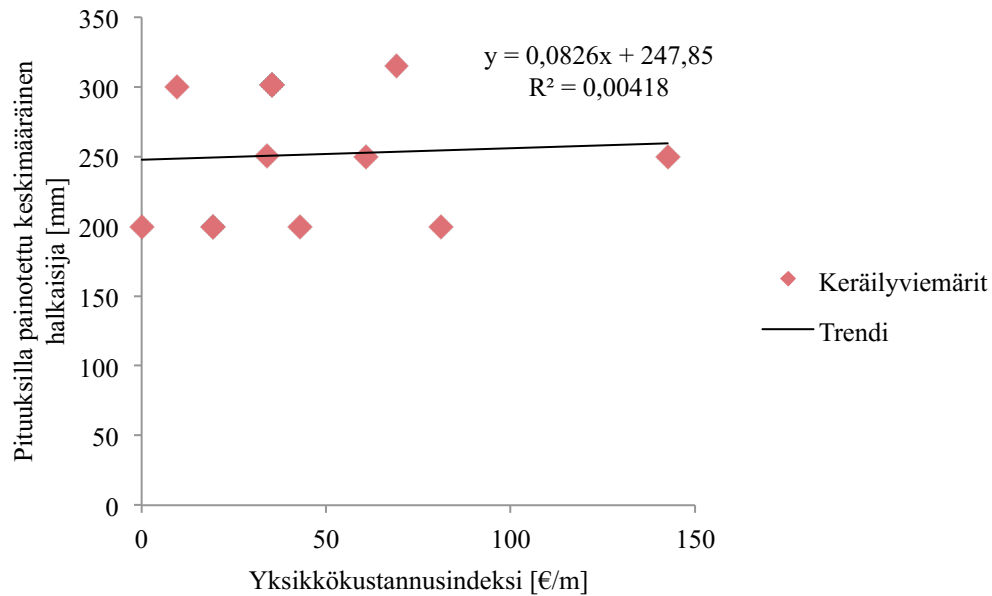
Joissakin saneerauskohteissa korkeampiin saneerauskustannuksiin voi osaltaan vaikuttaa suurempi putkikoko. Suurempi putkikoko aiheuttaa tavallisesti suuremmat materiaalikustannukset. Lisäksi, jos putken koko on suuri, tarvitaan yleensä myös suurempi kairavanto ja mahdollisesti enemmän perustamistöitä. Tällöin myös rakentamiskustannukset ovat suuremmat. Saneerausten priorisointia tehtäessä laskettiin toteutuneilla saneerauspituuksilla painotettu keskimääräinen putken halkaisija. Jakeluvesijohtojen ja keräilyviemärien keskimääräisten halkaisijoiden ja saneerauskohteiden yksikkökustannuksien välistä lineaarista riippuvuutta on kuvattu kuvissa 20 ja 21. Kuvaajien erilaiset havaintoarvot perustuvat sekä raportoituihin että laskennallisiin arvoihin saneerauskohteiden

toteutuneista saneerauspituuksista, putkikoosta ja saneerauskustannuksista. Kyseessä olevien muuttujien eli keskimääräisen putkikoon ja yksikkökustannusten välille on pyritty etsimään yksinkertaista matemaattista mallia kuvaamaan näiden muuttujien välistä riippuvuutta. Lineaarisen riippuvuus on valittu siitä syystä, että havaintoarvot eivät noudata hyvin muitakaan yksinkertaisia matemaattisia malleja. Korrelaatiokerroin  $R$  kuvaa lineaarisen riippuvuuden voimakkuutta (Rawlings et al., 1998). Linearisessa mallissa korrelaatiokertoimen neliö  $R^2$  on selityskerroin, jolla voidaan kuvata selitettävän muuttujan vaihtelua toisen muuttujan vaihtelulla (Rawlings et al., 1998). Kuten kuvista 20 ja 21 nähdään, keskimääräisen putkikoon ja saneerauskohteen yksikkökustannusten selityskertoimen arvot jakeluvesijohdoille ja keräilyviemäreille ovat 0,02 ja 0,004. Tämä voidaan tulkita siten, että jakeluvesijohdoilla putkikoon vaihtelu selittää 2 % ja keräilyviemäreillä 0,4 % yksikkökustannusten vaihtelusta (Rawlings et al., 1998). Selityskertoimelle voidaan usein tilastollisissa tarkasteluissa laskea sen paikkansapitävyys tietyllä todennäköisyydellä, jota kutsutaan p-arvoksi (Rawlings et al., 1998). Tässä tapauksessa tämänkaltainen tarkastelu on jätetty tekemättä, sillä selityskertoimen arvo on muutenkin hyvin merkityksetön. Tuloksena tästä tarkastelusta voidaan todeta, että kummankaan johtolajin tapauksessa putkikoko ei hyvin selitä eroa kohteiden yksikkökustannusten välillä. Tämä ei välttämättä ole kovin yllättävää, sillä putkikoko on vain yksi kustannuksien muodostumista selittävä tekijä. Asiantuntija-arvion mukaan todennäköisesti maaperä ja liikenneolosuhteet vaikuttavat tekijänä enemmän saneerauskustannuksiin kuin putkikoko.



**Kuva 20.** Putkikoon vaikutus jakeluvesijohtojen yksikkökustannuksiin



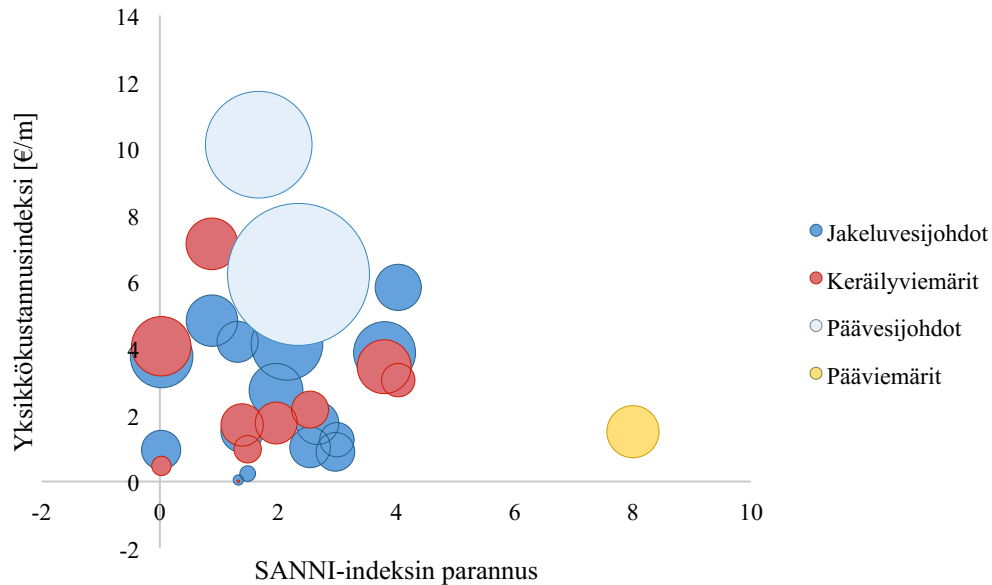


*Kuva 21. Putkikoon vaikutus keräilyviemäreiden yksikkökustannuksiin*

#### 4.4.3 Päävesijohdot

Tarkasteltuja päävesijohtojen saneerauksia oli kaksi: vuonna 2015 valmistunut Projekti 16 ja vuonna 2016 valmistunut Projekti 17, jotka molemmat sijaitsevat Helsingissä. Kuvassa 22 on esitetty kaikkien tarkasteltujen saneerauskohteiden saneerausten priorisointia kuvaava kuvaaja eri johtolajeille. Kuva 22 esitetään tässä yhteydessä, jotta päävesijohtokohteiden että seuraavassa alaluvussa käsiteltävän pääviemärien saneerausten hyötyjä ja kustannuksia olisi helpompi hahmottaa. Kuva havainnollistaa eri johtolajeille toteutettujen saneerauksien välisiä suhteita ja eroavaisuuksia kohteiden välillä SANNI-indeksin parannuksen ja kustannusten näkökulmasta. Saneerausten yksikkökustannusindeksin perusteella voidaan todeta, että päävesijohtojen saneeraukset ovat muihin johtolajien saneerauksiin verrattuna olleet verrattain kalliita toteuttaa (kuva 22).

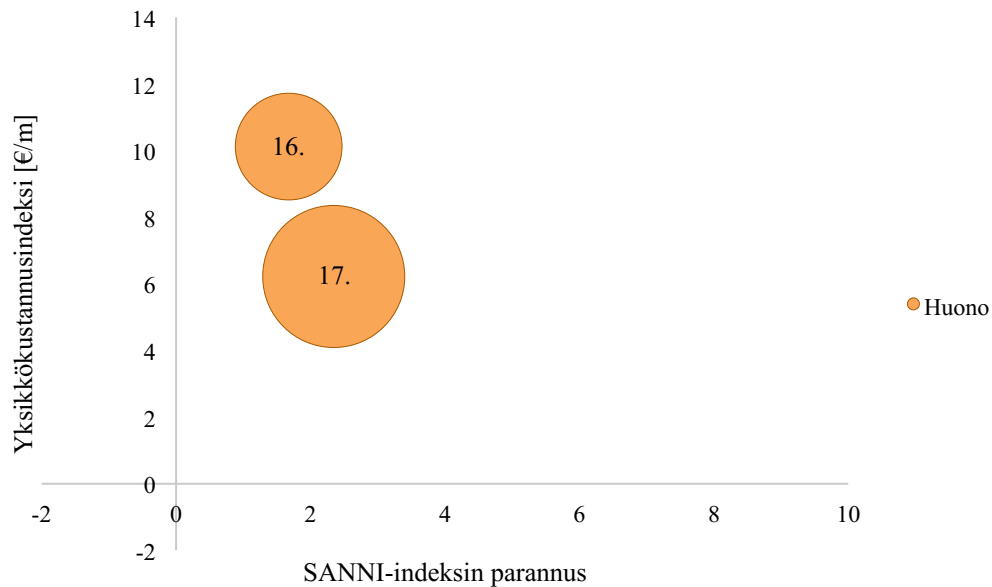
Saneerausten priorisointi päävesijohdoille on toteutettu aiemmin jakeluvesijohdoille ja keräilyviemäreille kuvatun tavan mukaisesti. Päävesijohtojen saneerausten priorisointia tarkastellaan kuvassa 23. Molemmat saneerauskohteet ovat olleet melko kannattamattomia luokittelun perusteella. Projekti 17 on kuitenkin Projektin 16 päävesijohdon saneeraukseen verrattuna ollut kannattavampi, sillä sen SANNI-indeksin parannus on korkeampi ja yksikkökustannusindeksi matalampi kuin Projektin 16 kohteessa.



**Kuva 22.** Kaikkien saneerattujen johtolajien tarkastelu kohteittain

Verrattaessa Projektin 16 ja Projektin 17 päävesijohdojen saneerauksia huomataan, että sekä SANNI-indeksi että projektin yksikkökustannusindeksi perusteella olisi ollut perusteltua saneerata Projekti 17 ensin. Syytä Projektin 16 saneeraukseen voisi lähteä etsimään Projektin 16 korkeammasta vuototiheydestä (20,4 vuotoja/km) verrattuna Projektin 17 vuototiheyteen (11,7 vuotoja/km). Kuitenkin vesijohdon SANNI-indeksissä otetaan jo yhtenä tekijänä huomioon vuototiheys eli se sisältyy jo tässä työssä toteutettuun priorisointiin. Siten se ei toimi kunnollisena perusteena aikaisemmalle saneeraukselle. Asiaa voisi selittää myös se, että Projektin 16 toteutuneet kustannukset ovat 2,9-kertaiset suunniteltuihin kustannuksiin verrattuna. Tämä on osaltaan voinut vaikuttaa kohteen valintaan saneerattavaksi. Projektin 16 korkeampia toteutuneita saneerauskustannuksia voisi myös osaltaan selittää Projektin 17 päävesijohdoja suurempi putkikoko (Keskimääräinen halkaisija: Projekti 16, 800 mm ja Projekti 17, 727 mm).

Todellisuudessa näistä kahdesta päävesijohdosta tiedetään, että niiden valintaan saneerattavaksi vaikutti niiden kunnan lisäksi seuraavat syyt. Molemmat näistä putkista sijaitsevat sellaisessa kohdassa verkostoa, jossa ne liittyvät uuteen runkovesijohdosta. Kyseinen runkovesijohdo rakennettiin korvaamaan erään vedenpuhdistuslaitoksen kapasiteettia. Vedenpuhdistuslaitoksen lakkauttamisen johdosta nämä johdot olivat muuttumassa vedenjakelun kannalta kriittisemmiksi vesijohdoiksi ja niiden kapasiteettia oli tarvetta nostaa. Aiemman arvion mukaan näiden päävesijohdojen uusiminen koettiin siten tarpeelliseksi uuden runkovesijohdotkokonaisuuden kannalta.



**Kuva 23.** Molemmat saneeratut päävesijohdot kohteittain ja priorisoinnin tuottama luokittelu.

**Taulukko 11.** Päävesijohtojen saneerausten priorisointi SANNI-indeksin parannuksen ja yksikkökustannuksen avulla ja priorisoinnin tuottamat luokat, joihin saneerauskohteet on jaettu

Päävesijohdot	SANNI-parannus/ yksikkökustannus	Luokka
Projekti 16, Helsinki	0,33	Huono
Projekti 17, Helsinki	0,75	Huono

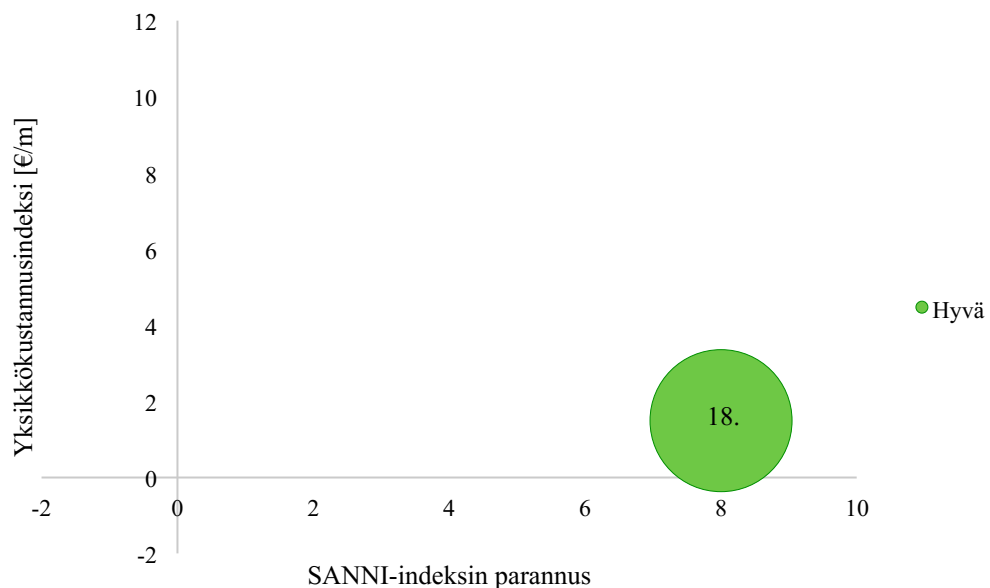
Taulukossa 11 on nähtävissä saneerausten priorisoinnissa lasketut arvot päävesijohdoille vastaavasti kuin jakeluvesijohtojen ja keräilyviemärien tapauksissa. Saneerausten priorisoinnissa on käytetty taulukossa 9 esitettyjä raja-arvoja. Jatkossa, kun tietoa saadaan kerättyä useammasta päävesijohdon saneerauskohteesta, raja-arvoja on syytä tarkastella uudelleen. Käytetyssä priorisointimenetelmässä ei ole otettu huomioon kaikkia tavoitteita, joihin päävesijohtojen saneerauksella usein pyritään. Päävesijohdon kunto on varsinainen saneerausperuste, jonka kehitetty menetelmä ottaa huomioon. Tarkastelun ulkopuolelle jääviä päävesijohtojen saneeraustavoitteita ovat kapasiteetin muutokset. Veden laadun kriteerit voisivat myös kuulua tarkastelun ulkopuolelle jäävien tavoitteiden joukkoon, mutta käytännössä kyseinen tavoite on vaikuttanut enemmän jakeluvesijohdon saneerauksiin kohteessa kuin päävesijohtojen saneerauksiin.

#### 4.4.4 Pääviemärit

Ainoa tarkasteltu pääviemäri oli vuonna 2014 valmistunut Projekti 18 Espoossa. Saneerausten priorisoinnin tuloksena laskettu kuvaaja ja priorisoinnin tuottama luokka kohteelle on esitetty kuvassa 24. Taulukossa 12 on saneerauksen priorisoinnissa laskettu SANNI-indeksin parannuksen ja yksikkökustannuksen suhde skaalattuna valitulla kertoimella. Kohde sijaitsee kuvaajan oikeassa alareunassa ja on siten otollinen kohde saneerattavaksi (kuva 24).

**Taulukko 12.** Pääviemäriin saneerauksen priorisointi SANNI-indeksin parannuksen ja yksikkökustannuksen avulla ja priorisoinnin tuottama luokka

Pääviemärit	SANNI-parannus/ yksikkökustannus	Luokka
Projekti 18, Espoo	10,69	Hyvä



**Kuva 24.** Saneerattu pääviemäri ja priorisoinnin tuottama luokka

Tarkasteltu pääviemäri on ollut tässä työssä toteutetun priorisoinnin perusteella kannattavin kohde saneerata saneerauksella saavutettavan hyödyn ja kustannusten näkökulmasta (kuva 22). Pääviemäri on saneerattu sujuttamalla ja sen materiaalina on käytetty huopasukkaa. Kyseisen kohteen SANNI-indeksin laskemisessa oli epävarmuuksia lähtötiedoissa, joten tulokseen tulee suhtautua pienellä varauksella. Lisäksi pääviemäreistä on tarkasteltu vain yhtä tapausta, joten vertailu ei ole tasapuolinen.

## 5. KEHITYSTOIMENPITEET

Vesihuoltolaitoksille on tyypillistä, että laitokset koostuvat toiminnallisista osastoista, joilla on omat tietojärjestelmänsä eikä kaikille yhteistä päätietojärjestelmää ole olemassa (Ugarelli et al., 2010). Tämän työn aikana havaittiin, että edellä kuvatun tapaisesti yhteydet Helsingin seudun ympäristöpalvelut –kuntayhtymän käytössä olevien järjestelmien välillä voisivat olla paremmat. Työssä kehitetyn saneerausten seurantatyökalun käyttö edellyttää eri tietojen keräämistä HSY:llä käytössä olevasta verkkotietojärjestelmästä eli TrimbleNIS:stä sekä investointien kustannusten seurantaan tarkoitettua FPM-järjestelmästä. Tällä hetkellä näiden kahden eri järjestelmän välillä ei ole rajapintaa, joten tietojen kerääminen automaattisesti samasta järjestelmästä ei ole nykyisellään mahdollista. Jos saneerausten priorisointia halutaan jatkossa kehittää tässä työssä kehitetyn menetelmän pohjalta, tulisi olla olemassa rajapinta kustannuksia käsittelevän järjestelmän ja verkkotietojärjestelmän välillä, jotta menetelmä olisi käyttökelpoinen usein toistuvassa raportoinnissa. Nykyisellään kehitetyn menetelmän käyttö vaatii paljon käsin tehtävää tiedonkeruuta ja myös SANNI-indeksien laskenta tuli kullekin saneerauskohteelle laskea erikseen Excel-taulukkolaskentaohjelman kaavoilla.

Erilaisten tietojärjestelmien hyödyntämisen kannalta olisi tärkeää, että putkitunnukset, hydrauliset mallit, toteutetut projektit ja vahinkotilastot olisivat kohdekohtaisesti yksilöity tunnuksien avulla näitä tietoja sisältävissä järjestelmissä (Ugarelli et al., 2010). Eräs puute, joka havaittiin saneerauskohteiden tunnistetiedoissa oli se, että saneerausprojektin tunnistetieto ei ollut sama TrimbleNIS- ja FPM-järjestelmissä. TrimbleNIS:ssä saneerauskohteen yksilöintiin käytettiin mittaususerän nimeä ja ID:tä, kun taas FPM-järjestelmässä kullakin projektilla on oma kohdenumero. Näitä tunnistetietoja voisi tulevaisuudessa yhdenmukaistaa siten, että saneerauskohteita ei voi sekoittaa toisiinsa. Lisäksi olisi hyvä, jos saneerauksella korvattavat putket voitaisiin yhdistää samaan tunnistetietoon. Tällä hetkellä kohteen sijainti on mahdollista tarkistaa verkkotietojärjestelmästä, mutta mikäli saneerausten priorisointia varten tehtävää tiedonkeruuta halutaan automatisoida, olisi hyvä, että näiden eri järjestelmien tunnistetiedot vastaisivat toisiaan.

Tässä työssä toteutuneiden saneerausten seurantaan kehitettyä menetelmää voidaan käyttää tarkastelemaan myös suurempaa määrää saneerausprojekteja. Tällaisen tarkastelun perusteella voidaan varmistua, että menetelmä toimii laajemmalla aineistolla. Lisäksi jatkossa menetelmän käyttöönottoa suunniteltaessa tulisi pohtia, miten vastaavaa menetelmää voidaan käyttää tulevien saneerauskohteiden priorisoinnissa. Tulevien saneerauskohteiden priorisoinnin kannalta tulisi pohtia seuraavia kysymyksiä:

1. Miten tulevien saneerauskohteiden kustannukset laskettaisiin?
2. Tulisiko käyttää lähtötaso-SANNI-indeksin arvoa priorisoinnissa SANNI-indeksin parannuksen sijaan?
3. Tulisiko saneerausten valinnassa ottaa huomioon muita priorisointiin vaikuttavia tekijöitä?
4. Miten mahdollistetaan näiden tietojen keräämisen ja laskennan toteuttamisen tarvitsemat järjestelmiin liittyvät tekniset valmiudet, jotta työmäärä pienenesi ja laskenta olisi tarpeeksi automatisoitua, että menetelmästä hyödyttäisiin?

Tulevien saneerauskohteiden priorisoinnin kehittämiseksi tässä työssä suoritettiin myös verkkotietojärjestelmästä automaattisesti tulostettujen Excel-raporttien tietojen tarkistaminen. Priorisointia varten kerätyt raporttien tiedot olivat oikeellisia, joten niiden sisältämiä tietoja voisi olla mahdollista hyödyntää automaattisen tietojen keräämisen kehittämisessä. Raporttien perusteella kyettäisiin varmasti laskemaan saneerausprojektien toteutettu saneerauspituus projektien yksikkökustannusten laskemiseksi, mikäli tarkasteltaisiin toteutuneiden projektien priorisointia. Tulevien saneerauskohteiden saneerauspituuden selvittämiseksi pitäisi käyttää suunniteltuja saneerauspituuksia, koska toteutunutta saneerauspituutta ei ennakolta ole tiedossa.

Tässä työssä havaittiin, että saneerauskohteiden kustannusten tiliöinneissä olisi parantamisen varaa. Kaikkia saneerauskustannukset muodostavia kustannuslajeja ei tiliöidä systemaattisesti. Esimerkiksi valvonnan kustannuksia harvemmin kirjataan ollenkaan. Kaupunkilähtöisten yhteishankkeiden sisällyttäminen tämän työn tarkasteluun nähtiin melko hankalana, sillä tällaisten saneerauskohteiden kustannustiedot koostuivat monesti koontilaskuista, joissa kustannuksia oli jaettu monille kohteille. Saneerauskustannukset muodostavien eri toimintojen, kuten suunnittelun, rakentamisen, jne. kustannuserittely olisi täten edellyttänyt, että yksittäisiltä laskuja käsitelleiltä henkilöiltä olisi kysytty tarkemmin kustannusten jakautumisesta saneerausprojekteissa. Jatkossa laskuille olisi hyvä sisällyttää selkeämpi erittely kullekin saneerauskohteelle kohdennettavista kustannuksista. Lisäksi olisi kiinnitettävä huomiota siihen, että kullekin johtolajille kirjattaisiin oikeassa suhteessa saneerauskustannuksia. Saneerauskustannuksiin ei tällä hetkellä kuulu ylläpitokustannuksia. Jätevesiviemärikohteiden priorisointi kaipaisi ylläpitokustannusten huomioimista. Esimerkiksi painuneiden jätevesiviemäreiden saneerauskustannusta olisi hyvä verrata säännöllisen painehuuhtelun kustannuksiin.

Tämän työn on tarkoitus herättää kysymyksiä ja kiinnostusta työn aihetta kohtaan ja toimia lähtökohtana saneerausten priorisoinnin kehittämiseen HSY:llä. Työssä kehitetty menetelmä toteutuneiden saneerausten priorisoinnin seurantaan on soveltamiskelpoinen myös muualla edellyttäen, että SANNI-indeksien laskentaa varten löytyy tarvittavat tiedot ja kustannustietoja toteutuneista saneerauksista on saatavilla. Työn tärkeänä tavoitteena oli tutkia, mitkä tekijät kirjallisuuden perusteella on nostettu keskeisiksi saneerauksen valintaan vaikuttaviksi tekijöiksi ja viitekehyksen avulla löytää kohdeyritykselle tarpeeksi yksinkertainen lähestymistapa saneerausten priorisointiin. Alan kirjallisuudes-

sa on viime vuosikymmenellä nostettu tutkimisen arvoiseksi kehityskohteeksi kevyet päätöksentekotyökalut (Ana & Bauwens, 2007). Tällaiset työkalut olisivat helposti sovellettavissa yritystasolla ja hyödyntäisivät joko saatavissa olevaa tai helposti hankittavaa tietoa (Ana & Bauwens, 2007). Tässä työssä on pyritty nimenomaan tarpeeksi yksinkertaiseen lähestymistapaan, jotta kehitetyn menetelmän käyttöönotto olisi mahdollisimman helppoa. Varsinaisen nykyaikaisen saneerausten priorisointimenetelmän puuttuessa HSY:llä, täytyy kehitystyötä kuitenkin lähteä rakentamaan tarpeeksi käytännölliseltä ja yksinkertaiselta pohjalta, jotta ei ole vaaraa heti kohdata ylitsepääsemättömiä haasteita menetelmän toteuttamisessa. Kehitystyön tulisi jatkua myös tulevaisuudessa, jotta HSY voisi toimia edelläkävijänä vesihuoltoalalla lyhyemmän ja pidemmän aikavälin saneeraussuunnittelun toteuttamisessa. Tällä tavoin pienemmät ja niukemmilla varoilla toimivat vesilaitokset Suomessa saisivat esimerkin siitä, miten saneerausten priorisointia voi kehittää.

## 6. JOHTOPÄÄTÖKSET

Tässä diplomityössä tarkasteltiin vesijohtojen ja jätevesiviemäreiden verkostosaneerausten priorisoinnin kehittämistä. Työssä kehitettiin aikaisemman verkostosaneerausten priorisointia käsittelevän kansainvälisen tutkimuksen pohjalta viitekehys saneerausten priorisointiin, jonka toimivuutta testattiin tapaustutkimuksen avulla. Kehitetty viitekehys pohjautuu kirjallisuuskatsaukseen, jossa tarkasteltiin yhteensä 44:ssä kansainvälisissä vertaisarvioituissa tutkimusartikkeleissa esiintyviä verkostosaneerausten valintaan vaikuttavia tekijöitä, päätöksentekomalleja ja saneerauskohteiden priorisoinnissa käytettäviä optimoitavia muuttujia. Näiden havaintojen pohjalta kehitettiin kolmiosainen viitekehys, jota hyödynnettiin tämän työn tapaustutkimuksessa. Tapaustutkimuksessa viitekehysten avulla arvioitiin yhteensä 15 jakeluvesijohdon, 10 keräilyviemärin, kahden päävesijohdon ja yhden pääviemärin saneerauskohteita. Tapaustutkimuksen tulokset voidaan esittää kuvaajina, joissa tarkastellaan kuntoindeksin eli SANNI-indeksin paranusta suhteessa saneerauskohteen yksikkökustannuksiin. Tapaustutkimuksen avulla voitiin myös tunnistaa useita kehityskohteita verkostosaneerausten seurannan ja priorisoinnin kehittämiseksi. Kehitettyä menetelmää on mahdollista soveltaa myös muualla, kun lähtötiedot SANNI-indeksien laskentaa varten sekä riittävät kustannustiedot toteutuneista saneerauksista ovat saatavilla.

Työn kirjallisuuskatsauksessa tunnistettiin kahdeksan saneerausten valintaan vaikuttavan tekijän ryhmää: saneerauksen toteutus, putken ympäristö, kustannukset, verkoston suorituskyky, putken ominaisuustiedot, riskeihin liittyvä tieto, ajalliset tekijät ja muut tekijät. Lisäksi kerättiin saneerausten priorisoinnissa käytettyjä optimoitavia muuttujia, joita olivat saavutettavat hyödyt, budjetin tehokas käyttö, verkoston suorituskyky, verkoston luotettavuus, kustannukset, vahingot ja häiriöt. Loput optimoitavista muuttujista muodostivat muiden muuttujien-ryhmän. Tässä työssä hyödynnettiin siltasaneerausten priorisointia käsitelleessä esimerkissä esiteltyä ideaa, jossa saneerauskohteet jaettiin priorisoinnin helpottamiseksi kolmeen eri tyyppiseen ryhmään. Kirjallisuuskatsauksen havaintojen pohjalta kehitettiin kolmiosainen viitekehys verkostosaneerausten priorisointiin. Viitekehysten toimintaa testattiin tapaustutkimuksessa, jossa viitekehysten perustuvalla työkalulla arvioitiin 28 toteutunutta saneerauskohtetta. Työkalun avulla valitut saneerauskohteet jaetaan kannattaviin, keskinkertaisiin ja kannattamattomiin. Priorisoinnin tavoitteena oli rajata tarkastelua pienempään joukkoon projekteja, jotka vaativat enemmän pohdintaa. Työssä tutkittiin myös putkikoon vaikutusta saneerausten yksikkökustannuksiin. Jakeluvesijohdoilla ja keräilyviemäreillä putkikoko ei selittänyt eroja yksikkökustannuksissa. Päävesijohdoilla putkikoko saattoi osaltaan selittää eroja



kohteiden yksikkökustannuksissa. Todennäköisemmin syynä on kuitenkin maaperä ja liikenneolosuhteet.

Saneerauksen valintaan vaikuttavia tekijöitä tai optimoitavia muuttujia ei ole tiettävästi koottu ja luokiteltu tässä laajuudessa aiemmin. Saneerausten priorisoinnista on paljon tieteellistä kirjallisuutta englanniksi. Englanninkielisten tutkimusartikkeleiden perusteella koettiin myös aihetta kokoavan tiedon käsittely tarpeelliseksi. Työn tarkoituksena oli lisäksi kehittää HSY:n menetelmiä toteuttaa saneerausten priorisointia. Työssä onnistuttiin kehittämään toteutuneiden saneerausprojektien priorisointia tarkasteleva seurantatyökalu, jota on mahdollista käyttää jatkossa toteutuneiden projektien saneerausten kannattavuuden arvioitiin. Kehitysehdotusten perusteella on mahdollista parantaa käytössä olevien järjestelmien teknisiä valmiuksia saneerausten priorisoinnissa tarvittun tiedon keräämistä ja automaattisempaa hyödyntämistä varten. Työn tulokset ovat lähtökohta saneerausten priorisoinnin jatkokehittämiselle.

Saneerausten priorisointi on aiemmin ja osittain nykyisinkin perustunut pitkälti asiantuntijan kokemukseen pohjautuvaan arvioon saneerausta tarvitsevista kohteista. Hiljaisen tiedon merkitys saneerausten priorisoinnissa korostuu etenkin tämänkaltaisessa lähestymistavassa. Saneerausten priorisointiin perehtyneillä henkilöillä on paljon hiljaista tietoa aihealueesta ja yksinomaan heidän kokemukseen pohjautuvassa lähestymistavassa on vaarana, että merkittävä osa osaavan henkilöstön tietotaidosta voidaan menettää, mikäli he siirtyvät toisiin työtehtäviin tai jäävät eläkkeelle. Tämän työn on tarkoitus kehittää saneerausten priorisointia ja saneeraussuunnittelua kohti läpinäkyvämpiä ja järjestelmällisesti toteutettavia käytäntöjä ja luoda pysyvämpiä toimintatapoja saneerausten priorisointiin. SANNI-indeksien laskentaperusteiden syvälinen ymmärrys on keskittynyt harvoille henkilöille kohdeyrityksessä ja tässä työssä kehitetyn saneerausten seurantatyökalun käyttö edellyttää vielä paljon käsin tehtävää tiedon keräämistä. Näitä työvaiheita on kuitenkin jatkossa mahdollisuus kehittää tietoa jakamalla sekä automatisoinnilla.

Työn teoriaosan kannalta rajoituksina voidaan pitää saneerausten valintaan vaikuttavien tekijöiden tunnistamisen hankaluutta. Tavoitefunktioiden määrittely on tapauskohtaista ja käytetyt termit sekä määritelmät vaihtelevat tutkimuksesta toiseen. Ajoittain erilaisten tekijöiden tunnistaminen oli haastavaa, joten on mahdollista, että yksittäisistä tutkimuksista jokin saneerauksen valintaan vaikuttava tekijä on jäänyt huomaamatta. Kuitenkin tarkastelu toteutettiin 40 artikkelin perusteella, joten esiintyneistä tekijöistä koottu tieto antaa hyvän kokonaiskuvan saneerausten valintaan vaikuttavista tekijöistä. Tämän työn HSY:lle toteutettuun tapaustutkimukseen ei sisällytetty saneerausten priorisoinnin toteutukseen putken ympäristöä, ajallisia tekijöitä, mittakaavaetuja tai muiden samaan aikaan lähellä saneerattavien infratöiden tuomia etuja. Optimoitavien muuttujien tunnistaminen oli saneerauksen valintaan vaikuttavia tekijöitä helpompaa, joten tietojen keräämisessä ei ollut suurempia ongelmia. Toteutetun tapaustutkimuksen eräänä rajoitteena oli se, että päävesijohtojen saneerauskohteita löytyi tarkasteltavaksi vain kaksi ja pääviemäreitä

yksi. Tällaiselle määrälle kohteita on hankalaa toteuttaa priorisointia tai se ei ole lainkaan mahdollista pääviemäriin tapauksessa. Priorisoinnissa hyödynnettävässä kustannustiedossa oli myös ajoittain puutteita kohteiden saneeraus kustannuksia koskevissa tiliöinneissä. Mitä enemmän epävarmuuksia lähtötiedot sisältävät, sitä epäluotettavampia ovat niiden pohjalta syntyneet tulokset tai arviot. Poikkeamat lähtötiedoissa on siis hyvä ottaa huomioon tuloksia tulkittaessa. Tässä työssä priorisointi pyrittiin toteuttamaan pääasiallisesti luokittelemalla kohteita kolmeen ryhmään niiden kannattavuuden perusteella. Työssä ei lähtökohtaisesti tehty tarkkoja päätelmiä kustakin saneerauskohteesta vaan tarkoitus oli ennen kaikkea havainnollistaa kehitetyn viitekehysten ja tulosten perusteella saneerausten priorisoinnissa apuna käytettävän työkalun toteutusta.

Kirjallisuuden perusteella tulevaisuuden tutkimuskohteita voisivat olla nimenomaan yksinkertaisten ja kevyiden päätöksentekotyökalujen soveltaminen käytännön yritysmaailman tarpeisiin. Toivottavaa olisi kuitenkin, että valittu menetelmä ottaisi mahdollisimman kattavasti huomioon keskeisiä saneerauksen valintaan vaikuttavia tekijöitä. Kuten kirjallisuudessa on esitetty, monia kehitettyjä saneerausten optimointiin tarkoitettuja päätöksentekotyökaluja on kritisoitu niiden läpinäkyvyyden puutteesta päätöksentekoprosessissa. Tässä työssä havaittiin, että etenkin monet optimointimallit olivat melko monimutkaisia ja niiden soveltaminen käytännön yritysmaailmassa voisi lähtökohtaisesti olla melko hankalaa. Mallien integrointi osaksi tietojärjestelmäympäristöä ja päätöksentekoprosessia vaatisi paljon osaamista ja ymmärrystä, jota ei välttämättä löydy läheltä. Tästä syystä alan tutkimuksen ja yritysmaailman käytäntöjen yhteensovittamisessa tulisi jakaa avoimesti tietoa aiheesta ja pyrkiä kehittämään ratkaisuja, jotka olisi helppo toteuttaa käytännössä.

Jos tässä työssä kehitetty saneerausten priorisoinnin seuranta työkalu osoittautuu hyödylliseksi, voisi jatkossa tavoitteena olla vastaavanlaisten toteutuneiden saneerauskohteiden priorisointi suuremmalla määrällä saneerausprojekteja, jotta varmistuttaisiin menetelmän toimivuudesta. Tämän jälkeen voitaisiin aloittaa saneerausprojektien systemaattinen seuranta. Seuraava luonnollinen kehityskohde olisi tulevien saneerauskohteiden priorisoinnin toteuttaminen menetelmän avulla. Tulevien saneerauskohteiden priorisointi kuvatus menetelmän avulla edellyttäisi, että tietojen kerääminen HSY:llä käytössä olevasta verkkotietojärjestelmästä sekä investointien kustannuksien seurantaan käytetystä järjestelmästä helpottuisi. Myös SANNI-indeksien laskentaa voisi automatisoida, jotta käsin tehtävän työn määrä pienenesi jatkossa.

## LÄHTEET

Abraham, D.M., Wirahadikusumah, R., Short, T.J. & Shahbahrami, S. 1998. Optimization modeling for sewer network management. *Journal of Construction Engineering and Management*, 124: 402–410.

Alvisi, S. & Franchini, M. 2009. Multiobjective optimization of rehabilitation and leakage detection scheduling in water distribution systems. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 135: 426–439.

Ana, E. & Bauwens, W. 2007. Sewer network asset management decision support tools: a review. *International Symposium on New Directions in Urban Water Management*: 1–8.

Ariaratnam, S.T. & MacLeod, C.W. 2002. Financial outlay modeling for a local sewer rehabilitation strategy. *Journal of Construction Engineering and Management*, 128: 486–495.

Baah, K., Dubey, B., Harvey, R. & McBean, E. 2015. A risk-based approach to sanitary sewer pipe asset management. *Science of The Total Environment*, 505: 1011–1017.

Dandy, G.C. & Engelhardt, M. 2006. Multi-objective trade-offs between cost and reliability in the replacement of water mains. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 132: 79–88.

Dandy, G.C. & Engelhardt, M. 2001. Optimal scheduling of water pipe replacement using genetic algorithms. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 127: 214–223.

Davis, P. & Marlow, D. 2008. Asset management: quantifying economic lifetime of large-diameter pipelines. *American Water Works Association. Journal; Denver*, 100: 110–119.

deMonsabert, S., Ong, C. & Thornton, P. 1999. An integer program for optimizing sanitary sewer rehabilitation over a planning horizon. *Water Environment Research*, 71: 1292–1297.

Dridi, L., Parizeau, M., Mailhot, A. & Villeneuve, J.-P. 2008. Using evolutionary optimization techniques for scheduling water pipe renewal considering a short planning horizon. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 23: 625–635.

Engelhardt, M.O., Skipworth, P.J., Savic, D.A., Saul, A.J. & Walters, G.A. 2000. Rehabilitation strategies for water distribution networks: a literature review with a UK perspective. *Urban Water*, 2: 153–170.

Fenner, R.A. 2000. Approaches to sewer maintenance: a review. *Urban Water*, 2: 343–356.

Giustolisi, O. & Berardi, L. 2009. Prioritizing pipe replacement: from multiobjective genetic algorithms to operational decision support. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 135: 484–492.

Grigg, N.S. 2005. Assessment and renewal of water distribution systems. *American Water Works Association. Journal; Denver*, 97: 58,10,59-68.

Halfawy, M.R., Dridi, L. & Baker, S. 2008. Integrated decision support system for optimal renewal planning of sewer networks. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 22: 360–372.

Halhal, D., Savic, D.A., Walters, G.A. & Ouazar, D. 1999. Scheduling of water distribution system rehabilitation using structured messy genetic algorithms. *Evolutionary Computation*, 7: 311.

Halhal, D., Walters, G.A., Ouazar, D. & Savic, D.A. 1997. Water network rehabilitation with structured messy genetic algorithm. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 123: 137–146.

Hong, H.P., Allouche, E.N. & Trivedi, M. 2006. Optimal scheduling of replacement and rehabilitation of water distribution systems. *Journal of Infrastructure Systems*, 12: 184–191.

Hyttinen, M. 2017. *Verkostosaneerauskohteiden priorisointimenetelmän kehittäminen (SANNI) - Projektin loppuraportti, versio 1.1*. Helsingin seudun ympäristöpalvelut - kuntayhtymä (HSY).

Jin, X., Zhang, J., Gao, J. & Wu, W. 2008. Multi-objective optimization of water supply network rehabilitation with non-dominated sorting Genetic Algorithm-II. *Journal of Zhejiang University-SCIENCE A*, 9: 391–400.

Kao, J.-J. & Li, P.-H. 2007. A segment-based optimization model for water pipeline replacement. *American Water Works Association. Journal; Denver*, 99: 83–95,12.

Kekki, T.K. 2007. *Talousveden kanssa kosketuksissa olevat verkostomateriaalit Suomessa*. Vesi-instituutti.

Kim, J.H. & Mays, L.W. 1994. Optimal rehabilitation model for water distribution sys-

tems. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 120: 674–692.

Kleiner, Y., Adams, B.J. & Rogers, J.S. 1998a. Long-term planning methodology for water distribution system rehabilitation. *Water Resources Research*, 34: 2039–2051.

Kleiner, Y., Adams, B.J. & Rogers, J.S. 1998b. Selection and scheduling of rehabilitation alternatives for water distribution systems. *Water Resources Research*, 34: 2053–2061.

Kleiner, Y., Adams, B.J. & Rogers, J.S. 2001. Water distribution network renewal planning. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 15: 15–26.

Lee, J.H., Baek, C.W., Kim, J.H., Jun, H.D. & Jo, D.J. 2009. Development of a decision making support system for efficient rehabilitation of sewer systems. *Water Resources Management; Dordrecht*, 23: 1725–1742.

Li, F., Ma, L., Sun, Y. & Mathew, J. 2016. Optimized group replacement scheduling for water pipeline network. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 142.

Loganathan, G.V., Park, S. & Sherali, H.D. 2002. Threshold break rate for pipeline replacement in water distribution systems. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 128: 271–279.

Mild, P., Liesiö, J. & Salo, A. 2015. Selecting infrastructure maintenance projects with robust portfolio modeling. *Decision Support Systems*, 77: 21–30.

Mohamed, E. & Zayed, T. 2013. Modeling fund allocation to water main rehabilitation projects. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 27: 646–655.

Nafi, A. & Kleiner, Y. 2010. Scheduling renewal of water pipes while considering adjacency of infrastructure works and economies of scale. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 136: 519–530.

Nafi, A., Werey, C. & Llerena, P. 2008. Water pipe renewal using a multiobjective optimization approach. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 35: 87–94.

Rawlings, J., Pantula, S. & Dickey, D. 1998. *Applied regression analysis - A research tool*. 2nd ed. New York: Springer. 659 p.

Rogers, P.D. & Grigg, N.S. 2009. Failure assessment modeling to prioritize water pipe renewal: two case studies. *Journal of Infrastructure Systems*, 15: 162–171.

Roshani, E. & Filion, Y.R. 2014. Event-based approach to optimize the timing of water main rehabilitation with asset management strategies. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 140.

- Selvakumar, A., Clark, R.M. & Sivaganesan, M. 2002. Costs for water supply distribution system rehabilitation. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 128: 303–306.
- Tagherout, W.B., Bennis, S. & Bengassem, J. 2011. A fuzzy expert system for prioritizing rehabilitation of sewer networks. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 26: 146–152.
- Ugarelli, R. & Federico, V.D. 2010. Optimal scheduling of replacement and rehabilitation in wastewater pipeline networks. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 136: 348–356.
- Ugarelli, R., Venkatesh, G., Brattebø, H., Federico, V.D. & Sægrov, S. 2010. Asset management for urban wastewater pipeline networks. *Journal of Infrastructure Systems*, 16: 112–121.
- Ward, B., Kawalec, M. & Savic, D. 2014. An optimised total expenditure approach to sewerage management. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Municipal Engineer*, 167: 191–199.
- Ward, B. & Savić, D. 2014. A novel decision support system for optimized sewer infrastructure asset management. *International Conference on Hydroinformatics, City University of New York (CUNY)*, Paper 9.
- Ward, B. & Savić, D. 2011. Multi-objective optimisation for sewer rehabilitation investment planning. *Proceedings of the 34th World Congress of the International Association for Hydro- Environment Research and Engineering: 33rd Hydrology and Water Resources Symposium and 10th Conference on Hydraulics in Water Engineering*: 4529.
- Ward, B. & Savić, D.A. 2012. A multi-objective optimisation model for sewer rehabilitation considering critical risk of failure. *Water Science and Technology*, 66: 2410–2417.
- Wirahadikusumah, R. & Abraham, D.M. 2003. Application of dynamic programming and simulation for sewer management. *Engineering, Construction and Architectural Management*, 10: 193–208.
- Wu, Z.Y., Boulos, P.F., Orr, C.H. & Ro, J.J. 2001. Using genetic algorithms to rehabilitate distribution systems. *American Water Works Association. Journal; Denver*, 93: 74.

## LIITE A: TARKASTELTUIJEN SANEERAUSKOHTEIDEN PERUSTIEDOT

*Taulukko A. Tarkasteltujen saneerauskohteiden perustiedot: kohde, johtolaji, saneerattu pituus, halkaisija- ja materiaalitiedot, saneerausvuosi ja rakennusvuosi*

Kohde	Johtolaji	Pituus[m]	Uuden putken halkaisija/materiaali	Saneerausvuosi	Rakennusvuosi
Projekti 1, Helsinki	jakeluvesijohto	495	150/GRP	2 014	1961
Projekti 2, Vantaa	jakeluvesijohto	498	160/PEH, 110/PEH, 150/SG	2 016	1975
Projekti 3, Helsinki	jakeluvesijohto	306	150/GRP	2 013	1969
Projekti 4, Helsinki	jakeluvesijohto	169	150/GRP	2 013	1971
Projekti 5, Helsinki	jakeluvesijohto	113	100/GRP	2 013	1963
Projekti 6, Helsinki	jakeluvesijohto	124	63/PE	2 015	1969
Projekti 7, Espoo	jakeluvesijohto	327	90/PEH, 90/PE, 110/-, 160/PVC, 160/M, 90/M	2 014	1959
Projekti 8, Espoo	jakeluvesijohto	325	160/PVC, 160/-, 200/M, 90/M	2 014	1964
Projekti 9, Vantaa	jakeluvesijohto	890	110/PE	2 016	1967
Projekti 10, Vantaa	jakeluvesijohto	321	110/PE	2 016	1972
Projekti 11, Kauniainen	jakeluvesijohto	367	63/PEH, 110/PEH/M, 150/SG, 200/SG, 150/V, 200/V	2 015	1959, 1961
Projekti 12, Helsinki	jakeluvesijohto	384	160/PE, 200/SG	2 016	1901, 1957, 1977
Projekti 13, Espoo	jakeluvesijohto	524	160/PEH, 225/PEH, 150/SG, 300/SG	2 016	1958
Projekti 14, Helsinki	jakeluvesijohto	290	225/PEH, 150/SG	2 016	1958
Projekti 15, Espoo	jakeluvesijohto	330	160/PVC, 200/PVC, 225/PVC, */-	2 013	1979
Projekti 1, Helsinki	keräilyviemäri	195	200/PVC	2 014	1961
Projekti 2, Vantaa	keräilyviemäri	245	300/B	2 016	1975
Projekti 3, Helsinki	keräilyviemäri	260	315/-	2 013	1969
Projekti 4, Helsinki	keräilyviemäri	115	250/PVC	2 013	1971
Projekti 5, Helsinki	keräilyviemäri	113	250/PVC	2 013	1963
Projekti 7, Espoo	keräilyviemäri	308	315/PE, 200/PVC, 315/PVC	2 014	1959
Projekti 9, Vantaa	keräilyviemäri	833	200/PVC	2 016	1968-1971
Projekti 10, Vantaa	keräilyviemäri	269	200/PVC	2 016	1972/1966
Projekti 11, Kauniainen	keräilyviemäri	324	200/PEH, 300/SG, 250/SG, 250/PVC	2 015	1961
Projekti 15, Espoo	keräilyviemäri	240	200/PVC	2 013	1979
Projekti 16, Helsinki	päävesijohto	347	800/T	2 015	1957, 1963
Projekti 17, Helsinki	päävesijohto	1000	600/T, 800/T	2 016	-
Projekti 18, Espoo	pääviemäri	561	1000/Huopasukka	2 014	1966

**Selitteet:**

B	betoni
GRP/SG	pallografiittivalurauta
M	muovi
PE	polyetyleenimuovi
PEH	korkeatiheksinen polyetyleenimuovi
PVC	polyvinylikloridimuovi
T	teräs
V	valurauta
-	Ei materiaalitietoa
*	Ei halkaisijatietoa.